

2025

 **MAUERWERK** KALENDER



Aspekte der Nachhaltigkeit

2025

MAUERWERK KALENDER

Aspekte der Nachhaltigkeit

Herausgegeben von
Detteff Schermer, Regensburg
Eric Brehm, Karlsruhe

50. Jahrgang

Hinweis des Verlages

Die Recherche zum Mauerwerk-Kalender vom
Jahrgang 1976 bis 2021 steht im Internet
zur Verfügung unter www.ernst-und-sohn.de

Wohnquartier in Amsterdam, Provinz Heemskerk, Niederlande;
Architektin: Marlies Röhmer
Klinkermanufaktur: Deppe Backstein
Foto: Andreas Secci

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2025 Ernst & Sohn GmbH, Rotherstraße 21, 10245 Berlin, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden.

All rights reserved (including those of translation into other languages). No part of this book may be reproduced in any form – by photoprinting, microfilm, or any other means – nor transmitted or translated into a machine language without written permission from the publisher.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind.

Umschlaggestaltung: Sonja Frank, Berlin
Herstellung: pp030 – Produktionsbüro Heike Praetor, Berlin
Satz: le-tex publishing services GmbH, Leipzig
Druck und Bindung:

Printed in the Federal Republic of Germany.
Gedruckt auf säurefreiem Papier.

ISSN 0170-4958
Print ISBN 978-3-433-03445-3
ePDF ISBN 978-3-433-61202-6
ePub ISBN 978-3-433-61200-2
oBook ISBN 978-3-433-61201-9

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,
wir freuen uns sehr, Ihnen die neueste Ausgabe des Mauerwerk-Kalenders vorlegen zu dürfen, die sich mit dem Schwerpunkt des nachhaltigen Bauens auseinandersetzt. Bei dieser Ausgabe handelt es sich um die mittlerweile 50. – wir sind glücklich, ein so lange bestehendes Standardwerk in die Zukunft führen zu dürfen. Der Mauerwerk-Kalender ist das etablierte Nachschlage- und Referenzwerk für alle die erfolgreiche Bauweise Mauerwerk betreffenden Themen.

Diese besondere Ausgabe widmet sich im Schwerpunkt dem nachhaltigen Bauen. Auch wenn dieses Thema natürlich schon prominent vertreten war, so rechtfertigt dessen enorme Bedeutung eine erneute Ausgabe mit diesem Fokus. Nachhaltigkeit wird als wichtigstes Thema der Gegenwart auch in den zukünftigen Ausgaben ein Hauptthema bleiben.

In der vorliegenden Ausgabe wird gezielt auf praktische Lösungen und Beispiele der Umsetzung nachhaltiger Projekte unter Einsatz von Mauerwerk eingegangen. Der Beitrag von *Nisse, Maucher* und *Grimm* erläutert anschaulich die enormen Potenziale des Massivbaus hinsichtlich der Nachhaltigkeit.

Im Beitrag von *Wigger* et al. wird gezeigt, wie Stampflehmwände erfolgreich eingesetzt wurden, um die Klimaeffizienz zu verbessern. Der Beitrag von *Nagler* greift die unterschiedlichen Entwurfsansätze seiner sehr bekannten Forschungshäuser in Bad Aibling auf und erläutert die bisher erreichten Resultate. Weitere Beiträge von *Göttig* et al., *Istanbuli* et al. und *Heller* et al. geben Eindrücke von Innovationen im Mauerwerksbau und deren Stärken hinsichtlich einer nachhaltigen Bauweise.

Dennoch kommen auch klassisch konstruktive Themen in dieser Ausgabe nicht zu kurz. Der Beitrag von *Gigla* stellt den Stand der Technik bei zweischaligem Verblendmauerwerk dar. Wie die Tragfähigkeit bestehender Eisenbahngewölbebrücken experimentell bestimmt werden kann, erläutert der Beitrag von *Pelka* et al.

Des Weiteren dokumentiert auch dieser Mauerwerk-Kalender als Jahrbuch wieder den aktuellen Stand der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen und Bauartgenehmigungen sowie laufende Forschungsprojekte. Aktuelle normative Entwicklungen werden zudem anschaulich dargelegt.

Wir sind überzeugt, ein spannendes und interessantes Jahrbuch gestaltet zu haben, das sowohl den Praktikern als auch den mehr forschungsaffinen Leserinnen und Lesern eine spannende Lektüre bietet.

Unser herzlicher Dank gilt allen Mitwirkenden an diesem Band, insbesondere wieder Dr.-Ing. Dirk Jesse von Ernst & Sohn, für die große Unterstützung. Wir wünschen Ihnen, liebe Leserinnen und Leser, eine ansprechende Lektüre und hoffen, dass die Ausgabe Ihnen neue Impulse für Ihre Herangehensweise an die Lösung der kommenden Fragestellungen liefert. Packen wir's an.

Herzliche Grüße

Darmstadt und München im Juli 2024
Prof. Dr.-Ing. Eric Brehm
Prof. Dr.-Ing. Detleff Schermer

Inhaltsübersicht

A Normen und Baustoffe

- A 1 Eigenschaften und Eigenschaftswerte von Mauersteinen, Mauer Mörtel und Mauerwerk [1](#)
Michael Raupach, Dorothea Saenger, Bernd Winkels
- A 2 Neuentwicklungen beim Mauerwerksbau mit allgemeiner Bauartgenehmigung [17](#)
Matthias Bauer, Martin Wilfinger
- A 3 Geltende Technische Regeln für den Mauerwerksbau (Deutsche, Europäische und Internationale Normen) (Stand 04.03.2024) [41](#)
Benjamin Purkert
- A 4 Aufbereitung von Musterwänden aus dämmstoffgefüllten Mauerziegeln [65](#)
Barbara Leydolph, Anette Müller
- A 5 Mineralschaum – Einblick in Forschung und Entwicklung eines neuen Dämmstoffs [73](#)
Klemens Laub, Attila Höchst, Mirko Landmann, Barbara Leydolph
- A 6 Bauaufsichtliche Regelungen im Mauerwerksbau [89](#)
Richard Zander

B Gestaltung und Konstruktion (Neubau)

- B 1 Von der Handarbeit zur Hochtechnologie im Reallabor: Die Möglichkeit der BIM-basierten Planung und effizienten Produktion von Ziegelwänden durch Roboter [101](#)
Stefan Biersack, Marc Schmailzl, Thomas Linner, Friedrich Eder, Mathias Obergrießer
- B 2 Nachhaltigkeit im Praxis-Check – Das kann die monolithische Bauweise wirklich! [109](#)
Juliane Nisse, Thomas Maucher, Julius Grimm
- B 3 Stampflehmwände als tragendes Bauteil – am Beispiel des LWL-Freilichtmuseums in Detmold [141](#)
Toralf Burkert, Murat Ince, Jens-Uwe Schulz, Simon Waigand, Heinrich Wigger

C Konstruktive Details (Bauphysik)

- C 1 Zweischaliges Verblendmauerwerk [169](#)
Birger Gigla

D Mauerwerk im Bestand

- D 1 Forschungshäuser in Bad Aibling [203](#)
Florian Nagler
- D 2 Planung, Durchführung und Auswertung von Belastungsfahrten auf Eisenbahngewölbebrücken [219](#)
Conrad Pelka, Gregor Stolarski, Thomas Niedermeyer, Gunter Hahn, Christian Hesse, Steffen Marx, Jenny Keßler

E Innovationen im Mauerwerksbau

- E 1 Innovative Produkte im Mauerwerksbau [271](#)
Dieter Heller, Ahmad Iravani, Wolfgang Jachmich, Christian Franke,
Andreas Krechting
- E 2 Zukunft von Bauweisen mit höheren Dichten –
Zusammenfassung und praktische Hinweise [287](#)
Roland Göttig, Juan Romero Amaya, Mai-Khanh Talke, Carole Binsfeld,
Klaus Sedlbauer, Thomas Auer
- E 3 Ökologische Lebenszyklusbilanzierung eines Wohngebäudes [319](#)
Zakaria Istanbuly, Wolfgang Eden, Martin Schäfers, Cedric Muth,
Frédéric Tollemer

F Forschung

- F 1 Übersicht über abgeschlossene und laufende Forschungsvorhaben
im Mauerwerksbau [333](#)
Philipp Hofmann
- F 2 Experimentelle und numerische Untersuchungen
am Außenwand-Decken-Knoten [367](#)
Jonathan Meißner, Detleff Schermer, Franziska Amberger, Philipp Hofmann

Inhaltsverzeichnis

Vorwort III

Autor:innenverzeichnis XV

A Normen und Baustoffe

A1 Eigenschaften und Eigenschaftswerte von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk 1 Michael Raupach, Dorothea Saenger, Bernd Winkels

1	Einleitung	3	5	Verbund zwischen Mauerstein und Mauermörtel	8
2	Mauersteine	3	5.1	Allgemeines	8
2.1	Festigkeitseigenschaften	3	5.2	Haftscherfestigkeit	8
2.1.1	Druckfestigkeit in Steinhöhe	3	5.3	Haftzug- und Biegehaftzugfestigkeit	9
2.1.2	Druckfestigkeit in Steinlänge und -breite	3	6	Mauerwerk	10
2.1.3	Zug- und Spaltzugfestigkeit	3	6.1	Allgemeines	10
2.2	Verformungseigenschaften	4	6.2	Festigkeitseigenschaften	10
2.2.1	Elastizitätsmoduln	4	6.2.1	Druckfestigkeit	10
2.2.2	Querdehnungsmodul, Querdehnzahl	4	6.2.2	Längsdruckfestigkeit	11
2.3	Kapillare Wasseraufnahme	5	6.2.3	Zugfestigkeit	11
3	Mauermörtel	6	6.2.4	Biegezugfestigkeit	13
3.1	Festigkeitseigenschaften	6	6.2.5	Schubfestigkeit	14
3.1.1	Druckfestigkeit	6	6.3	Verformungseigenschaften	14
3.1.2	Zugfestigkeit	6	6.3.1	Elastizitätsmoduln	14
3.2	Längs- und Querdehnungsmoduln	6	6.3.2	Feuchtedehnung, Kriechen, Wärmedehnung	15
4	Mauermörtel im Mauerwerk	6		Literatur	15

A2 Neuentwicklungen beim Mauerwerksbau mit allgemeiner Bauartgenehmigung 17 Matthias Bauer, Martin Wilfinger

0	Allgemeines	20	2	Mauermörtel und Klebstoffe	26
0.1	Gesonderte Regelungen zu Schlitzfenstern	20	3	Mauertafeln	26
0.1.1	Vertikalschlitzfenster	20	4	Mauerwerk aus Mauersteinen mit CE-Kennzeichnung	31
0.1.2	Horizontalschlitzfenster	20	5	Sonstiges Mauerwerk	33
0.2	Weitere allgemeine Bestimmungen und Anforderungen	20		Literatur	38
1	Ergänzungsbauteile und Zubehör für Mauerwerk	21			

A3 Geltende Technische Regeln für den Mauerwerksbau (Deutsche, Europäische und Internationale Normen) (Stand 04.03.2024) 41 Benjamin Purkert

