

2019



MAUERWERK KALENDER



Bemessung
Bauwerkserhaltung
Schallschutz

2019

MAUERWERK KALENDER

Bemessung
Bauwerkserhaltung
Schallschutz

Herausgegeben von
Wolfram Jäger, Dresden

44. Jahrgang

Hinweis des Verlages

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

Titelbild: Kloster Hegne, Bodensee, Architekten Lederer, Ragnarsóttir, Oei (Foto: Zooey Braun)

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.

© 2019 Wilhelm Ernst & Sohn,

Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG,
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
Printed in the Federal Republic of Germany.
Gedruckt auf säurefreiem Papier.

ISSN 0170-4958

Print ISBN 978-3-433-03251-0

ePDF ISBN 978-3-433-60977-4

ePub ISBN 978-3-433-60978-1

oBook ISBN 978-3-433-60972-9

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

der Mauerwerk-Kalender 2019 beinhaltet neben weiteren Themen die Schwerpunkte Bemessung, Bauwerkserhaltung sowie Schallschutz. Insbesondere bei Änderungen in den technischen Regelungen ist es wichtig, verlässliche Quellen zu haben, die aktuell informieren und Hilfestellung bei der täglichen praktischen Anwendung geben. In der vor Ihnen liegenden Ausgabe betrifft das insbesondere den Schallschutz. Die Neuveröffentlichung der Norm erstreckte sich über einen längeren Zeitraum, deshalb freuen wir uns besonders, dass wir Ihnen diesen Beitrag nunmehr zur Verfügung stellen können.

Abwechslung und interessante Lektüre – auch über den reinen Mauerwerk-Fachteil hinaus – bieten immer wieder die Abhandlungen zu historischen Bauwerken, da dies doch nicht alltägliche Projekte sind, über die es sich zu berichten lohnt.

Der Mauerwerk-Kalender als jährlich erscheinendes Standardwerk hält sicher wieder für jede Interessenslage passende Informationen bereit:

– Im Bereich *Baustoffe* • *Bauprodukte* finden Sie den Beitrag über die Eigenschaftswerte von Mauersteinen, Mauer Mörtel, Mauerwerk und Putzen mit Angabe der zugrunde liegenden Quellen. Der Beitrag über den Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung bzw. mit allgemeiner Bauartgenehmigung umfasst in dieser Ausgabe wieder die erteilten Zulassungen/Bauartgenehmigungen des Fachgebietes als vollständige aktuelle Übersicht. Der daran anschließende Aufsatz beschäftigt sich insbesondere mit experimentellen und numerischen Untersuchungen zum Drucktragverhalten von Mauerwerk. Ziel der umfangreichen Forschungen war, das Drucktragverhalten von Mauerwerk mithilfe numerischer Berechnungsmethoden zutreffend vorherbestimmen zu können.

– Die Abteilung *Konstruktion* • *Bauausführung* • *Bauwerkserhaltung* beginnt mit einem Bericht zu den statisch-konstruktiven Sicherungsarbeiten am westlichen Iwan der UNESCO-Welterbestätte Takht-e Soleyman im Iran. Schwerpunktmäßig wird bei der Schilderung der Sicherungsarbeiten auf die Herstellung von Hochbrandgips vor Ort im Feldofen und dessen Verwendung, die Entwicklung eines Injektionsmörtels auf der Grundlage des lokal hergestellten Gipses, Versuche an Testmauern und die eigentlichen Ertüchtigungsmaßnahmen eingegangen. Ein weiterer Beitrag zum Thema Bauwerkserhaltung und Sanierung schließt sich mit einem Bericht zum derzeitigen Stand der Bauerhaltung des Doms St. Marien in Zwickau an. Als Fortsetzung des Aufsatzes im Mauerwerk-Kalender 2017 zu diesem Thema steht nun die Ertüchtigung der Chor Pfeiler M1 und M2 in den Jahren 2016 bis 2018 im Vordergrund. Tragverhalten und Tragfähigkeit von In-

jektionsdübeln werden in einem Beitrag für den speziellen Fall von Lochsteinen unter Berücksichtigung der Steingeometrie behandelt und ein Berechnungsmodell für Dübel unter Zug- und Querkzugbelastung in Lochsteinen vorgestellt, mit dessen Hilfe die Bruchlasten anhand der Steingeometrie abgeschätzt werden können.

– Der Bereich *Bemessung* berichtet von einem aktuellen Forschungsvorhaben zur Bewertung der Tragfähigkeit von Injektionsdübeln in Mauerwerk im Rahmen von Baustellenversuchen, in welchem der Einfluss einer Vorbelastung sowie der Einfluss eines geringen Abstützdurchmessers auf das Tragverhalten von Dübeln in Mauerwerk näher untersucht worden ist. Die Ergebnisse sind in einer Technischen Regel „Durchführung und Auswertung von Versuchen am Bau“ des DIBt ergänzt und die Durchführung von Versuchen am Bau besser beschrieben worden. Ein weiterer Beitrag beschäftigt sich mit der Tragfähigkeit ausfachender Mauerwerkswände unter Berücksichtigung der verformungsbasierten Membranwirkung und stellt ein nichtlineares Berechnungsmodell zur wirklichkeitsnahen Ermittlung der aufnehmbaren Horizontallast unbewehrter ausfachender einachsiger gespannter Mauerwerkswände, in welchen durch definierte Lagerungsbedingungen vertikale Normalkräfte – sogenannte Membrandruckkräfte – entstehen, vor. Diese Membranwirkung wird in den bestehenden Normen und Veröffentlichungen sowie gegenwärtigen Untersuchungen lediglich rudimentär betrachtet. Der im Aufsatz über Aussteifungssysteme mit Mauerwerksscheiben vorgestellte Vergleich von zwei unterschiedlichen Berechnungsmethoden zeigt, dass bei geeigneter Modellbildung und Lastverteilung eine günstige Wechselwirkung zwischen den einzelnen Scheiben einer Aussteifungskonstruktion aus Mauerwerkswänden nachgewiesen werden kann.