1	Vorbemerkung	43		Literatur	63
2	Regelwerk	44			

A 4 Aufbereitung von Musterwänden aus dämmstoffgefüllten Mauerziegeln 65

Barbara Leydolph, Anette Müller

- | | | | | | |
|-----|---------------------------------------|----|---|--|----|
| 1 | Einführung | 67 | 4 | Ergebnisse der Untersuchungen im Labormaßstab | 69 |
| 2 | Untersuchungen im Labormaßstab | 67 | 5 | Ergebnisse der Untersuchungen im technischen Maßstab | 70 |
| 2.1 | Materialien | 67 | 6 | Schlussfolgerungen | 71 |
| 2.2 | Untersuchungsmethoden | 67 | | Literatur | 71 |
| 3 | Untersuchungen im technischen Maßstab | 67 | | | |

A 5 Mineralschaum – Einblick in Forschung und Entwicklung eines neuen Dämmstoffs 73

Klemens Laub, Attila Höchst, Mirko Landmann, Barbara Leydolph

- | | | | | | |
|-------|---|----|-------|--|----|
| 1 | Einleitung | 75 | 3 | Auswahl bauphysikalischer Eigenschaften | 81 |
| 2 | Herstellung von Mineralschäumen | 75 | 3.1 | Schwinden des Mineralschaums | 81 |
| 2.1 | Herstellungsverfahren | 75 | 3.2 | Trocknungsverhalten verfüllter Hochlochziegel | 82 |
| 2.2 | Gesetzliche Regelung und Zulassung | 76 | 3.3 | Nass- und Trockenrohdichte, Wärmeleitfähigkeit | 83 |
| 2.3 | Herausforderungen und Möglichkeiten | 76 | 3.4 | Massenhydrophobierter Mineralschaum | 84 |
| 2.4 | Forschungs- und Entwicklungsgegenstand am IAB | 78 | 3.4.1 | Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl | 85 |
| 2.5 | Erstarrungsverhalten von Mineralschaum | 80 | 3.4.2 | Wasseraufnahme von Hochlochziegeln nach DIN EN 772-11:2011 | 86 |
| 2.6 | Qualitätssicherung in der Produktion | 80 | 3.4.3 | Kapillares Wasseraugen von Hochlochziegeln | 86 |
| 2.6.1 | Ausgangsstoffe | 80 | 4 | Zusammenfassung | 87 |
| 2.6.2 | Monitoring des Herstellungsverfahrens | 80 | | Literatur | 88 |

A 6 Bauaufsichtliche Regelungen im Mauerwerksbau 89

Richard Zander

- | | | | | | |
|-----|--|----|-----|--|----|
| 1 | Einleitung | 91 | 3 | Weg eines Bauprodukts bis zur Verwendbarkeit | 95 |
| 2 | Regelungen für Bauprodukte und Bauarten im Überblick | 91 | 3.1 | Harmonisierte Norm – ja oder nein | 95 |
| 2.1 | Bauprodukt/Bauart | 91 | 3.2 | Europäisch oder national | 95 |
| 2.2 | Harmonisierte Norm (hEN) | 91 | 3.3 | Verwendbarkeit in Deutschland | 95 |
| 2.3 | Eurocodes | 92 | 3.4 | Anwendungsregel | 95 |
| 2.4 | Europäisches Bewertungsdokument (EAD) und Europäische Technische Bewertung (ETA) | 92 | 3.5 | Einordnung des Lehmsteinmauerwerks | 97 |
| 2.5 | Nationale Normen (DIN) | 92 | 4 | Neue Baustoffe und Bauprodukte | 98 |
| 2.6 | Verwendung von Bauprodukten und Anwendung von Bauarten | 93 | 5 | Zusammenfassung | 99 |
| 2.7 | Vergleich der nationalen und europäischen Regelungen | 93 | | Literatur | 99 |

B Gestaltung und Konstruktion (Neubau)**B 1 Von der Handarbeit zur Hochtechnologie im Reallabor: Die Möglichkeit der BIM-basierten Planung und effizienten Produktion von Ziegelwänden durch Roboter 101**

Stefan Biersack, Marc Schmailzl, Thomas Linner, Friedrich Eder, Mathias Obergrießer

- | | | | | | |
|-----|--------------------------------------|-----|-----|--------------------------------------|-----|
| 1 | Einleitung | 103 | 4.2 | Softwareunabhängiger Open-BIM-Ansatz | 105 |
| 2 | Reallabor „Building Lab“ | 103 | 4.3 | Versuchsaufbau im Reallabor | 105 |
| 3 | Bauindustrie und Baurobotik | 103 | 5 | Diskussion | 108 |
| 4 | End-to-End-Workflow | 104 | 6 | Fazit und Ausblick | 108 |
| 4.1 | Softwareabhängiger Closed-BIM-Ansatz | 104 | | Literatur | 108 |

B 2 Nachhaltigkeit im Praxis-Check – Das kann die monolithische Bauweise wirklich! 109

Juliane Nisse, Thomas Maucher, Julius Grimm

- | | | | | | |
|-----|--|-----|-------|--|-----|
| 1 | Einleitung | 111 | 4.2 | Meilenstein I (Projektinitiierung) | 118 |
| 2 | Anforderungen an moderne, nachhaltige Wohngebäude | 111 | 4.3 | Meilenstein II (Planungsphase) – Ausgewählte Ergebnisse | 120 |
| 2.1 | Anforderungen an die Energieeffizienz (EE) | 112 | 4.3.1 | Ergebnisse der Energiebilanz | 123 |
| 2.2 | Anforderungen an das Nachhaltige Bauen (NH) | 112 | 4.3.2 | Ergebnisse der Ökobilanzierung | 125 |
| 2.3 | Anforderungen für das Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude (QNG) | 114 | 4.3.3 | Ergebnisse der Lebenszykluskostenberechnung | 127 |
| 2.4 | Anforderungen Förderung (Zusammenfassung) | 115 | 4.3.4 | Ergebnisse für die Barrierefreiheit | 129 |
| 3 | NH-Initiative für das Bauen mit Ziegelprodukten | 116 | 4.3.5 | Ergebnisse der Tageslichtversorgung und des sommerlichen Wärmeschutzes | 129 |
| 3.1 | Die Idee | 116 | 4.4 | Meilenstein III – Ausschreibung | 131 |
| 3.2 | Die Bedeutung des „klimabewusstbauen“-Prinzips | 116 | 4.4.1 | Nachweis der Schadstofffreiheit | 132 |
| 4 | Vorstellung des NH-Pilotprojekts | 116 | 4.4.2 | Nachweis von nachhaltigem Holz | 132 |
| 4.1 | Meilensteine des Projekts in der Planung | 118 | 4.4.1 | Nachweis von nachhaltigem Holz | 133 |
| | | | 4.5 | Meilenstein IV – Bauausführung | 133 |
| | | | 4.6 | Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Pilotprojekt | 135 |
| | | | 5 | Fazit und Ausblick | 139 |
| | | | | Literatur | 139 |

B 3 Stampflehmwände als tragendes Bauteil – am Beispiel des LWL-Freilichtmuseums in Detmold 141

Toralf Burkert, Murat Ince, Jens-Uwe Schulz, Simon Waigand, Heinrich Wigger

- | | | | | | |
|-----|---|-----|-------|---|-----|
| 1 | Einführung | 143 | 4 | Physikalische und mechanische Untersuchungen von Stampflehm | 148 |
| 2 | Bauwerk und Innovation | 143 | 4.1 | Vorgehensweise | 148 |
| 2.1 | Prolog | 143 | 4.2 | Herstellung der Probekörper und Feuchteinfluss | 148 |
| 2.2 | Eingangs- und Ausstellungsgebäude des LWL-Freilichtmuseums Detmold | 143 | 4.3 | Trocknungs- und Schwindverhalten unter Laborbedingungen | 149 |
| 2.3 | Stampflehmkonstruktion im LWL-Freilichtmuseum | 144 | 4.4 | Untersuchungen zum mechanischen Verhalten | 150 |
| 2.4 | Bauprozess | 145 | 4.4.1 | Druckfestigkeit an klein- und großformatigen Prüfkörpern | 150 |
| 3 | Notwendigkeit der Zustimmung im Einzelfall/vorhabenbezogene Bauartgenehmigung | 146 | 4.4.2 | Zusammenfassung der mechanischen Untersuchungen | 155 |
| 3.1 | Stand der Normung in Deutschland | 146 | 4.4.3 | Auswirkungen des Feuchtezustands auf die Druckfestigkeit | 155 |
| 3.2 | Aktuelle Normen des Lehmbaus | 147 | 4.4.4 | Kriechverhalten an Zylindern | 155 |

5	Stampflehmwand unter Brandbeanspruchung	157	6.2	Feuchteabhängige Druckfestigkeit	163
5.1	Versuchsaufbau und Belastung	157	6.3	Kriechverformung und Kriechverformungsmodellierung	164
5.2	Durchführung der Brandversuche	158	7	Zusammenfassung	166
5.3	Versuchsergebnisse der Brandprüfungen	159		Literatur	167
6	Bemessung der Stampflehmwand	162			
6.1	Ermittlung der charakteristischen Druckfestigkeit und Teilsicherheitsbeiwerte für Stampflehm an kleinformatigen Prüfkörpern	162			
C Konstruktive Details (Bauphysik)					
C 1 Zweischaliges Verblendmauerwerk 169 Birger Gigla					
1	Einführung	171	6	Hinweise zur Ausführung	188
2	Grundsätzliche technische Regeln und Stand der Baupraxis	172	6.1	Mauersteine	188
2.1	Zweischaliges Verblendmauerwerk	172	6.2	Mörtel	189
2.2	Tragende Innenschale	174	6.3	Dehnungsfugen und Lüftungsöffnungen	191
2.3	Verblendschale	174	6.4	Schalenzwischenraum: Abdichtung	191
2.4	Schalenzwischenraum	178	6.5	Schalenzwischenraum: Kerndämmung und Drahtanker	193
3	Dauerhaftigkeit der Verblendschale	180	6.6	Tragschale und Abfangungen	194
4	Energiesparender Wärmeschutz	181	6.7	Reinigung und Beschichtung der Verblendschale	195
5	Eindringen von Feuchte durch Schlagregen	181	6.8	Prozessoptimierungen bei der Herstellung von Verblendmauerwerk	195
			6.9	Nachhaltigkeit	196
			7	Zusammenfassung	198
				Literatur	198
D Mauerwerk im Bestand					
D 1 Forschungshäuser in Bad Aibling 203 Florian Nagler					
1	Vorgeschichte	205	5	Die zweite Serie	214
2	Grundlagen	206	6	Ausblick	217
3	Die erste Serie	209		Literatur	218
4	Kritische Reflexion	212			
D 2 Planung, Durchführung und Auswertung von Belastungsfahrten auf Eisenbahngewölbebrücken 219 Conrad Pelka, Gregor Stolarski, Thomas Niedermeyer, Gunter Hahn, Christian Hesse, Steffen Marx, Jenny Keßler					
1	Einleitung	221	3.2	Untersuchung des Bauwerks	224
2	Entstehungsgeschichte der EÜ Seybothenreuth	222	3.3	Untersuchungsplanung an der EÜ Seybothenreuth	226
3	Bestand und Zustand der EÜ Seybothenreuth	224	3.4	Vorläufige Auswertung und Einschätzung nach Diagnostik	227
3.1	Auswertung der Regelinspektionen – Erkennung einer Schadensentwicklung	224	3.5	Planung der Sanierungsmaßnahmen	229

4	Erste statische und geotechnische Betrachtung	231	7	Ergänzende geotechnische Untersuchungen	249
4.1	Vereinfachte 2D-FE-Simulation	231	7.1	Veranlassung	249
4.2	Geotechnische Berechnungen auf Grundlage der 1. Erkundungsphase	232	7.2	Erkundungsprogramm des 2. EKP (2022), BG 2 (2023)	249
4.2.1	Erkundungsprogramm der 1. EKP (2018)	232	7.2.1	Aufschlussarbeiten	249
4.2.2	Geotechnische Berechnung auf Grundlage der 1. EKP (2018)	234	7.2.2	Geologische Schichteinheiten und Baugrundbeschreibung	251
4.3	Ergänzende 3D-FE-Betrachtungen für Boden und Bauwerk	234	7.2.3	Geomechanische Kenngrößen (BG2 2023)	254
5	Ableitung der Belastungsfahrt	238	7.3	Ergänzende geotechnische Nachweisführung	257
5.1	Planung für eine Lok-Belastungsfahrt	238	7.4	Vergleich der FE-Modellierungen mit den in den Setzungsrechnung verwendeten Eingangsgrößen (Bericht 1+2)	260
5.1.1	Lasten & Laststellungen	239	7.5	Vergleich Belastungsfahrt mit den Setzungs-berechnungen (nach DIN 4019)	264
5.1.2	Messtechnik	241	8	Messwertgestützte statische Nachweisführung	265
5.2	Durchführung	245	8.1	Durchführung der statischen Berechnung mit kalibriertem 3D-FE-Modell	265
5.2.1	Messung	245	8.2	Ergebnisse und Auswertung	266
5.2.2	Messwerterfassung	246	9	Zusammenfassung und Ausblick	268
5.3	Messwertaufbereitung/Messwert-zuordnung	246		Literatur	269
5.3.1	Aufbereitung/Zuordnung der mechanischen Messwerte	246			
5.3.2	Vergleich beider Messsysteme	247			
6	Auswertung der Belastungsfahrt	247			
6.1	Vergleich beider Messsysteme	247			
6.2	Ermittlung repräsentativer Messwerte	248			
E Innovationen im Mauerwerksbau					
E1 Innovative Produkte im Mauerwerksbau 271					
Dieter Heller, Ahmad Iravani, Wolfgang Jachmich, Christian Franke, Andreas Krechting					
1	Einleitung und Struktur des Beitrags	273	4	Mauertafeln aus Leichtbeton	280
2	Nachhaltiges und effizientes Bauen mit Mauerwerk aus Leichtbeton	274	4.1	Seriell und modulares Bauen	280
2.1	Forschung und Entwicklung	277	4.2	Elemente und Fertigteile aus Leichtbeton	281
2.2	Effizient bauen im System	277	4.3	Technische Regeln zur Bauteilbemessung: Mauertafeln nach Norm und Zulassung	282
3	Großformatige Elemente aus Leichtbeton	278	4.4	Herstellung von Mauertafeln aus Leichtbeton	282
3.1	Effizienter bauen	278	4.5	Sicheres Transportsystem	283
3.2	Technische Eigenschaften und Material	279	4.6	Montage und Putzarbeiten	284
			4.7	Fazit	284
				Literatur	285
E2 Zukunft von Bauweisen mit höheren Dichten – Zusammenfassung und praktische Hinweise 287					
Roland Göttig, Juan Romero Amaya, Mai-Khanh Talke, Carole Binsfeld, Klaus Sedlbauer, Thomas Auer					
1	Einführung	289	2.3	Fazit bezüglich anwendbarer klimatischer Randbedingungen	294
2	Klimatische Randbedingungen	289	3	Auswahl der Modellgebäude	294
2.1	Klimadaten	291	4	Randbedingungen und Anforderungen	295
2.2	Klimaanalyse	291	4.1	Allgemeine Randbedingungen	295
2.2.1	Repräsentative Standorte	291	4.2	Interne Wärmequellen	296
2.2.2	Vergleich der Standorte	293	4.3	Luftwechsel und Fensterlüftung	296
2.2.3	Vergleich der TRY-Wetterdatensätze und der Messdaten	293			

4.4	Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz und DIN 4108-2:2013-02	298	8.2	Sommerlicher Wärmeschutz	307
4.5	Sommerlicher Komfort	298	8.2.1	Übertemperaturhäufigkeit	307
4.5.1	DIN EN 15251:2012-12	298	8.2.2	Statistische Analyse	308
4.5.2	DIN EN 16798-1:2022-03	300	8.2.3	Design-Frame	309
4.6	Anforderungen an den winterlichen Wärmeschutz	300	8.2.4	Fazit zum sommerlichen Wärmeschutz	311
5	Bauteilaufbauten	301	8.3	Energiebedarf und Sektorkopplung	311
6	Variantenmatrix	303	8.4	Tragfähigkeit, Schallschutz und weitere Parameter	312
7	Grundlagen der thermischen Simulationen	304	9	Fazit und Ausblick	313
8	Auswertung der Ergebnisse	305	9.1	Bewertung der Methodik	313
8.1	Winterlicher Wärmeschutz	305	9.2	Validität der Ergebnisse	314
8.1.1	Heizenergiebedarf	305	9.3	Hinweise für mögliche normative Vorgaben und Vereinfachungen	314
8.1.2	Statistische Analyse zum winterlichen Wärmeschutz	306	9.4	Danksagung	315
8.1.3	Fazit zum winterlichen Wärmeschutz	307		Literatur	315
E 3	Ökologische Lebenszyklusbilanzierung eines Wohngebäudes	319			
	Zakaria Istanbuly, Wolfgang Eden, Martin Schäfers, Cedric Muth, Frédéric Tollemer				
1	Fragestellung	321	4	Ökobilanzanalyse	326
2	Beschreibung des betrachteten Gebäudes	321	4.1	Variantenvergleich GWP und PE_{NRT}	326
3	Variantenbildung	323	4.1.1	Treibhauspotenzial (GWP)	326
3.1	Kalksandstein	323	4.1.2	Nicht erneuerbare Primärenergie (PE_{NRT})	328
3.2	Holztafelbau	324	4.1.3	Weitergehende Auswertung	328
3.3	Ergebnisse der GEG-Nachweise	324	4.2	Betrachtung nach Bauteilen	329
			4.2.1	Auswertung der Außenwände	330
			4.2.2	Auswertung der Decken	330
			5	Fazit	331
				Literatur	332
F	Forschung				
F 1	Übersicht über abgeschlossene und laufende Forschungsvorhaben im Mauerwerksbau	333			
	Philipp Hofmann				
1	Laufende Forschungsvorhaben	336	1.2.3	Tragende Lehmsteine auf Basis von Recyclinggranulaten aus Reststoffen der Gipsgewinnung und Thüringer Lehmvorkommen – Entwicklung und Prüfung tragender Lehmsteine und Wandkonstruktionen aus Lehmsteinmauerwerk (Kurztitel: CLAYBLOC)	340
1.1	Übersicht der Forschungsvorhaben	336	1.2.4	InDeckLe – Innovative Deckenkonstruktionen aus Lehmverbund in industrieller Bauweise	342
1.2	Kurzberichte	336			
1.2.1	Entwicklung eines Bemessungskonzepts für Lehmmauerwerkswände unter Schubbeanspruchung	336			
1.2.2	Trag- und Verformungsverhalten von Trockenmauerwerkswänden mit Verzahnungskonfiguration unter seismischen Einwirkungen	338			

- 2 Abgeschlossene Forschungsvorhaben 345
 - 2.1 Übersicht der Forschungsvorhaben 345
 - 2.2 Kurzberichte 345
 - 2.2.1 Lehntafelbauweise – Vorgefertigte lasttragende Massivlehmwände 345
 - 2.2.2 Einsatz von Porenbetonreststoffen in der Kalksandsteinproduktion 348
 - 2.2.3 Experimentelle Untersuchungen von Schubwänden aus Mauerwerk unter Erdbebenbeanspruchung 355
 - 2.2.4 Forschungsvorhaben der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e. V. 362
 - 2.2.4.1 Einsatz von calciniertem Ton zur Nutzung bislang ungeeigneter Sande für die Kalksandsteinproduktion – Alkalifänger (AiF-Nr. 21067-N) 362
 - 2.2.4.2 Eignung von Sägeschlämmen aus der Fertigung von Kalksandstein-Plan-elementsystemen als Optimierungszusatz für die Kalksandsteinproduktion (AiF-Nr. 21068-N) 363
 - 2.2.4.3 Produktion von CO₂-armen Öko-Mauersteinen durch bindemittelfreie Autoklavierung von RC-Brechsanden (AiF-Nr. 21860 N) 364
 - 2.2.4.4 Ermittlung von Grundlagen zur Produktion von nachhaltigen Kalksandsteinen mit minimierter CO₂-Last (AiF-Nr. 22796-N) 365
 - 2.2.4.5 Steigerung des Recyclinganteils 366
- F2 Experimentelle und numerische Untersuchungen am Außenwand-Decken-Knoten 367**
Jonathan Meißner, Detleff Schermer, Franziska Amberger, Philipp Hofmann
 - 1 Einleitung 369
 - 2 Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss exzentrischer Lasteinleitung auf die Tragfähigkeit von Mauerwerkswänden 369
 - 2.1 Datenerhebung vorhandener zentrischer und doppeltexzentrischer Druckversuche 370
 - 2.2 Analyse der Versuchsergebnisse 372
 - 2.3 Einfluss des Lastneigungswinkels 375
 - 2.4 Analytische Spannungsverteilung auf Querschnittsebene 376
 - 2.5 Zusammenfassung 377
 - 3 Exzentrische Teilflächenbelastung an Wandprüfkörpern 378
 - 3.1 Herstellung der Prüfkörper 379
 - 3.2 Materialeigenschaften des verwendeten Planhochlochziegels 380
 - 3.3 Versuchsergebnisse 380
 - 3.3.1 Zentrische Beanspruchung 380
 - 3.3.2 Beanspruchungssituation am Wandfuß 381
 - 3.3.3 Beanspruchungssituation am Wandkopf 383
 - 3.3.4 Moment-Krümmungs-Beziehungen 385
 - 3.3.5 Experimentelle Moment-Krümmungs-Beziehung 385
 - 3.4 Zusammenfassung 386
 - 4 Experimentelle Untersuchungen des Außenwand-Decken-Knotens 387
 - 4.1 Versuche am Gesamtsystem des Außenwand-Decken-Knotens 387
 - 4.1.1 Versuchsaufbau 387
 - 4.1.2 Ermittlung der Moment-Rotation-Interaktion 389
 - 4.1.3 Lastprogramm 390
 - 4.2 Versuchsergebnisse 391
 - 4.2.1 Materialeigenschaften 391
 - 4.2.2 Moment M_K – Rotation φ_K – Interaktion 391
 - 4.2.3 Wandkopf- und Wandfußrotation 392
 - 4.3 Zusammenfassung und Ausblick 392
 - 5 Numerische Untersuchungen zur nicht-linearen Schnittgrößenermittlung am Außenwand-Decken-Knoten 393
 - 5.1 Numerisches Modell 393
 - 5.2 Berechnungsparameter 394
 - 5.2.1 Geometrie- und Materialparameter 394
 - 5.2.2 Lastparameter 394
 - 5.2.3 Bemessungswert des Tragwiderstands 395
 - 5.3 Auswertung 395
 - 5.3.1 Vollaufgelagerte Decke 395
 - 5.3.2 Teilaufgelagerte Decke 397
 - 5.4 Zusammenfassung 400
 - 6 Fazit 401
 - Literatur 402

Autor:innenverzeichnis

Amaya, Juan Romero, M.Sc.