– Die Abteilung *Bauphysik* • *Brandschutz* geht in einem umfangreichen Beitrag auf den Schallschutz im Mauerwerksbau ein. Sowohl die Grundlagen werden erläutert als auch die Regelungen bzw. Neuerungen der neuen DIN 4109 sowie andere Regelwerke für den baulichen Schallschutz vorgestellt. Es schließt sich ein Aufsatz über den vereinfachten Nachweis des Tauwasserschutzes an, ergänzt durch vollständig durchgerechnete Beispiele einer massiven Flachdach- und einer hölzernen Außenwandkonstruktion. Der Vergleich von konventionellen und aerogelhaltigen Dämmstoffen für die Innendämmung von historischem Mauerwerk ergänzt das Kapitel.

– Im Bereich *Normen* • *Zulassungen* • *Regelwerk* steht wie gewohnt ein Überblick über die aktuell geltenden Technischen Regeln für den Mauerwerksbau sowie der Zugriff auf sämtliche zulassungsbedürftige Neuentwicklungen des Fachgebietes in tabellarischen Über-

sichten, gegliedert nach dem Einsatzgebiet der jeweiligen Produkte, zur Verfügung. Dem Verzeichnis folgt eine Liste, geordnet nach Zulassungsnummern und mit Verweisen auf die entsprechenden Seiten dieses Beitrags sowie auf diejenigen des Beitrags A II „Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung bzw. mit allgemeiner Bauartgenehmigung“ aus dem Bereich *Baustoffe • Bauprodukte*.

– Die Abteilung *Forschung* schließt mit dem jährlichen Überblick über die aktuelle Forschungssituation im Mauerwerksbau den Kalender ab.

Ich danke allen Mitwirkenden für ihre tatkräftige Unterstützung bei der aktuellen Ausgabe des Mauerwerk-Kalenders und wünsche unseren verehrten Leserinnen und Lesern eine aufschlussreiche Lektüre zu spannenden Themen. Mögen die Erkenntnisse des vorliegenden 44. Jahrgangs Verwendung finden und Sie in der täglichen Arbeit mit Mauerwerk in Theorie und Praxis motivieren.

Dresden,
im Januar 2019

Wolfram Jäger
ji@jaeger-ingenieure.de

Inhaltsübersicht

A Baustoffe - Bauprodukte

- I Eigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen 3
Wolfgang Brameshuber†, Aachen
- II Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (abZ)
bzw. mit allgemeiner Bauartgenehmigung (aBg) 31
Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin
- III Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Drucktragverhalten von Mauerwerk 265
Markus Graubohm, Aachen

B Konstruktion - Bauausführung - Bauwerkserhaltung

- I Statisch-konstruktive Sicherungsarbeiten am westlichen Iwan der UNESCO-Welterbestätte Takht-e Soleyman,
Iran 295
Toralf Burkert, Weimar, Christian Fuchs, Berlin und Robert Sobott, Naumburg
- II Ev.-Luth. Hauptpfarrkirche Zwickaus – seit 1935 Dom St. Marien Zwickau 333
Toralf Burkert, Weimar und Peter Schöps, Radebeul
- III Tragverhalten und Tragfähigkeit von Injektionsdübeln in Lochsteinen unter Berücksichtigung der Steingeometrie 379
Marina Stipetic und Jan Hofmann, Stuttgart

C Bemessung

- I Forschungsvorhaben zur Bewertung der Tragfähigkeit von Injektionsdübeln in Mauerwerk im Rahmen
von Baustellenversuchen 413
Rainer Becker, Dortmund, Jan Hofmann, Stuttgart, Catherina Thiele und Florian Wendel, Kaiserslautern
- II Tragfähigkeit ausfachender Mauerwerkswände unter Berücksichtigung der verformungsbasierten
Membranwirkung 431
Michael Schmitt, Lauterbach und Carl-Alexander Graubner, Darmstadt
- III Aussteifungssysteme mit Mauerwerksscheiben 461
Werner Seim, Kassel und Kai Sommerlade, Lohfelden

D Bauphysik - Brandschutz

- I Schallschutz im Mauerwerksbau 481
Heinz-Martin Fischer und Martin Schneider, Stuttgart
- II Vereinfachter Nachweis des Tauwasserschutzes nach DIN 4108-3:2018 547
Helmut Marquardt, Buxtehude
- III Innendämmung eines historischen Mauerwerks mit konventionellen und aerogelhaltigen Dämmstoffen –
Eine hygrothermische Analyse 591
Karim Ghazi Wakili und Thomas Stahl, Winterthur, Schweiz

E Normen - Zulassungen - Regelwerk

- I Geltende Technische Regeln für den Mauerwerksbau (Deutsche, Europäische und Internationale Normen) (Stand 31.05.2018) 611
Peter Rauh, Berlin und Carola Hauschild, Radebeul
- II Verzeichnis der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen/allgemeinen Bauartgenehmigungen für den Mauerwerksbau (Stand 31.05.2018) 631
Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin
- III Die Anpassung des nationalen Bauproduktenrechts nach dem Urteil des EuGH vom 16. Oktober 2014 765
Tina Gerschler, Berlin

F Forschung

- I Übersicht über abgeschlossene und laufende Forschungsvorhaben im Mauerwerksbau 783
Anke Eis, Dresden

Stichwortverzeichnis 789

Inhaltsverzeichnis

Vorwort III

Autoren XVII

A Baustoffe - Bauprodukte

I Eigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen 3
 Wolfgang Brameshuber†, Aachen