Studium der Architektur an der Universidad de los Andes in Bogotá, Kolumbien, Studium KlimaDesign an der TU München. 2018–2019 Mitarbeit bei Behnisch Architekten in München, bis 2021 Weiterbildung BA-SEhabitat zum Thema ökologische Ressourcen und soziales Bauen an der Kunstuniversität Linz, seit 2022 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen an der TU München.

Technische Universität München, Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, Arcisstr. 21, 80333 München

Amberger, Franziska, M.Eng.

Bauingenieursstudium OTH Regensburg, seit 2023 wissenschaftliche Mitarbeiterin an der OTH Regensburg.

Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Galgenbergstraße 30, 93053 Regensburg

Auer, Thomas, Prof. Dipl.-Ing.

Seit 1994 Geschäftsleitung von Transsolar, 2001–2008 Lehrauftrag Yale University, danach Gastprofessuren (Ryerson University etc.), weltweite Zusammenarbeit mit namhaften Architekturbüros an preisgekrönten Projekten, Forschung zur Dekarbonisierung des Gebäudesektors, Robustheit durch „low-tech“ und Aufenthaltsqualität in Innen- und Außenraum, seit 2014 Professor für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen an der TU München (Lehrstuhlinhaber).

Technische Universität München, Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, Arcisstr. 21, 80333 München

Bauer, Matthias, M.Eng.

2018–2023 Studium Bauingenieurwesen Hochschule Karlsruhe, seit 2023 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der HS Karlsruhe.

Hochschule Karlsruhe, Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe

Biersack, Stefan, M.Eng.

Studium Bauingenieurwesen ab 2018 an der OTH Regensburg, seit 2018 bei Omlor-Weigert Architekten & Generalplaner GmbH im Bereich Planung und Bauleitung, 2021–2023 Masterstudium Bauingenieurwesen

mit Schwerpunkt „Digitales Bauen“ an der OTH Regensburg.

Omlor-Weigert Architekten & Generalplaner GmbH, Prüfeninger Schloßstraße 4a, 93051 Regensburg

Binsfeld, Carole, Dr.-Ing.

Studium Umweltingenieurwesen und Bauingenieurwesen an der TU München, 2019–2023 wissenschaftliche Mitarbeiterin und seit 2024 Lehrbeauftragte am Lehrstuhl für Bauphysik an der TU München mit Schwerpunkt Raumklima und Behaglichkeit, 2023 Promotion an der TU München.

Technische Universität München, Lehrstuhl für Bauphysik, Arcisstr. 21, 80333 München

Burkert, Toralf, Prof. Dr.-Ing.

Bauingenieurstudium TU Dresden, 1995–2001 wiss. Mitarbeiter TU Dresden, Institut für Baukonstruktionen und Holzbau, 2001 Promotion, seit 2001 Jäger Ingenieure GmbH, 2001–2021 Lehrbeauftragter TU Dresden, Fak. Architektur, seit 2017 Nachweisberechtigter für vorbeugenden Brandschutz bei der AKT/IKT, seit 2021 Honorarprofessor für Instandsetzung und Ertüchtigung von historischen Bauwerken, TU Dresden, Mitarbeit in der Wiss.-Techn. AG für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege (WTA).

Jäger Ingenieure GmbH, Büro Weimar, Paul-Schneider-Straße 17, 99423 Weimar

Eden, Wolfgang, Dr.-Ing.

1982–1988 Studium des Bauingenieurwesens an der Leibniz Universität Hannover, 1989–1991 Bauleiter bei Goldbeckbau/Lufthansa im Flugzeugdockbau, Promotion an der Universität Kassel im Fachbereich Werkstoffe des Bauwesens, seit 1991 Leiter Forschung, Technologie und Umwelt bei der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e. V.

Forschungsvereinigung Kalk-Sand e. V., Entenfangweg 15, 30419 Hannover

Eder, Friedrich, M.Eng.

2017–2019 Masterstudium Bauingenieurwesen OTH Regensburg, Doktorand und wissenschaftlicher Mitarbeiter der Fakultät Bauingenieurwesen OTH Regensburg im Bereich Dateninteroperabilität im Bauwesen seit 2019.

Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Fakultät Bauingenieurwesen, Building Lab, Rudolf-Vogt-Str. 16, 93053 Regensburg

Franke, Christian, Dipl.-Ing. (FH)

1982–1985 Beton- und Stahlbetonbauer, 1989–1996 Studium Architektur FH München, 1991–1997 Mitarbeit in Architekturbüros, Baubiologe (IBN), 2006 Gebäudeenergieberater (HWK), 2001–2003 Partner der Architektengemeinschaft InPlan+Tat, 2004–2010 Technischer Berater Schwenk Putztechnik GmbH, 2010–2012 Gebietsverkaufsleiter für Aluminiumfassaden Aluform Bernsdorf, seit 2012 Bereichsleiter für Mauerwerksysteme.

Meier Betonwerke GmbH, Zur Schanze 2,
92283 Lauterhofen

Gigla, Birger, Prof. Dr.-Ing.

Studium des Bauingenieurwesens an der TU Braunschweig und der ETH Zürich, 1993–1996 Ingenieurgesellschaft Wiederaufbau Frauenkirche Dresden, Prof. Wenzel und Prof. Jäger, 1996–1999 wiss. Mitarbeiter in der FG Mauerwerk des SFB 315 „Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, Baugefüge, Konstruktionen“ an der Universität Karlsruhe (heute KIT), 1999 Promotion am Institut für Tragkonstruktionen der Universität Karlsruhe, seit 2000 Professor für Mauerwerkbau, Bauwerkserhaltung und Bauphysik an der TH Lübeck.

Technische Hochschule Lübeck, Fachbereich
Bauwesen, Mönkhofer Weg 239, 23562 Lübeck

Göttig, Roland, Dr.-Ing.

Studium der Physikalischen Technik an der FH München, Studium der Architektur an der TU München und Promotion an der Fakultät für Architektur. Anstellungen am Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen in den Abteilungen Hygrothermik und Energiesysteme sowie an der TU München, Computer Aided Architectural Design (CAAD). Freiberufliche Tätigkeit als Planungsingenieur im Bauwesen, Anstellung an der TU München, School of Engineering and Design, Lehrstuhl für Bauphysik.

Technische Universität München, Lehrstuhl für
Bauphysik, Arcisstr. 21, 80333 München

Grimm, Julius, B.Eng., MBA

2013–2017 Studium Bau-Projektmanagement/Bauingenieurwesen HS Biberach, 2018 Projektmanager Grimm GmbH, 2019–2021 Masterstudium Unternehmensführung an Bauakademie der HS Biberach, 2021 Mitgründer des Startups „sumoo“: Entwicklung einer modularen Unternehmensplattform zur Auswertung von BIM-Modellen in Echtzeit, 2022 Geschäftsführer der Grimm GmbH mit Schwerpunkt digitale Transformation, BIM und Unternehmensstrategie.

Grimm GmbH, Wolfäckerweg 5, 88437 Maselheim

Hahn, Gunter, Dipl.-Ing.

Berufsausbildung zum Zimmermann, Bauingenieurstudium (Diplom) HTWK Leipzig, 2010–2020 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für experimentelle Mechanik der HTWK Leipzig, seit 2020 geschäftsführender Gesellschafter der IexB Ingenieurgesellschaft für experimentelle Bauwerksuntersuchung mbH, seit 2022 Dozent bei EIPOS Europäisches Institut für Postgraduale Bildung GmbH.

IEXB GmbH, Ferdinand-Jost-Straße 37,
04299 Leipzig

Heller, Dieter, Dipl.-Ing. (FH)

1990–1995 Studium Bauingenieurwesen, seit 1995 beratender Ingenieur Bims- und Leichtbetonindustrie Neustadt, Technischer Berater, Technische Vorträge an Fachhochschulen und Universitäten, seit 2002 Geschäftsführer Bundesverband Leichtbeton e. V. und Forschungsvereinigung Leichtbeton e. V., Geschäftsführer Fachvereinigung Bims e. V., Geschäftsführer Güteschutz und Landesverband Beton- und Bimsindustrie Rheinland-Pfalz e. V., Mitarbeit in nationalen und europäischen Normungsgremien (DIN und CEN).

Bundesverband Leichtbeton e. V., Sandkauler Weg 1,
56564 Neuwied

Hesse, Christian, Prof. Dr.-Ing.

Studium Geodäsie Leibniz Universität Hannover, 2000–2006 Wissenschaftlicher MA am Geodätischen Institut der Leibniz Universität Hannover, 2006–2008 Referendariat LGLN Braunschweig, 2007 Promotion, seit 2008 ÖBVI und Gesellschafter im Vermessungsbüro Hesse in Buxtehude, seit 2009 Gründer und Gesellschafter dhpi Vermessung Hamburg, seit 2017 Gründer und Gesellschafter HydroMapper GmbH Hamburg, seit 2010 Lehrbeauftragter an der HCU Hamburg, seit 2022 Hon.-Prof. für Geodätische 3D-Messtechnik an der HCU Hamburg.

dhpi Vermessung, Veritaskai 6, 21079 Hamburg

Höchst, Attila, Dipl.-Ing.

1993–1999 Bauingenieurstudium Bauhaus-Universität Weimar, Vertiefungen „Konstruktiver Ingenieurbau“ und „Betontechnologie“, seit 2000 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Angewandte Bauforschung Weimar mit den Schwerpunkten Betonwarenherstellung, Betonrezeptur- und Mineralschaumentwicklung.

IAB – Institut für Angewandte Bauforschung Weimar
gGmbH, Über der Nonnenwiese 1, 99428 Weimar

Hofmann, Philipp, M.Eng.

Bauingenieurstudium OTH Regensburg, seit 2022 wissenschaftlicher Mitarbeiter und seit 2024 Lehrbeauftragter an der OTH Regensburg

Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Galgenbergstraße 30, 93053 Regensburg

Ince, Murat, M.Sc.