1	Allgemeines	3	5.5	Biegezugfestigkeit und -tragfähigkeit	15
2	Eigenschaftskennwerte von Mauersteinen	3	5.6	Verformungseigenschaften	18
2.1	Festigkeitseigenschaften	3	5.6.1	Allgemeines	18
2.1.1	Längsdruckfestigkeit	3	5.6.2	Druckbeanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen	18
2.1.2	Zugfestigkeiten	3	5.6.2.1	Druck-E-Modul E_D	18
2.2	Verformungseigenschaften	5	5.6.2.2	Querdehnungszahl μ_D und Dehnung bei Höchstspannung $\epsilon_{u,D}$	18
2.2.1	Elastizitätsmodul senkrecht zur Lagerfuge unter Druckbeanspruchung	5	5.6.2.3	Völligkeitsgrad α_0	20
2.2.2	Elastizitätsmodul in Steinlängsrichtung unter Zugbeanspruchung	6	5.6.3	Druckbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen	20
2.2.3	Spannungs-Dehnungslinie	6	5.6.3.1	Druck-E-Modul $E_{D,p}$	20
2.2.4	Querdehnungsmodul	6	5.6.3.2	Dehnung bei Höchstspannung $\epsilon_{u,D,p}$	20
2.3	Dehnung aus Schwinden und Quellen, thermische Ausdehnungskoeffizienten	7	5.6.4	Zug-E-Modul E_Z (Zugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen)	20
3	Eigenschaftswerte von Mauermörteln	7	5.6.5	Feuchtedehnung ϵ_f , (Schwinden ϵ_s , irreversibles Quellen ϵ_q), Kriechen (Kriechzahl ϕ), Wärmedehnungskoeffizient α_T	21
3.1	Allgemeines	7	6	Feuchtigkeitstechnische Kennwerte von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk	22
3.2	Festigkeitseigenschaften	7	6.1	Kapillare Wasseraufnahme	22
3.2.1	Zugfestigkeit β_Z	7	6.2	Wasserdampfdurchlässigkeit	23
3.2.2	Scherfestigkeit β_s	7	7	Natursteine, Natursteinmauerwerk	23
3.3	Verformungseigenschaften	7	8	Eigenschaftswerte von Putzen (Außenputz)	24
3.3.1	E-Modul (Längsdehnungsmodul) E	7	8.1	Allgemeines	24
3.3.2	Querdehnungsmodul E_q	7	8.2	Festigkeitseigenschaften	25
3.3.3	Feuchtedehnung (Schwinden ϵ_s)	8	8.2.1	Druckfestigkeit β_D	25
3.3.4	Kriechen (Kriechzahl ϕ)	9	8.2.2	Zugfestigkeit β_Z	25
4	Verbundeigenschaften zwischen Stein und Mörtel	9	8.3	Verformungseigenschaften	25
4.1	Allgemeines	9	8.3.1	Zug-E-Modul E_Z , dynamischer E-Modul $dyn E$	25
4.2	Haftscherfestigkeit	9	8.3.2	Zugbruchdehnung $\epsilon_{Z,u}$	25
4.3	Haftzugfestigkeit	9	8.3.3	Zugrelaxation ψ	25
5	Eigenschaftswerte von Mauerwerk	9	8.3.4	Schwinden ϵ_s , Quellen ϵ_q	25
5.1	Allgemeines	9	8.4	Eigenschaftszusammenhänge	26
5.2	Druckfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen	9	9	Literatur	26
5.2.1	Experimentelle Bestimmung	9			
5.2.2	Rechnerische Bestimmung	10			
5.3	Druckfestigkeit parallel zu den Lagerfugen	14			
5.4	Zugfestigkeit und -tragfähigkeit	14			

II	Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (abZ) bzw. mit allgemeiner Bauartgenehmigung (aBg)	31			
	Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin				
0	Allgemeines	34	2.2.2	Kalksand-Planelemente	151
0.1	Nachweis der Mindestauflast	34	2.2.3	Porenbeton-Planelemente	158
0.1.1	Mauerwerk nach DIN 1053-1	34	2.2.4	Beton-Planelemente	158
0.1.2	Nachweis der Mindestauflast – Mauerwerk nach DIN EN 1996 (Eurocode 6)	34	2.3	Wandbauart aus Planelementen in drittel- oder halbgeschosshoher Ausführung	161
0.1.2.1	Vereinfachte Berechnungsmethoden nach DIN EN 1996-3	34	2.4	Weitere Dünnbettmörtel	163
0.1.2.2	Weiter vereinfachte Berechnungsmethoden nach DIN EN 1996-3, Anhang A	34	3	Mauerwerk mit Mittelbettmörtel	166
0.2	Wände mit teilweise aufliegender Decke	34	4	Vorgefertigte Wandtafeln	167
0.2.1	Mauerwerk nach DIN 1053-1	34	4.1	Geschosshohe Mauertafeln	167
0.2.2	Mauerwerk nach DIN EN 1996 (Eurocode 6)	34	4.2	Drittel- oder halbgeschosshohe Mauertafeln	186
0.3	Sonderregelungen zur Knicklänge	34	4.3	Verguss- und Verbundtafeln	187
0.4	Gesonderte Regelungen zu Schlitzen	35	5	Geschosshohe Wandtafeln	187
0.4.1	Vertikalschlitze	35	6	Schalungsstein-Bauarten	187
0.4.2	Horizontalschlitze	35	6.1	Konstruktion und Baustoffe	187
1	Mauerwerk mit Normal- oder Leichtmauermörtel	35	6.1.1	Konstruktion	187
1.1	Mauerziegel	35	6.1.2	Steine	188
1.2	Verfüllziegel	51	6.1.3	Mörtel	189
1.3	Kalksandsteine	52	6.1.4	Füllbeton	189
1.4	Betonsteine	54	6.2	Herstellung des Mauerwerks auf der Baustelle, Konstruktion	189
1.4.1	Vollsteine und Vollblöcke	54	6.3	Entwurf und Berechnung	190
1.4.2	Hohlblocksteine	57	6.4	Wärmeschutz	191
1.4.3	Hohlblocksteine mit integrierter Wärmedämmung	57	6.5	Brandschutz	191
1.5	Sonstige Mauersteine	57	7	Trockenmauerwerk	191
2	Mauerwerk mit Dünnbettmörtel	58	8	Mauerwerk mit PU-Kleber	198
2.1	Plansteine üblichen Formates und dafür zugelassene Dünnbettmörtel	58	8.1	Planziegel	198
2.1.1	Planziegel	58	8.2	Planverfüllziegel	204
2.1.2	Planziegel mit integrierter Wärmedämmung	90	8.3	Porenbeton-Plansteine	208
2.1.3	Planverfüllziegel	116	9	Bewehrtes Mauerwerk	211
2.1.4	Kalksand-Plansteine	118	9.1	Bewehrung für bewehrtes Mauerwerk ..	211
2.1.5	Porenbeton-Plansteine	121	9.2	Hochlochziegel für bewehrtes Mauerwerk	211
2.1.6	Beton-Plansteine	126	9.3	Stürze	211
2.1.6.1	Planvollsteine und Planvollblöcke	126	10	Ergänzungsbauteile	234
2.1.6.2	Planhohlblocksteine	132	10.1	Mauerfuß-Dämmelemente	234
2.1.6.3	Plansteine aus Leichtbeton mit integrierter Wärmedämmung	136	10.2	Anker zur Verbindung der Mauerwerksschalen von zweischaligen Außenwänden	239
2.2	Planelemente und dafür zugelassene Dünnbettmörtel	149	10.3	Sonstige Ergänzungselemente	257
2.2.1	Planziegel-Elemente	149	11	Literatur	262
			12	Bildnachweis	264

III	Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Drucktragverhalten von Mauerwerk	265		
	Markus Graubohm, Aachen			
1	Einleitung	265	2.5.4	Zusammenfassung 275
2	Experimentelle Untersuchungen zum Drucktragverhalten	266	2.6	Untersuchungen an Verbundprüfkörpern 275
2.1	Allgemeines	266	2.6.1	Herstellung und Lagerung 275
2.2	Versuchsprogramm und verwendete Materialien	266	2.6.2	Haftscherfestigkeit 275
2.3	Untersuchungen an den Mauersteinen . .	266	2.7	Untersuchungen an Mauerwerkpfeilern . 276
2.3.1	Allgemeines	266	2.7.1	Herstellung und Lagerung 276
2.3.2	Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul und Querdehnzahl	266	2.7.2	Druckfestigkeit und Verformungs- verhalten 276
2.3.3	Zugfestigkeit	268	2.7.3	Vergleich der Versuchsergebnisse mit analytischen Ansätzen 280
2.3.4	Biegezugfestigkeit	270	3	Numerische Untersuchungen zum Drucktragverhalten 282
2.3.5	Zusammenfassung	270	3.1	Vorgehensweise 282
2.4	Untersuchungen an Mauermörteln ohne Kontakt zum Stein	270	3.2	Eingangsparameter 282
2.4.1	Allgemeines	270	3.3	Simulation der Druckversuche an Mauerwerkpfeilern 282
2.4.2	Frisch- und Festmörteleigenschaften . .	271	3.3.1	Berechnungsvarianten und numerisches Modell 282
2.4.3	Statischer Elastizitätsmodul und Querdehnzahl	272	3.3.2	Vergleich der numerischen Berechnungen mit Versuchsergebnissen . 282
2.4.4	Zusammenfassung	274	3.3.3	Rissbildung 284
2.5	Untersuchungen an Mörtelproben aus der Fuge	274	3.3.4	Exemplarische Analyse der Spannungs- verteilung im Mauerwerkpfeiler 285
2.5.1	Allgemeines/Herstellung	274	4	Zusammenfassung 290
2.5.2	Trockenrohdichte und Fugendruck- festigkeit	274	5	Literatur 291
2.5.3	Dynamischer Elastizitätsmodul	275		
B	Konstruktion • Bauausführung • Bauwerkserhaltung			
I	Statisch-konstruktive Sicherungsarbeiten am westlichen Iwan der UNESCO-Welterbestätte Takht-e Soleyman, Iran	295		
	Toralf Burkert, Weimar, Christian Fuchs, Berlin und Robert Sobott, Naumburg			
1	Einleitung	295	4.1.1	Herstellung von Hochbrandgips vor Ort im Feldofen 304
2	Der Takht-e Soleyman	295	4.1.2	Begleitende naturwissenschaftliche Untersuchungen zur Herstellung und Verwendung von Hochbrandgipsmörtel . 308
2.1	Geschichtlicher Überblick	296	4.1.3	Entwicklung eines Injektionsmörtels auf der Grundlage des lokal hergestellten Gipses 310
2.2	Anmerkungen zur Forschungsgeschichte	298	4.1.4	Versuche an Testmauern auf dem Takht in den Jahren 2016 und 2017 312
3	Der westliche Iwan	298	4.1.5	Begleitende Festigkeitsprüfungen 314
3.1	Dokumentation und Untersuchungen Teil 1: Aufmaß und Kartierungen	298	4.2	Ertüchtigung des ilkhanidischen Strebe- pfeilers auf der Nordseite der Nordwand 316
3.2	Dokumentation und Untersuchungen Teil 2: Bauhistorische Befund- dokumentation	299	4.3	Ertüchtigung des gesamten Ostteils der Nordwand des westlichen Iwans im Jahr 2018 318
3.3	Dokumentation und Untersuchungen Teil 3: Erkundung des Bauzustands unter dem anstehenden Terrain	303	5	Förderung 329
3.4	Kurze Restaurierungshistorie des Westiwans	303	6	Danksagung 329
4	Sicherung der noch verbliebenen Mauerwerksbereiche der Nordwand	303	7	Literatur 330
4.1	Vorbereitende praktische Untersuchungen und Maßnahmen	303		