Bauingenieurstudium Jade Hochschule Oldenburg und Wismar, seit 2016 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Jade Hochschule Oldenburg, seit 2018 beim Institut für Materialprüfung und Bauwerkserhaltung GmbH, seit 2024 In-Institut für Materialwissenschaften und Konstruktionen im Bauwesen (IMK) an der Jade Hochschule Oldenburg, Betoningenieur/E-Schein-Inhaber (VDB).

Jade Hochschule, Institut für Materialwissenschaften und Baukonstruktionen im Bauwesen (IMK), Zeughausstraße 15, 26121 Oldenburg

Iravani, Ahmad, M.Sc.

Maschinenbau-Studium, Projekt Ingenieur Bereich Anlagenfertigung und Stahlbau, Studium Bauingenieurwesen an der Bergischen Universität Wuppertal, ab 2015 wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand am Lehrstuhl für Werkstoffe im Bauwesen an der Bergischen Universität Wuppertal, Forschungsprojekte im Bereich Beton und Baustoffe, seit 2022 beim Bundesverband Leichtbeton e. V., zunächst als Leiter Technik und Normung und seit Juli 2023 als Technischer Geschäftsführer.

Bundesverband Leichtbeton e. V., Sandkauler Weg 1, 56564 Neuwied

Istanbuly, Zakaria, M.Sc.

Studium des Bauingenieurwesens an der Leibniz Universität Hannover und 2022 Masterabschluss, seit 2023 Stellvertretender Leiter Forschungsvereinigung Kalksand e. V. und Stellvertretender Leiter Prüf- und Forschungsinstitut Bundesverband Kalksandsteinindustrie e. V.

Bundesverband Kalksandsteinindustrie e. V., Entenfangweg 15, 30419 Hannover

Jachmich, Wolfgang, Dipl.-Ing. (FH)

Seit über vierzig Jahren in der Bims- und Leichtbetonindustrie tätig, Mitarbeit für den Bundesverband Leichtbeton e. V. in diversen DIN-Normengremien, Vorstandsmitglied der Deutschen Gesellschaft für Mauerwerk und Wohnungsbau (DGfM), langjährige Mitarbeit im Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V.

in München und FIW, seit 2021 technischer Berater bei Jakob Stockschläder GmbH & Co. KG in Ochtendung.

JASTO Baustoffwerke GmbH & Co. KG, Koblenzer Straße 58, 56299 Ochtendung

Keßler, Jenny, Dipl.-Ing.

Bauingenieurstudium TU Dresden, Konstruktiver Ingenieurbau, seit 2022 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Massivbau, TU Dresden.

Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Massivbau, 01062 Dresden

Krechting, Andreas, Dipl.-Ing. (FH)

Bis 1996 Studium Bauingenieurwesen FH Münster, Leiter Prüf- und Überwachungsstelle und stellv. Leiter Zertifizierungsstelle Mauerwerk am Institut für Bauforschung RWTH Aachen, seit 2001 im Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V. zuständig im Bereich Normung, 2007 Geschäftsführer Deutsche Poroton GmbH, seit Juli 2008 Geschäftsführer KLB Klimaleichtblock GmbH, langjährige Mitarbeit in diversen DIN-Normengremien und Fachausschüssen für den Bundesverband Leichtbeton e. V.

KLB Klimaleichtblock GmbH, Lohmannstraße 31, 56626 Andernach

Landmann, Mirko, Dipl.-Ing.

Diplomstudium Bauingenieurwesen an der Bauhaus-Universität Weimar, Studienaufenthalt an der École des Mines d'Alès (Frankreich), seit 2010 am Institut für Angewandte Bauforschung Weimar, seit 2024 Forschungsbereichsleiter „Beton und Recycling“.

IAB – Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH, Über der Nonnenwiese 1, 99428 Weimar

Laub, Klemens, M.Sc.

Studium der Umweltingenieurwissenschaften bis 2012 an der Bauhaus-Universität Weimar, Vertiefung im Bereich „Abfall und Recycling“, seit 2012 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Angewandte Bauforschung Weimar mit den Schwerpunkten Partikeltechnologie, Rheologie und Mineralschaumentwicklung.

IAB – Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH, Über der Nonnenwiese 1, 99428 Weimar

Leydolph, Barbara, Dr.-Ing.

1987–1992 Studium der Silikattechnik an der HS für Architektur und Bauwesen Weimar (heute Bauhaus-Universität), Mitarbeit Architekturbüro für Denkmalpflege, 1995–1999 Diplomstudium Bauingenieurwesen Bauhaus-Universität, 2007 Promotion mit Schwer-

punkt Sanierung asbestbelasteter Gebäude, seit 1996 am IAB – Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH, u. a. als Forschungsbereichsleiterin Baustoffe, seit 2024 institutsweite Forschungskoordinatorin.

IAB – Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH, Über der Nonnenwiese 1, 99428 Weimar

Linner, Thomas, Prof. Dr.-Ing.

2009–2013 Promotion an der TU München, 2021 Gastprofessor an der Keiō-Universität in Tokio, 2020–2023 Forschungsleiter an der TU München, Professor an der Fakultät Bauingenieurwesen der OTH Regensburg seit 2022. Leiter internationaler F&E-Projekte in den Bereichen Baurobotik (u. a. Vizepräsident IAARC), Systems-Engineering, Standardisierung und Start-Up-Gründung.

Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Fakultät Bauingenieurwesen, Building Lab, Rudolf-Vogt-Str. 16, 93053 Regensburg

Marx, Steffen, Univ.-Prof. Dr.-Ing.

Bauingenieurstudium HAB Weimar, 1995–1999 wiss. MA an der Uni Weimar, 1999 Promotion, 1999–2001 Planungsing. bei BGS Ingenieursozietät, Dresden, 2001–2003 Teamleiter Konstruktiver Ing.-bau bei DE-Consult GmbH und DB ProjektBau GmbH, 2004–2005 Projektsteuerer, DB ProjektBau GmbH, dort 2005–2007 Arbeitsgebietsleiter Ingenieur- und Hochbau, 2007–2010 Hon.-Prof. für Mess- und Versuchstechnik, TU Dresden, 2010–2011 University of California San Diego, Visiting Prof., seit 2011 Gründer und Gesellschafter „Marx Krontal Partner“, 2011–2020 Prof. Massivbau, Leibniz Universität Hannover, seit 2020 DB Netz AG – Stiftungsprof. für Ingenieurbau, Inst. für Massivbau, TU Dresden.

Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Massivbau, 01062 Dresden

Maucher, Thomas

Maurermeister, Gebäudeenergieberater, BNK-Auditor, seit 2000 Leiter der Technischen Bauberatung und F & E im Ziegelwerk Bellenberg, Vorsitzender des Nachhaltigkeitsausschusses und Mitglied diverser Fachausschüsse im Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V.

Ziegelwerk Bellenberg Wiest GmbH & Co. KG, Tiefenbacherstrasse 1, 89287 Bellenberg

Meißner, Jonathan, M.Eng.

Bauingenieurstudium (Bachelor und Master) an der OTH Regensburg 2017, seit 2017 wissenschaftlicher

Mitarbeiter im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der OTH Regensburg.

Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Labor für Konstruktiven Ingenieurbau, Galgenbergstr. 30, 93053 Regensburg

Müller, Anette, Prof. Dr.-Ing. habil.

Diplomstudium Baustoffingenieurwesen HS für Architektur und Bauwesen Weimar (heute Bauhaus-Universität), Promotion und Habilitation in Zementchemie, 1995–2011 Professur Bauhaus-Universität Weimar, Gastprofessuren University of Illinois in Urbana Champaign und Universidade de Sao Paulo, seit April 2011 am IAB – Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH, Arbeitsschwerpunkt Baustoffrecycling.

IAB – Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH, Über der Nonnenwiese 1, 99428 Weimar

Muth, Cedric, B.Eng. (FH)

Ausbildung Zimmerer, Bauingenieurstudium Hochschule HAWK Hildesheim, 2021–2024 Werkstudent im Ingenieurbüro Dipl.-Ing. Götz & Ilsemann PartG mbB.

HAWK – Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst, Hildesheim/Holzminden/Göttingen, Hohnsen 2, 31134 Hildesheim

Nagler, Florian, Prof. Dipl.-Ing.

Architekturstudium Universität Kaiserslautern, Gast- und Vertretungsprofessuren an Gesamthochschule Wuppertal, Königlich Dänische Akademie Kopenhagen und HS für Technik Stuttgart, Gründungsmitglied Stiftung Baukultur, seit 2010 Mitglied der Akademie der Künste Berlin und Bayerische Akademie der Schönen Künste, seit 2010 Professor für Entwerfen und Konstruieren TU München.

Florian Nagler Architekten GmbH, Theodor-Storm-Straße 16, 81245 München

Niedermeyer, Thomas, Dipl.-Ing.

1992 Abschluss als Diplom-Ingenieur an der TU München, 1993–1994 wissenschaftlicher Angestellter Landesgewerbeanstalt Nürnberg, 1994–2000 Gruppenleiter am Institut für Erd- und Grundbau bei igi Niedermeyer Institute Westheim, 2001–2024 Fachbereichsleiter Geotechnik (Erd- und Grundbau mit Hydrogeologie/Geohydraulik) bei igi CONSULT GmbH, Westheim, Gesellschafter der igi Consult GmbH; Mitglied der DGGT.

igi CONSULT GmbH, Oberdorfstraße 12, 91747 Westheim

Nisse, Juliane, Dipl.-Ing.

Bauingenieurstudium TU Berlin, 2011–2017 wissenschaftliche Mitarbeiterin an der TU Berlin (Lehrstuhl: Bauphysik und Baukonstruktionen, Prof. Vogdt), 2018–2022 Leiterin für Normung und Anwendungstechnik und seit 2023 Leiterin für Wärmeschutz, Energieeffizienz und Nachhaltigkeit im Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V.

Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V., Reinhardtstr. 12–16, 10117 Berlin

Obergrießer, Mathias, Prof. Dr.-Ing.

2000–2007 Studium Bauingenieurwesen OTH Regensburg und FH Erfurt, 2008–2016 Promotion am Lehrstuhl CMS der TU München, 2014–2018 Projektleiter Tragwerksplanung und Produktentwicklung, seit 2018 Professor an der Fakultät Bauingenieurwesen der OTH Regensburg für „Digitales Bauen“.

Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Fakultät Bauingenieurwesen, Building Lab, Rudolf-Vogt-Str. 16, 93053 Regensburg

Pelka, Conrad, M.Sc.

Bauingenieurstudium (Bachelor) HAWK Hildesheim, Konstruktiver Ingenieurbau (Master) Leibniz Universität Hannover, seit 2018 Mitarbeiter DB Netz AG KIB Portfolio Hannover und seit 2020 wissenschaftliche Mitarbeiter am Institut für Massivbau, TU Dresden, seit 2023 Mitarbeiter DB Netz AG Grundsätze Zentrale Berlin als Experte Gewölbebrücken.

Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Massivbau, 01062 Dresden

Purkert, Benjamin, M.Sc.