II	Ev.-Luth. Hauptpfarrkirche Zwickau – seit 1935 Dom St. Marien Zwickau	333		
	Toralf Burkert, Weimar und Peter Schöps, Radebeul			
1	Einführung	333	5.9.2	Mit Vorspannung
2	Messungen und Überwachungen	333	5.10	Fundamentertüchtigung
2.1	Langzeitmessungen	333	5.11	Stabwerksmodell
2.2	Laserscan	333	5.12	Räumliches FE-Modell
3	Statische Voruntersuchungen	334	6	Ergänzende Betrachtungen für Pfeiler M1 und M2
4	Maßnahmen zur Ertüchtigung	335	6.1	Fundamentertüchtigung
4.1	Historische Maßnahmen	335	6.2	Lasteinleitung Zugglieder
4.2	Aktuelle Vorhaben	335	6.3	Lasteinleitung in die Arkadenwand
5	Maßnahmen am Beispiel des Pfeilers M1	337	6.4	Berücksichtigung der Temperatur- einflüsse bei der Vorspannkraft
5.1	Baugrund	338	7	Ausführung der Sicherungsmaßnahmen am Bauwerk
5.2	Arbeitsschritte	338	7.1	Fundamentertüchtigung
5.3	Bauzustände	338	7.2	Herstellen der Betonpolster auf den Arkadenwänden und der Ankerkanäle im Chorgewölbe
5.4	Materialfestigkeiten	338	7.3	Einbau der Zugankersysteme
5.5	Ständige und veränderliche Einwirkungen	340	8	Ausblick
5.6	Außergewöhnliche Einwirkungen	340	9	Zusammenfassung
5.7	Bautechnischer Brandschutz	341	10	Literatur
5.8	Allgemeines zu den Statischen Nachweisen	341		
5.9	Analytische Nachweise des Pfeilers	341		
5.9.1	Bestand	342		
III	Tragverhalten und Tragfähigkeit von Injektionsdübeln in Lochsteinen unter Berücksichtigung der Steingeometrie	379		
	Marina Stipetic und Jan Hofmann, Stuttgart			
1	Einleitung	379	4.1	Herangehensweise
2	Mauersteine (Steinformate, Lochgeometrien)	379	4.2	Tragverhalten und Tragfähigkeit bei Verankerung nur im Außensteg
3	Verankerungen im Mauerwerk	380	4.3	Tragverhalten bei Verankerung in mehreren Stegen
3.1	Befestigungsverfahren	380	4.4	Berechnungsbeispiele für die Verankerung unter Zugbelastung
3.2	Injektionsdübel für Mauerwerk	383	4.4.1	Verankerung nur im Außensteg
3.3	Injektionsdübel unter Zugbelastung	385	4.4.2	Verankerung in mehreren Stegen
3.3.1	Tragverhalten von Injektionsdübeln unter Zugbelastung	385	5	Berechnungsmodell für Injektionsdübel in Lochsteinen unter Querkug- belastung – Versagen durch Kantenbruch
3.3.2	Stand der Untersuchungen für Steinversagen bei zugbelasteten Injektionsdübeln in Lochsteinen	386	5.1	Herangehensweise
3.4	Injektionsdübel unter Querkugbelastung	388	5.2	Tragverhalten und Tragfähigkeit bei Verankerung unter Querkugbelastung ..
3.4.1	Tragverhalten von Injektionsdübeln unter Querkugbelastung	388	5.3	Berechnungsbeispiel für Verankerung unter Querkugbelastung
3.4.2	Stand der Untersuchungen für Steinversagen bei querbelasteten Injektionsdübeln in Lochsteinen	388	6	Zusammenfassung
4	Eigenes Berechnungsmodell für Injektionsdübel in Lochsteinen unter Zugbelastung – Versagen durch Steinausbruch	390	7	Literatur

C Bemessung			
I	Forschungsvorhaben zur Bewertung der Tragfähigkeit von Injektionsdübeln in Mauerwerk im Rahmen von Baustellenversuchen	413	
	Rainer Becker, Dortmund, Jan Hofmann, Stuttgart, Catherina Thiele und Florian Wendel, Kaiserslautern		
1	Einleitung	413	3.1 Ziele des Forschungsvorhabens 419
2	Technische Regel „Durchführung und Auswertung von Versuchen am Bau“	413	3.2 Ermittlung der Schädigung von Befestigungen durch Probelastung 419
2.1	Einleitung	413	3.3 Ermittlung des Einflusses des Abstützdurchmessers auf die Tragfähigkeit 421
2.2	Auszugversuche	417	3.4 Modifikation des Teilsicherheitsbeiwerts 425
2.3	Probelastungen	417	4 Fazit 429
2.4	Abnahmeversuche	418	5 Literatur 429
3	Forschungsvorhaben „Versuche am Bau“	419	
II	Tragfähigkeit ausfachender Mauerwerkswände unter Berücksichtigung der verformungs-basierten Membranwirkung	431	
	Michael Schmitt, Lauterbach und Carl-Alexander Graubner, Darmstadt		
1	Einleitung	431	4.2 Beschreibung des Modells 441
2	Grundlagen	431	4.3 Analyse der Versagensarten 444
2.1	Einführung	431	4.4 Iterative Berechnung der Systemtragfähigkeit 446
2.2	Systemmodelle für vorwiegend biegebeanspruchte Mauerwerkswände	433	4.5 Verifizierung des Berechnungsverfahrens 447
2.3	Historische Entwicklung der Theorie der Membrandruckkräfte	435	4.6 Last-Verformungs-Verhalten der angrenzenden Stahlbetonbauteile 448
3	Allgemeine Formulierungen zur Ermittlung der verformungs-basierten Membrandruckkraft	436	5 Bemessungsmodell 449
3.1	Beschreibung der Lagerungsbedingungen	436	5.1 Ermittlung der aufnehmbaren Horizontallast 449
3.2	Erläuterung der Systemzustände	437	5.2 Auswertung der Tragfähigkeit ausfachender Mauerwerkswände 451
3.3	Ermittlung der Membrandruckkraft	438	5.3 Sicherstellung der Mindestauflast bei tragenden Mauerwerkswänden 455
3.4	Abtrag der Membrandruckkräfte in den angrenzenden Bauteilen	439	6 Zusammenfassung 458
4	Berechnung der Systemtragfähigkeit	440	7 Literatur 458
4.1	Einleitung	440	
III	Aussteifungssysteme mit Mauerwerksscheiben	461	
	Werner Seim, Kassel und Kai Sommerlade, Lohfelden		
1	Einführung	461	4 Modellbildung mit finiten Elementen 470
2	Grundlagen der Berechnungsmethode	462	4.1 Geometriedefinition und Diskretisierung 471
2.1	Spannungsfelder	462	4.2 Modellierung von Wandscheiben ohne Zugfestigkeit 471
2.2	Lasteinzugsflächen	463	4.2.1 Kontaktelemente ohne Zugfestigkeit 471
2.3	Deckenaufleger	464	4.2.2 Zugfreie Schalenelemente 472
2.4	Zentrierung	465	5 Vergleich der Modellierungsvarianten 472
2.5	Gleichgewichtsbetrachtung	465	5.1 Rechenverfahren 473
2.6	Nachweise nach EC 6	467	5.2 Auswertung der Ergebnisse 473
3	Rechenbeispiel	468	6 Vergleich der Berechnungsmethoden 474
3.1	Baubeschreibung	468	6.1 Strukturmodell 474
3.2	Werkstoffe und Einwirkungen	468	6.2 Vertikale Einwirkungen 475
3.3	Nachweise	469	6.3 Vertikale und horizontale Einwirkungen 476
3.3.1	Position 113	469	7 Zusammenfassung und Ausblick 477
3.3.2	Position 108	470	8 Literatur 477
3.4	Bewertung der Ergebnisse	470	