Bauingenieurstudium TU Darmstadt, 2014–2015 Tragwerksplaner bei Bernhardt Ingenieure GmbH, 2015–2020 wiss. Mitarbeiter am Institut für Massivbau der TU Darmstadt, 2020–2021 Leiter Technik & Normung bei der Deutschen Gesellschaft für Mauerwerks- und Wohnungsbau e. V. (DGfM) sowie Geschäftsstellenleiter des Deutschen Ausschusses für Mauerwerk e. V., 2022–2023 Geschäftsführer des DAfM e. V.

Deutscher Ausschuss für Mauerwerk e. V. (DAfM), Kochstr. 6–7, 10969 Berlin

Raupach, Michael, Univ.-Prof. Dr.-Ing.

1993–1996 Geschäftsführer des Ing.-Büros Sasse + Schießl + Fiebrich + Raupach in den Bereichen Baustoffe und Bauwerkserhaltung. 1997–1999 Inhaber und Geschäftsführer des Ingenieurbüros Prof. Schießl + Dr. Raupach Consulting + Engineering und Geschäftsführer der S+R Sensortec GmbH. Im Jahr 2000

Berufung zum Universitätsprofessor an die RWTH Aachen University. Gegenwärtig dort Leiter des Lehrstuhls für Bauwerkserhaltung und des Instituts für Baustoffforschung, ibac. Seit 2008 Mitinhaber des Ingenieurbüros Raupach Bruns Wolff GmbH.

Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen University (ibac), Schinkelstr. 3, 52062 Aachen

Saenger, Dorothea, Dipl.-Ing.

Bauingenieurstudium an der RWTH Aachen University, 2008–2020 wiss. Mitarbeiterin und 2018–2020 Leiterin der Arbeitsgruppe Mauerwerk am Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen University (ibac). Seit 2022 Dozentin für Mauerwerk (Masterstudium) an der RWTH Aachen University.

Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen University (ibac), Schinkelstr. 3, 52062 Aachen

Schäfers, Martin, Prof. Dr.-Ing.

Ausbildung zum Tischler, Studium Bauingenieurwesen Universität Kassel, 2006–2010 Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Lehrbeauftragter an der Universität Kassel, 2010 Promotion am Fachgebiet Bauwerkserhaltung und Holzbau an der Universität Kassel, 2010–2022 Abteilungsleiter Bauanwendung und Bauphysik im Bundesverband Kalksandsteinindustrie e. V., seit 2022 Professor für Baukonstruktion und Bauphysik an der Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst in Hildesheim

HAWK – Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst, Hildesheim/Holzwinden/Göttingen, Fakultät Bauen und Erhalten, Renatastraße 11, 31134 Hildesheim

Schermer, Detleff, Prof. Dr.-Ing.

1991–1996 Studium Bauingenieurwesen TUM, 1996–1999 Dyckerhoff & Widmann AG, 1999–2004 Wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Massivbau der TUM (Prof. Zilch), Promotion 2004, seit 2004 eigenes Büro für Tragwerksplanung, seit 2010 Prüfingenieur für Massivbau, seit 2014 Professor für Bauwerke des Massivbaus und Baustatik an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg.

Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Galgenbergstraße 30, 93053 Regensburg

Schmailzl, Marc, M.A.

2019–2021 Masterstudium Architektur TU München, wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU München, Tongji-Universität in Shanghai, Doktorand und wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fakultät Bauingenieurwesen OTH Regensburg seit 2022, Beteiligung an

internationalen F&E-Projekten in den Bereichen Architektur, Bauinformatik und Robotik.

Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Fakultät Bauingenieurwesen, Building Lab, Rudolf-Vogt-Str. 16, 93053 Regensburg

Schulz, Jens-Uwe, Prof. Dipl.-Ing.

Bauingenieurstudium Universität Kassel, 1985–1993 wiss. Mitarbeiter an der Universität Kassel, 1993–1999 wiss. Mitarbeiter und Lehrbeauftragter an der TU Berlin, seit 1999 Professor für Tragwerkslehre und Entwerfen an der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Mitglied im Normungsausschuss Lehm- und Holzbaubau (NA 005-06-08), seit 2012 Gesellschafter in überregional tätigen Ingenieurgesellschaften.

Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Institut für Designstrategien (IDS), Emilianstraße 45, 32756 Detmold

Sedlbauer, Klaus, Prof. Dipl.-Phys. Dr.-Ing.

2001 Promotion an der Universität Stuttgart, 2003–2022 Leiter des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik und Professor für Konstruktive Bauphysik und Gebäudetechnik an der FH Rosenheim, 2003–2014 Professor für Bauphysik (Lehrstuhlinhaber) an der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften an der Universität Stuttgart, seit 2014 Professor für Bauphysik an der TU München (Lehrstuhlinhaber).

Technische Universität München, Lehrstuhl für Bauphysik, Arcisstr. 21, 80333 München

Stolarski, Gregor, Dipl.-Ing.

Bauingenieurstudium TU Danzig, Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachbereich Bauingenieurwesen GhK der Universität Kassel, seit 1993 Bausachverständiger bei der LGA Bayern, Experte für historische Bauwerke und Baumaterialien.

LGA Bautechnik GmbH, Tillystraße 2, 90431 Nürnberg

Talke, Mai-Khanh, M.Sc.

Studium Bauingenieurwesen an der TU München, bis 2016 Projektleiterin bei Wolfgang Sorge Ingenieurbüro für Bauphysik in Nürnberg, bis 2018 Forschung an der TH Augsburg zur bauphysikalischen Optimierung von emersen Outdoor-Photobioreaktoren an Gebäudefassaden, seit 2016 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Bauphysik der TU München.

Technische Universität München, Lehrstuhl für Bauphysik, Arcisstr. 21, 80333 München

Tollemer, Frédéric, B. Eng (FH)

Ausbildung Tischler, Bauingenieurstudium HAWK Hildesheim/Holzminden/Göttingen, seit 2023 Werkstudent im Ingenieurbüro Dietze Akustik und Bauphysik

HAWK – Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst, Hildesheim/Holzminden/Göttingen, Hohnsen 2, 31134 Hildesheim

Waigand, Simon, M.Sc.

Architekturstudium an der HS Bochum und Wismar, 2014–2016 Lehrauftrag HS Bochum, 2014–2019 Projektleitung ACMS Architekten GmbH, 2020–2023 Assoziierter Partner ACMS Architekten GmbH, seit 2024 Geschäftsführender Gesellschafter ACMS Architekten GmbH.

ACMS Architekten GmbH, Friedrich-Ebert-Str. 55, 42103 Wuppertal

Wigger, Heinrich, Prof. Dr.-Ing.

Bauingenieurstudium FH Rosenheim und Hildesheim, Uni Bochum und Hannover, 1986–1987 Mitarbeiter Institut für Fenstertechnik e. V., 1987–1992 freiberufl. Tätigkeiten in Ingenieurbüros, 1992–2002 wiss. Mitarbeiter TU Braunschweig, Materialprüfanstalt für das Bauwesen, 2000 Promotion, seit 2002 Jade Hochschule, Fachgebiet Baustofftechnologie, Präsidiumsmitglied der Wiss.-Techn. AG für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege (WTA) e. V. und Vorstand des Kompetenzzentrums Bauen und Energie (KoBE) e. V., Geschäftsführung Institut für Materialprüfung und Bauwerkserhaltung GmbH

Jade Hochschule, Institut für Materialwissenschaften und Baukonstruktionen im Bauwesen (IMK), Zeughausstraße 15, 26121 Oldenburg

Wilfinger, Martin, M.Sc.

2000–2004 Ausbildung zum Bauzeichner Stadtwerke Hartberg, 2004–2011 Bautechniker und Bauleiter, 2011–2012 Hochschulzugangsberechtigung an der TU Graz, 2012–2018 Studium Architektur und Städtebau an der TU Darmstadt, 2018–2021 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Darmstadt/Bauingenieurwesen, seit 2023 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der HS Karlsruhe.

Hochschule Karlsruhe, Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe

Winkels, Bernd, Dipl.-Ing.

Bauingenieurstudium an der RWTH Aachen University, 2013–2024 wiss. Mitarbeiter am Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen University (ibac).

Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen University (ibac), Schinkelstr. 3, 52062 Aachen

Zander, Richard, M.Sc.

2014–2020 Bauingenieurstudium an der Hochschule f. Technik und Wirtschaft Berlin, seit 2021 im Referat Mauerwerksbau, Erd- und Grundbau, Bauwerksabdichtungen des Deutschen Instituts für Bautechnik.

Deutsches Institut für Bautechnik,
Kolonnenstraße 30B, 10829 Berlin

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Eric Brehm
Hochschule Karlsruhe
Technik und Wirtschaft
Moltkestraße 30
76133 Karlsruhe

Prof. Dr.-Ing. Detleff Schermer
Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg
Galgenbergstraße 30
93053 Regensburg

Verlag

Ernst & Sohn GmbH
Rotherstraße 21, 10245 Berlin
Tel. (030) 47031-200
E-Mail: info@ernst-und-sohn.de
www.ernst-und-sohn.de

A Normen und Baustoffe

**A 1 Eigenschaften und Eigenschaftswerte von
Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk**

Michael Raupach, Dorothea Saenger und Bernd Winkels

Mauerwerk-Kalender 2025: Aspekte der Nachhaltigkeit.

Herausgegeben von Detleff Schermer und Eric Brehm.

© 2025 Ernst & Sohn GmbH. Published 2025 by Ernst & Sohn GmbH.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3	6	Mauerwerk	10
2	Mauersteine	3	6.1	Allgemeines	10
2.1	Festigkeitseigenschaften	3	6.2	Festigkeitseigenschaften	10
2.1.1	Druckfestigkeit in Steinhöhe	3	6.2.1	Druckfestigkeit	10
2.1.2	Druckfestigkeit in Steinlänge und -breite	3	6.2.2	Längsdruckfestigkeit	11
2.1.3	Zug- und Spaltzugfestigkeit	3	6.2.3	Zugfestigkeit	11
2.2	Verformungseigenschaften	4	6.2.4	Biegezugfestigkeit	13
2.2.1	Elastizitätsmoduln	4	6.2.5	Schubfestigkeit	14
2.2.2	Querdehnungsmodul, Querdehnzahl	4	6.3	Verformungseigenschaften	14
2.3	Kapillare Wasseraufnahme	5	6.3.1	Elastizitätsmoduln	14
3	Mauermörtel	6	6.3.2	Feuchtedehnung, Kriechen, Wärmedehnung	15
3.1	Festigkeitseigenschaften	6		Literatur	15
3.1.1	Druckfestigkeit	6			
3.1.2	Zugfestigkeit	6			
3.2	Längs- und Querdehnungsmoduln	6			
4	Mauermörtel im Mauerwerk	6			
5	Verbund zwischen Mauerstein und Mauermörtel	8			
5.1	Allgemeines	8			
5.2	Haftscherfestigkeit	8			
5.3	Haftzug- und Biegehaftzugfestigkeit	9			

1 Einleitung

Der vorliegende Beitrag wurde von Dr. Peter Schubert[†] am Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen University (ibac) ab dem Jahr 1989 verfasst und ab dem Jahr 2013 durch Prof. Wolfgang Brameshuber[†] fortgeführt. Die Autoren haben ihn neu aufbereitet.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die wesentlichen Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk jeweils kurz hinsichtlich Bedeutung und Prüfverfahren beschrieben und – soweit möglich und sinnvoll – Eigenschaftswerte angegeben. Diese beruhen auf Auswertungen von Daten tatsächlich geprüfter Materialien und Materialkombinationen, entstanden in zahlreichen Forschungsvorhaben am ibac bzw. zusammengetragen im Rahmen ergänzender Literaturrecherchen.

Es wird deutlich, dass aufgrund der vielfältigen Materialien und Kombinationsmöglichkeiten eine große Bandbreite an Eigenschaftswerten entsteht. In Normen und allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen werden anzusetzende Eigenschaftswerte bzw. Mindesteigenschaftswerte festgelegt. Die hier aufgeführten Eigenschaftswerte gehen über Normanforderungen hinaus und sollen bei gesonderten Fragestellungen helfen, eine fachlich fundierte Antwort zu finden, wie z. B. bei der Beurteilung der Rissicherheit von Mauerwerk (Gebrauchstauglichkeitsnachweis), bei einer Schadensdiagnose oder bei genaueren Nachweisen für die Tragfähigkeit von Bauwerken. In Grenzfällen können durch einen ingenieurmäßig überdachten Ansatz geeigneter Kennwerte vorhandene Baustoffreserven ausgenutzt werden.

2 Mauersteine

2.1 Festigkeitseigenschaften

2.1.1 Druckfestigkeit in Steinhöhe

Die Druckfestigkeit in Richtung Steinhöhe ist eine der wesentlichen Kenngrößen von Mauersteinen. Die Prüfung der Druckfestigkeit kann nach DIN EN 772-1 [16] an ganzen Mauersteinen erfolgen.

2.1.2 Druckfestigkeit in Steinlänge und -breite

Bei einigen Beanspruchungen von Mauerwerkbauteilen bzw. Bauteilbereichen, wie Scheibenschub, Biegung (Biegedruckzone) oder Teilflächenbelastung senkrecht zur Wandebene, können die Mauersteine in Richtung Steinlänge bzw. -breite auf Druck beansprucht werden. Die Prüfung der Druckfestigkeit in diese Richtungen kann in Anlehnung an DIN EN 772-1 [16] an ganzen Mauersteinen erfolgen.

Die Druckfestigkeit in Richtung Steinlänge und -breite ist im Allgemeinen, insbesondere bei Lochsteinen, kleiner als in Richtung Steinhöhe. Vollsteine weisen herstellungsbedingt (Pressen, Strangpressen, Rüttel-

verdichtung oder Treiben) eine leichte Anisotropie auf. Die Form der Mauersteine hat ebenfalls einen großen Einfluss auf die Prüfwerte der Steindruckfestigkeit. Bei Lochsteinen resultieren kleinere Druckfestigkeitswerte aus dem Lochanteil, der Form der Lochung, der Lochanordnung etc.

Anhaltswerte von Druckfestigkeitsverhältnissen Steinlänge/Steinhöhe sind in [1] angegeben. Aus [1] lassen sich folgende Zusammenhänge ableiten: Für Hochlochziegel und Leichtbetonhohlblöcke kann erwartungsgemäß kein Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit in Steinhöhe und der Druckfestigkeit in Steinlänge festgestellt werden. Für Porenbetonsteine ergibt sich mit zunehmender Steindruckfestigkeit eine Abnahme des Druckfestigkeitsverhältnisses Steinlänge/Steinhöhe. Bei Mauerziegeln sowie Kalksandvoll- und -lochsteinen bleibt dagegen das Druckfestigkeitsverhältnis Steinlänge/Steinhöhe mit zunehmender Steindruckfestigkeit weitestgehend konstant.

2.1.3 Zug- und Spaltzugfestigkeit

Die Zugfestigkeit ist ebenfalls eine wesentliche Kenngröße von Mauersteinen. Die maßgebende Richtung hängt von der ausgeübten Mauerwerkbeanspruchung ab. Aus einer Druckbeanspruchung von Mauerwerk resultieren – aufgrund des entstehenden mehraxialen Spannungszustands – Zugspannungen im Mauerstein in Richtung Steinbreite und -länge, während durch eine Schub- bzw. Biegebeanspruchung von Mauerwerk Zugspannungen im Mauerstein in Richtung Steinhöhe bzw. -länge hervorgerufen werden.

Die Prüfung der Zugfestigkeit ist nicht normativ geregelt. Je nach Anisotropie, Form und Lochung unterscheiden sich i. d. R. auch die Zugfestigkeitswerte richtungsabhängig.

Tabelle 1 gibt den Stand der Auswertung nach [2] wieder. Die in Richtung Steinlänge bestimmten Zugfestigkeitswerte sind als Verhältniswerte bezogen auf die in Richtung Steinhöhe geprüften Druckfestigkeitswerte angegeben. In Tabelle 1 sind zudem rechnerische Steinzugfestigkeitswerte bezogen auf die umgerechnete mittlere Steindruckfestigkeit nach DIN EN 1996-1-1/NA [17] aufgeführt. Bei diesen Werten handelt es sich um charakteristische Werte.

Mithilfe der angegebenen Verhältniswerte $f_{bt,cal}/f_{st}$ kann die rechnerische Steinzugfestigkeit für die Ermittlung der charakteristischen Biegezug- und Schubfestigkeit bei Steinzugversagen abgeschätzt werden, vgl. Abschnitte 6.2.4 und 6.2.5. Für Porenbetonsteine wird der Verhältniswert in Abhängigkeit der Steindruckfestigkeit angegeben. Der in der Berechnungsformel enthaltene „charakteristische“ Verhältniswert Steinzug-/Steindruckfestigkeit von 0,082 ist das Ergebnis einer Literaturlauswertung.

Für die Herleitung des Verhältniswertes wurden 26 Versuche an Porenbeton-Plansteinen mit unterschiedlichen Abmessungen herangezogen. Der Faktor $1/1,25 = 0,8$ resultiert aus der Umrechnung der Steindruckfestigkeit in die mittlere Mindeststeindruckfestigkeit

Tabelle 1. Mauersteine; Verhältniswerte Steinzug-/Steindruckfestigkeit (nach [17] bzw. [2])

Steinart/-sorte	$f_{bt,cal}/f_{st}$	Steinart/-sorte	$\beta_{z,l}/\beta_{D,st,prüf}$		
			Mittelwert	Wertebereich	n
Hohlblocksteine	0,020	Hbl 2	0,09	0,07 ... 0,13	5
		Hbl ≥ 4	0,07	0,06 ... 0,10	3
		Hbn	0,08	0,06 ... 0,09	2
Hochlochsteine und Steine mit Grifföchern (GL) oder Griffaschen	0,026	HLz	0,03	0,013 ... 0,041	20
		LHLz	0,01	0,002 ... 0,019	54
		KS L	0,035	0,026 ... 0,055	19
		KS (GL)	0,045	0,027 ... 0,065	24
Vollsteine ohne Grifflöcher oder Griffaschen	0,032	KS	0,063	0,039 ... 0,081	18
		Mz	0,04	0,01 ... 0,08	9
		V/Vbl 2	0,11	0,06 ... 0,18	16
		V/Vbl ≥ 4	0,07	0,05 ... 0,09	7
Porenbetonsteine	$\frac{0,082}{1,25} \cdot \frac{1}{0,7 + \left(\frac{f_{st}}{25}\right)^{0,5}}$ 1)	PB/PP 2	0,18	0,13 ... 0,20	7
		PB/PP 4, 6, 8	0,11	0,09 ... 0,13	8

1) Gleichung gilt für Porenbetonplansteine der Länge ≥ 498 mm und der Höhe ≥ 248 mm

$f_{bt,cal}$ angenommene rechnerische Steinlängszugfestigkeit nach [17] in N/mm²

f_{st} umgerechnete mittlere Steindruckfestigkeit nach [17] in N/mm²

$\beta_{z,l}$ Prüfwert der Steinlängszugfestigkeit in N/mm²

$\beta_{D,st,prüf}$ Prüfwert der Steindruckfestigkeit in Richtung Steinhöhe (ohne Formfaktor) in N/mm²

n Anzahl der Versuchswerte

tigkeit f_{st} . Der Faktor $1/(0,7 + (f_{st}/25)^{0,5})$ stellt eine Abminderung von $f_{bt,cal}$ für Steine mit höheren Festigkeiten (größer als Steinfestigkeitsklasse 2) dar. Er ist ungefähr 1 für die Steinfestigkeitsklasse 2 und nimmt mit höheren Festigkeitsklassen ab. Um die Verhältniswerte $\beta_{z,l}/\beta_{D,st,prüf}$ für den Nachweis der Biegezug- und Schubtragfähigkeit ansetzen zu können, sind die Prüfwerte jeweils noch in charakteristische Werte umzurechnen. In Grenzfällen können durch Ansatz dieser Werte ggf. vorhandene Baustoffreserven ausgenutzt und höhere Biegezug- bzw. Schubfestigkeiten erzielt werden.

In bestimmten Fällen kann das Heranziehen der Spaltzugfestigkeit zur Abschätzung der Zugfestigkeit von Vollsteinen von Vorteil sein. Als Anhaltswert kann näherungsweise ein Verhältniswert Spaltzugfestigkeit $\beta_{sz,l}$ zu Zugfestigkeit $\beta_{z,l}$ zwischen 1,1 und 1,3 angenommen werden, vgl. [1].

2.2 Verformungseigenschaften

2.2.1 Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul gibt das Verhältnis der Spannung zur korrespondierenden elastischen Dehnung an und ist allgemein bei Mauerwerk als Sekantenmodul bei einem Drittel der Höchstspannung unter einmaliger Belastung definiert. Der Druck-E-Modul von Mauersteinen wird im Druckversuch in Steinhöhe er-

mittelt. Der Zug-E-Modul von Mauersteinen wird in einaxialen Zugversuchen, meist in Steinlänge, bestimmt.

Für eine erste Abschätzung des Druck-E-Moduls von Kalksand- und Porenbetonsteinen können nach [1] die in Tabelle 2 angegebenen Regressionsgleichungen angesetzt werden. Zusammenhänge zwischen dem Zug-E-Modul und der Steinzugfestigkeit bei einer Zugbeanspruchung in Steinlänge bzw. zwischen dem Zug-E-Modul und dem Druck-E-Modul werden in [1] angegeben. Diese sind ebenfalls in Tabelle 2 zusammengestellt.

2.2.2 Querdehnungsmodul, Querdehnzahl

Zur Bestimmung des Querdehnungsmoduls von Mauersteinen unter einer Druckbeanspruchung in Richtung Steinhöhe wird die Spannung auf die zugehörige, quer zur Belastungsrichtung, d. h. in Richtung Steinlänge bzw. -breite, gemessene Dehnung bezogen.