D Bauphysik - Brandschutz

I	Schallschutz im Mauerwerksbau	481		
	Heinz-Martin Fischer und Martin Schneider, Stuttgart			
1	Grundbegriffe im Schallschutz	481	2.3.4	Nachweis für Geräusche gebäudetechnischer Anlagen
1.1	Schall, Luftschall, Körperschall, Trittschall	481	2.4	Neues Sicherheitskonzept der DIN 4109
1.2	Frequenz, Spektrum	481	2.5	Neuer Bauteilkatalog in DIN 4109
1.3	Schallpegel	481		
1.4	Die A-Bewertung	482	3	DIN 4109-1 und andere Regelwerke für den baulichen Schallschutz
1.5	Kenngrößen zur Beschreibung der schalltechnischen Eigenschaften	482	3.1	Regelwerke und deren Anwendungsbereich
1.5.1	Unterscheidung zwischen Bauteil- und Gebäudeeigenschaften	482	3.2	Anforderungen der DIN 4109-1
1.5.2	Kenngrößen zur Beschreibung von Bauteileigenschaften	483	3.2.1	Luft- und Trittschallschutz
1.5.2.1	Schalldämmung von Bauteilen: Schalldämm-Maß	483	3.2.2	Außenlärm
1.5.2.2	Bewertetes Schalldämm-Maß	483	3.2.3	Geräusche aus haustechnischen Anlagen und Betrieben
1.5.2.3	(Bewertete) Verbesserung der Luftschalldämmung	484	3.2.3.1	Übertragung aus fremden Bereichen
1.5.2.4	Trittschalldämmung von Decken: Norm-Trittschallpegel	484	3.2.3.2	Anlagen im eigenen Bereich
1.5.2.5	Bewerteter Norm-Trittschallpegel	484	3.3	Besondere Regelungen
1.5.2.6	(Bewertete) Trittschallminderung	484	3.3.1	Anforderungen nach dem Fluglärm-Gesetz
1.5.2.7	Äquivalenter bewerteter Norm-Trittschallpegel	485	3.3.2	Anforderungen nach der TA-Lärm
1.5.3	Kenngrößen zur Beschreibung von Gebäudeeigenschaften: Schallschutz zwischen Räumen	485	4	Schalldämmung von Wänden
1.5.3.1	Schallschutz und Schalldämmung	485	4.1	Übersicht/Einführung
1.5.3.2	(Bewertetes) Bau-Schalldämm-Maß	485	4.2	Einschalige Wände
1.5.3.3	(Bewertete) Standard-Schallpegeldifferenz	486	4.2.1	Schalldämmung einschaliger Bauteile: Grundlagen
1.5.3.4	(Bewerteter) Norm-Trittschallpegel im Bau	486	4.2.1.1	Massengesetz und Koinzidenz
1.5.4	Spektrumanpassungswerte	486	4.2.1.2	Einfluss der Randanbindung des Mauerwerks auf die Schalldämmung
1.5.4.1	Spektrumanpassungswerte für den Luftschall	486	4.2.1.3	Randverluste und Verlustfaktor-Korrektur
1.5.4.2	Spektrumanpassungswerte für den Trittschall	487	4.2.1.4	Unerwünschte Schwingungsformen
2	Von der europäischen Normung zur neuen DIN 4109	487	4.2.2	Mauerwerkswände in DIN 4109-2 und DIN 4109-32
2.1	Ausgangspunkt europäische Normung	487	4.2.3	Praktisches Verhalten einschaliger Wände
2.1.1	Änderungen bei Prüf- und Beurteilungsverfahren	487	4.2.3.1	Einschalige Wände mit Schalungssteinen
2.1.2	Neue Berechnungsverfahren für den baulichen Schallschutz	487	4.2.3.2	Offenporige Wände
2.1.3	Neuer Planungsansatz durch die europäische Normung	487	4.2.3.3	Übertragung durch Löcher, Schlitze und poröse Stoffe
2.2	Aufbau und Inhalte der neuen DIN 4109	488	4.2.3.4	Trockenputze auf einschaligem Mauerwerk
2.3	Neue Nachweisverfahren der DIN 4109-2	489	4.2.3.5	Einflüsse von Fugen, Schlitzen und Zählerkästen
2.3.1	Luftschalldämmung	489	4.3	Mauerwerk aus Lochsteinen
2.3.2	Trittschalldämmung	491	4.3.1	Grundlagen und Einführung
2.3.3	Außenlärm	491	4.3.2	Wärmeschutztechnische Entwicklung von Hochlochziegeln
			4.3.3	Ursache für die verminderte Direktämmung
			4.3.4	Lochsteinmauerwerk mit und ohne verminderte Direktämmung
			4.3.5	Verlustfaktorkorrektur bei Lochsteinen

4.3.6	Rechnerische Ermittlung der Schalldämmung von Lochsteinen aus Material- und Geometrie-Parametern . . .	518	4.6.4	Zweischalige Außenwände aus Mauerwerk	531
4.3.7	Messtechnische Ermittlung der Schalldämmung von Hochlochziegelmauerwerk außerhalb des Wandprüfstands . . .	518	4.6.5	Außenwände mit Wärmedämmverbundsystem	531
4.4	Verkleidungen an Massivwänden	519	4.6.6	Außenwände mit innenseitiger Verkleidung	532
4.4.1	Das physikalische Verhalten	519	4.7	Installationswände	532
4.4.2	Praktische Ausführungen	520	5	Flankierende Übertragung von Wänden	534
4.4.3	Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS)	521	5.1	Grundsätzliche Aspekte	534
4.4.3.1	Aufbau und Einflussgrößen	521	5.1.1	Schallschutz und Flankenübertragung . .	534
4.4.3.2	Berechnungsmodell nach E DIN 4109-34/A1	522	5.1.2	Flankendämmung und Stoßstellendämm-Maß	534
4.4.3.3	Berechnungsmodell unter Berücksichtigung der tiefen Frequenzen nach E DIN 4109-34/A1	523	5.1.2.1	Methodischer Ansatz für die Flankendämmung	534
4.5	Zweischalige Wände im Massivbau	523	5.1.2.2	Das Stoßstellendämm-Maß	534
4.5.1	Grundlagen	523	5.2	Die Bedeutung der Wände für die Flankendämmung	534
4.5.1.1	Wirkungsprinzip zweischaliger Wände . .	523	5.2.1	Einfluss der Wände	534
4.5.1.2	Schallbrücken, Randeinspannung	524	5.2.2	Einfluss leichter, massiver Innenwände . .	535
4.5.1.3	Mehr als zwei Schalen	525	5.2.3	Einfluss von Wandverkleidungen	535
4.5.2	Zweischalige gemauerte Haustrennwände	525	5.3	Flankendämmung bei Lochsteinmauerwerk	536
4.5.2.1	Anwendungsbereich	525	5.3.1	Einfluss der Stoßstellengestaltung	536
4.5.2.2	Konstruktive Auslegung	526	5.3.2	Stoßstellendämm-Maße bei Lochsteinmauerwerk	537
4.5.2.3	Behandlung in der DIN 4109-2 und DIN 4109-32	526	5.4	Besonderheiten von Stoßstellen	539
4.5.2.4	Fehlervermeidung	528	5.4.1	Stumpfstoß und Stumpfstoßabriss	539
4.5.3	Zweischalige massive Wände mit durchlaufenden Decken und Wänden . . .	529	5.4.2	Stöße außerhalb des Bauteilkatalogs . . .	539
4.6	Außenwände	529	5.4.3	Versetzte Stöße	540
4.6.1	Allgemeine Aspekte	529	5.4.4	Stöße mit unterschiedlichen flächenbezogenen Massen	540
4.6.2	Schalldämm-Maß zusammengesetzter Bauteile	530	5.4.5	Winkelstöße	541
4.6.3	Behandlung von Außenlärm in DIN 4109-2 und im Bauteilkatalog der DIN 4109	530	6	Trittschalldämmung	541
4.6.4	Zweischalige Außenwände aus Mauerwerk	531	7	Literatur	542
II Vereinfachter Nachweis des Tauwasserschutzes nach DIN 4108-3:2018			547		
Helmut Marquardt, Buxtehude					
1	Notwendigkeit des Feuchte- und Tauwasserschutzes	547	3.1	Notwendigkeit des Nachweises	556
2	Grundlagen des Tauwasserschutzes	547	3.2	DIN EN ISO 13788 und DIN 4108-3	557
2.1	Feuchtetransport in porösen Baustoffen	547	3.3	Glaser-Verfahren	557
2.2	Diffusion und Teildruck	548	3.3.1	Grundgedanken	557
2.3	Allgemeines Gasgesetz und Zustandsgleichung der Gase	549	3.3.2	Tauwasserausfall in einem Bauteilbereich	559
2.4	Wasserdampfsättigung und relative Luftfeuchte	550	3.3.3	Tauwasserausfall in einer oder zwei Bauteilebenen	561
2.4.1	Definitionen	550	3.3.4	Ausfallende Tauwassermasse	561
2.4.2	Beispiel: Tauwasserausfall bei Abkühlung eines Luftvolumens	552	3.3.5	Mögliche Verdunstungswassermasse . . .	563
2.5	Diffusion von Wasserdampf in Luft	552	3.4	Vereinfachter Nachweis des Tauwasserschutzes	565
2.6	Diffusion von Wasserdampf durch poröse Stoffe	552	3.4.1	Mögliche Nachweisverfahren	565
2.7	Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl	554	3.4.2	Anforderungen nach DIN 4108-3	565
3	Tauwasserausfall im Bauteilinnern	556	3.4.3	Anforderungen nach DIN 68800-2	566
			3.4.4	Randbedingungen nach DIN 4108-3 . . .	566
			3.4.5	Nachweis mit dem vereinfachten Periodenbilanzverfahren nach DIN 4108-3	566

3.5	Bauteile nach DIN 4108-3 ohne rechnerischen Nachweis	569	3.6.2	Beispiel 2: Außenwand in Holztafel-/Holzrahmenbauart mit Mauerwerk-Vorsatzschale	577	
3.5.1	Einführung	569	3.7	Weitergehende Untersuchungen mit aufwendigen EDV-Programmen	584	
3.5.2	Außenwände ohne rechnerischen Nachweis	569	3.7.1	Fehler bei Nachweisen mit dem Periodenbilanzverfahren	584	
3.5.3	Erdberührte Außenwände und Boden- platten ohne rechnerischen Nachweis	572	3.7.2	EDV-Verfahren mit gekoppeltem Wärme- und Feuchtetransport	585	
3.5.4	Dächer ohne rechnerischen Nachweis	572	3.7.3	EDV-Verfahren mit gekoppeltem Wärme-, Feuchte- und Lufttransport	587	
3.5.5	Fenster und Fenstertüren	575	4	Zusammenfassung	587	
3.6	Beispiele zum vereinfachten Perioden- bilanzverfahren nach DIN 4108-3	575	5	Literatur	588	
3.6.1	Beispiel 1: Massives Flachdach ohne Dampfsperre	576				
III	Innendämmung eines historischen Mauerwerks mit konventionellen und aerogelhaltigen Dämmstoffen – Eine hygrothermische Analyse				591	
	Karim Ghazi Wakili und Thomas Stahl, Winterthur, Schweiz					
1	Einleitung	591	4.3	Wassergehalt im 1. cm der Innendämmung	598	
2	Bauphysikalische Eigenschaften von historischem Bruchsteinmauerwerk	591	4.4	Begrenzung der Wasseraufnahme von außen	602	
3	Eindimensionale hygrothermische Simulationen	593	5	Zweidimensionale hygrothermische Simulationen	604	
3.1	Ist-Zustand: Wandaufbau, Materialzuordnung und klimatische Randbedingungen	593	6	Resultate der 2-D-Simulationen	604	
3.2	Für die Simulation verwendete Dämmstoffe	594	6.1	Momentaufnahmen der Temperatur- verteilung am 31. Januar	604	
4	Resultate der 1-D-Simulationen	596	6.2	Wassergehalt am Holzbalkenkopf	605	
4.1	Innere Oberflächentemperaturen	596	7	Zusammenfassung	607	
4.2	Temperatur- und Feuchtezustand hinter den Dämmschichten	598	8	Literatur	607	
E	Normen • Zulassungen • Regelwerk					
I	Geltende Technische Regeln für den Mauerwerksbau (Deutsche, Europäische und Internationale Normen) (Stand 31.05.2018)					611
	Peter Rauh, Berlin und Carola Hauschild, Radebeul					
1	Vorbemerkung	611	3	Regelwerk	613	
2	EuGH-Urteil vom 16. Oktober 2014 (Rs. C-100/13)	612				
II	Verzeichnis der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen/allgemeinen Bauartgenehmigungen für den Mauerwerksbau (Stand 31.05.2018)					631
	Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin					
1	Mauerwerk mit Normal- oder Leichtmörtel	633	1.4.3	Hohlblocksteine mit integrierter Wärmedämmung	652	
1.1	Mauerziegel	633	1.5	Sonstige Mauersteine	652	
1.2	Verfüllziegel	646	2	Mauerwerk mit Dünnbettmörtel	652	
1.3	Kalksandsteine	647	2.1	Plansteine üblichen Formates und dafür zugelassene Dünnbettmörtel	652	
1.4	Betonsteine	649	2.1.1	Planziegel	652	
1.4.1	Vollsteine und Vollblöcke	649				
1.4.2	Hohlblocksteine	651				