Diese Kenngröße ist von maßgebender Bedeutung für die Drucktragfähigkeit von Mauerwerk. Bei einem ungünstigen Verhältnis der Querdehnungsmoduln von Mauermörtel und Mauerstein wird der Mauerstein stärker auf Zug beansprucht, was die Druckfestigkeit des Mauerwerks reduziert. Werte für den Querdehnungsmodul von Mauersteinen sind in Tabelle 3 angegeben.

Tabelle 2. Mauersteine; Regressionsgleichungen zur Bestimmung der Elastizitätsmoduln unter Druck- sowie Zugbeanspruchung in Abhängigkeit der Steindruck- bzw. -zugfestigkeit bzw. des Druck-E-Moduls für die jeweilige Belastungsrichtung (aus [1])

Steinart	Druck-E-Modul (Steinhöhe)				Zug-E-Modul (Steinlänge)			
	E_D	Prüfkörper	n (n_i)	Best.	$E_{Z,l}$	Prüfkörper	n (n_i)	Best.
Kalksandsteine	$230 \cdot \beta_{D,st}$	Prismen	(12)	–	$5800 \cdot \beta_{Z,l}^{0,73}$	Prismen	13	0,95
Leichtbetonsteine	–	–	–	–	$6000 \cdot \beta_{Z,l}$	Prismen	(35)	0,77
Porenbetonsteine	$700 \cdot \beta_{D,st}^{0,74}$	Zylinder	18	0,83	$3180 \cdot \beta_{Z,l}$	Zylinder/Prismen	21	0,78
					$1,01 \cdot E_D$	Zylinder	11	0,93

E_D Druck-E-Modul in Richtung Steinhöhe in N/mm^2
 $E_{Z,l}$ Zug-E-Modul in Richtung Steinlänge in N/mm^2
 $\beta_{D,st}$ Mauersteindruckfestigkeit in Richtung Steinhöhe in N/mm^2

$\beta_{Z,l}$ Mauersteinzugfestigkeit in Richtung Steinlänge in N/mm^2
n Anzahl der Mittelwerte
(n_i) Anzahl der Einzelwerte
Best. Bestimmtheitsmaß der gewählten Regression

Tabelle 3. Mauersteine; Querdehnungsmodul und Querdehnzahl (Wertebereiche aus [1] und [3])

Steinart/-sorte	Festigkeitsklasse	Querdehnungsmodul E_q	Querdehnzahl μ
		$10^3 N/mm^2$	–
Hbl, Vbl	2 ... 6	3,6 ... 20 (8)	0,08 ... 0,11
PB, PP	2 ... 6	5,6 ... 25 (7)	0,11 ... 0,15
KS, KS L, KS Hbl	8 ... 28	12 ... 100 (12)	0,12
HLz	6	2,7 ... 40 (4)	0,11 ... 0,20
	8	12 ... 59 (8)	
	12	31 ... 55 (4)	
	48	133 (–)	

Werte in Klammern: Anzahl der Versuchswerte

Neben dem E-Modul spielt auch die Querdehnzahl μ der Mauersteine in Bezug auf die Mauerwerkdruckfestigkeit eine wesentliche Rolle. Die Querdehnzahl wird im Druckspannungszustand als Absolutwert aus dem Verhältnis von Querdehnung zu Längsdehnung bei einem Drittel der Höchstspannung berechnet. Wertebereiche für die Querdehnzahl verschiedener Mauersteine sind ebenfalls in Tabelle 3 aufgeführt.

2.3 Kapillare Wasseraufnahme

Die Wasseraufnahmefähigkeit von Mauersteinen kann durch die kapillare Wasseraufnahme bzw. den Wasseraufnahmekoeffizienten ω gekennzeichnet werden. Diese sind wichtige Kenngrößen für die Beurteilung des Wasserabtausens aus dem Fugenmörtel durch den Mauerstein, für die Wasseraufnahme von Sichtflächen bei Beregnung, vor allem bei Schlagregen, sowie für die Beurteilung des Austrocknungsverhaltens. Werden Mauersteine mit schneller Wasseraufsaugcharakteristik – gekennzeichnet durch hohe Wasseraufnahmekoeffizienten ω – vor dem Vermörteln nicht vorgeätzt, so kann dem Mörtel nach dem Vermauern zu viel Wasser entzogen werden. Mögliche Folgen sind ei-

Tabelle 4. Mauersteine; Wasseraufnahmekoeffizient (Werte bzw. Wertebereiche aus [4], ergänzt um eigene Versuchsergebnisse)

Steinart/-sorte	Wasseraufnahmekoeffizient ω		
	Mittlerer Wert	Wertebereich	n
	$kg/(m^2 h^{0,5})$		
Kalksand-Referenzsteine (KS-Ref)	2,7	2,4 ... 2,9	3
Kalksandsteine (KS)	2,0	1,7 ... 2,1	3
Hochlochziegel (HLz)	7,4	7,2 ... 7,5	3
Mauerziegel (VMz)	18,9	18,6; 19,1	2
Leichtbetonsteine (V)	1,0	1,0; 1,0	2
Betonsteine (Vn)	1,5	1,2; 1,9	2
Porenbeton-Plansteine PP2	2,5	2,3 ... 2,7	6
Porenbeton-Plansteine PP4	2,1	2,0 ... 2,2	5

n: Anzahl der Einzelwerte

ne zu geringe Verbundfestigkeit zwischen Mauermörtel und Mauerstein (Haftscher- und Haftzugfestigkeit) und/oder eine zu geringe Mörteldruckfestigkeit in der Fuge. Dies trifft stets für Mauersteine mit einem hohen Anteil an kleinen Kapillarporen und geringem Feuchtegehalt vor dem Vermörteln zu.

Die kapillare Wasseraufnahme wird i. d. R. nach DIN EN ISO 15148 [18] geprüft. Ausgehend vom getrockneten Zustand wird bei ständigem Wasserkontakt der Saugfläche der zeitliche Verlauf der Wasseraufnahme ermittelt. Dieser ist bei reinen kapillaren Saugvorgängen im Wurzelmaßstab annähernd linear. Die Steigung entspricht dem Wasseraufnahmekoeffizienten ω in $kg/(m^2 h^{0,5})$. Tabelle 4 enthält ω -Werte von Mauersteinen nach [4], ergänzt um eigene Versuchsergebnisse. In Bild 1 wird der an verschiedenen Mauersteinen bestimmte zeitliche Verlauf der kapillaren Wasseraufnahme dargestellt. Es wird ersichtlich, dass Mauerziegel in

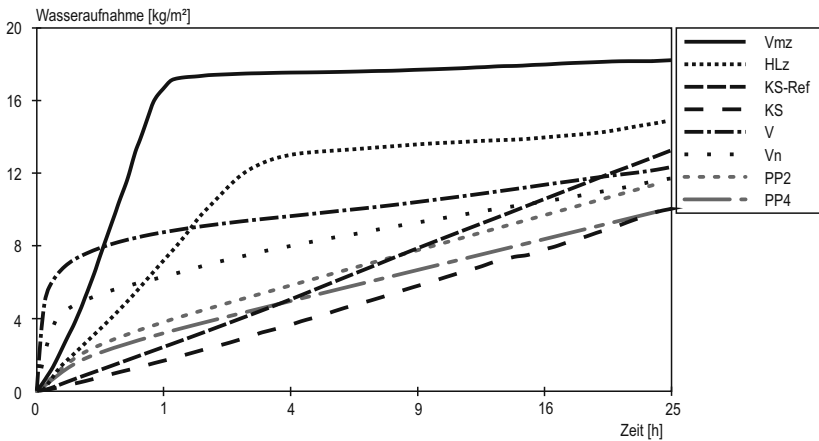


Bild 1. Zeitlicher Verlauf der Wasseraufnahme ausgewählter Mauersteine (nach [4], ergänzt um eigene Versuchsergebnisse)

kürzester Zeit Wasser aufnehmen, während beispielsweise Kalksandsteine über einen langen Zeitraum kontinuierlich saugen.

3 Mauermörtel

3.1 Festigkeitseigenschaften

3.1.1 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit von Mauermörtel wird an Normprismen nach DIN EN 1015-11 [19] bestimmt. Wertebereiche für die Druckfestigkeit von Mauermörtel nach [1] sind in Tabelle 5 gegeben.

3.1.2 Zugfestigkeit

Die Prüfung der Zugfestigkeit von Mauermörtel ist nicht normativ geregelt. Für Normalmauermörtel ergab sich nach [1] die in Tabelle 5 angegebene Beziehung zwischen Zug- und Druckfestigkeit.

3.2 Längs- und Querdehnungsmoduln

Der Längsdehnungsmodul von Mauermörtel wird im statischen Druckversuch an Mörtelgroßprismen nach DIN 18555-4 [20] ermittelt. Der Querdehnungsmodul von Mauermörtel wird im Allgemeinen gemeinsam mit dem Längsdehnungsmodul bestimmt. Dabei wird die Druckspannung auf die zugehörige gemessene Querdehnung bezogen. Ist der Querdehnungsmodul des Mauermörtels deutlich kleiner als der des Mauersteins, so entstehen durch die größere Querverformbarkeit des Lagerfugenmörtels zusätzliche Querkzugspannungen im Stein, wodurch die Mauerwerkdruckfestigkeit verringert werden kann. Dies ist besonders bei leichten Leichtmauermörteln mit sehr verformbaren Gesteinskörnungen, z. B. mineralische Perlite, der Fall.

In Tabelle 5 sind – differenziert nach Mörtelart – Beziehungen zwischen dem Längsdehnungsmodul E und der Normdruckfestigkeit β_D sowie Wertebereiche für Querdehnungsmoduln von Mauermörteln nach [1] zusammengestellt.

4 Mauermörtel im Mauerwerk

Die Eigenschaften von Mauermörtel werden durch den Kontakt mit den Mauersteinen in mehr oder weniger starkem Umfang beeinflusst. Abhängig von der Mauersteinart und dem Feuchtegehalt des Mauersteins beim Vermauern wird dem Mauermörtel mehr oder weniger Wasser über einen kurzen oder langen Zeitraum entzogen, vgl. Abschnitt 2.3. Dieser Effekt kann sich festigkeitsmindernd oder -steigernd auswirken. Festigkeitssteigerungen ergeben sich nach [5] dann, wenn abgesaugtes Wasser zu einer wirkungsvollen Senkung des w/z-Wertes und damit zu einer Verdichtung des Gefüges führt. Dagegen ergeben sich Festigkeitsminderungen, wenn in der Fuge infolge eines zu hohen Wasserentzugs die für eine vollständige Hydratation erforderliche Wassermenge nicht mehr zur Verfügung steht.

Diese Veränderung der Eigenschaften des Mörtels in Kontakt zum Mauerstein beeinflusst die Festigkeitseigenschaften von Mauerwerk. Insofern können Eigenschaftswerte, die an beeinflusstem Mörtel ermittelt werden, für weiterführende Analysen und Abschätzungen verwendet werden. Die Fugendruckfestigkeit könnte beispielsweise bei neuen Ansätzen für die rechnerische Bestimmung der Druckfestigkeit von Mauerwerk mit Normal- und Leichtmauermörtel berücksichtigt werden.

Die Bestimmung der Fugendruckfestigkeit erfolgt nach DIN 18555-9 [21].