2.1.2	Planziegel mit integrierter Wärmedämmung	678	5	Geschosshohe Wandtafeln	736
2.1.3	Planverfüllziegel	689	6	Schalungsstein-Bauarten	736
2.1.4	Kalksand-Plansteine	693	7	Trockenmauerwerk	738
2.1.5	Porenbeton-Plansteine	696	8	Mauerwerk mit PU-Kleber	739
2.1.6	Beton-Plansteine	699	8.1	Planziegel	739
2.1.6.1	Planvollsteine und Planvollblöcke	699	8.2	Planverfüllziegel	741
2.1.6.2	Planhohlblocksteine	707	8.3	Porenbeton-Plansteine	743
2.1.6.3	Plansteine aus Leichtbeton mit integrierter Wärmedämmung	712	8.4	Vorgefertigte Wandtafeln	744
2.2	Planelemente und dafür zugelassene Dünnbettmörtel	719	9	Bewehrtes Mauerwerk	745
2.2.1	Planziegel-Elemente	719	9.1	Bewehrung für bewehrtes Mauerwerk	745
2.2.2	Kalksand-Planelemente	720	9.2	Hochlochziegel für bewehrtes Mauerwerk	745
2.2.3	Porenbeton-Planelemente	725	9.3	Stürze	745
2.2.4	Beton-Planelemente	726	10	Ergänzungsbauteile	747
2.3	Wandbauart aus Planelementen in drittel- oder halbgeschosshoher Ausführung	728	10.1	Mauerfuß-Dämmelemente	747
2.4	Weitere Dünnbettmörtel	729	10.2	Anker zur Verbindung der Mauerwerksschalen von zweischaligen Außenwänden	747
3	Mauerwerk mit Mittelbettmörtel	730	10.3	Sonstige Ergänzungselemente	749
4	Vorgefertigte Wandtafeln	731	11	Anhang	750
4.1	Geschosshohe Mauertafeln	731	11.1	Zulassungsübersicht	750
4.2	Drittel- oder halbgeschosshohe Mauertafeln	735			
III	Die Anpassung des nationalen Bauproduktenrechts nach dem Urteil des EuGH vom 16. Oktober 2014	765			
	Tina Gerschler, Berlin				
1	Vorbemerkungen	765	4.1	Nicht harmonisierte Bauprodukte	770
2	Bisheriges Zusammenspiel zwischen nationalem und europäischem Bauproduktenrecht	765	4.2	Lückenhaft harmonisierte Bauprodukte	770
2.1	Europäische Vorgaben mittels der Bauproduktenverordnung	765	4.3	Bauarten	770
2.1.1	Regelungsziele/Abgrenzung zur Bauproduktenrichtlinie	766	5	Ablauf und Maßnahmen des Anpassungsprozesses	770
2.1.2	Bewertung anhand Technischer Spezifikationen	766	6	Das neue System des nationalen Bauproduktenrechts	772
2.1.2.1	Harmonisierte Normen	766	6.1	Verwendbarkeitsnachweise für Bauprodukte	772
2.1.2.2	Europäische Bewertungsdokumente/ Europäische Technische Bewertungen	766	6.1.1	Erforderlichkeit	772
2.2	Bisheriges Regelungssystem der Landesbauordnungen und der Bauregellisten	767	6.1.1.1	Harmonisierte Bauprodukte	772
2.2.1	Struktur der Landesbauordnungen	767	6.1.1.2	Nicht harmonisierte Bauprodukte	772
2.2.1.1	Bauprodukte	767	6.1.2	Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung	774
2.2.1.2	Bauarten	767	6.1.3	Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis	775
2.2.2	Struktur der Bauregellisten	767	6.1.4	Zustimmung im Einzelfall	775
2.3	Lückenhaft harmonisierte Bauprodukte und nationale Zusatzanforderungen	769	6.2	Anwendbarkeitsnachweise für Bauarten	776
3	Urteil des EuGH vom 16. Oktober 2014	769	6.2.1	Allgemeine und vorhabenbezogene Bauartgenehmigung	776
3.1	Inhalt	769	6.2.2	Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis für Bauarten	777
3.2	Konsequenzen	770	6.3	Freiwillige Herstellererklärungen	777
4	Notwendige Anpassungen des nationalen Bauproduktenrechts aufgrund des EuGH-Urteils	770	6.4	Übersicht der Technischen Baubestimmungen nach alter und neuer Rechtslage	778
			6.5	Prioritätenliste	778
			7	Ausblick	778
			8	Literatur	779

F Forschung

I Übersicht über abgeschlossene und laufende Forschungsvorhaben im Mauerwerksbau 783
Anke Eis, Dresden

1 Abgeschlossene Forschungsvorhaben . . . 787 2 Laufende Forschungsvorhaben 787

Stichwortverzeichnis 789

Autoren

Neben der Nennung von Titulatur und Anschrift wird auf den jeweiligen Beitrag des Autors in diesem Mauerwerk-Kalender in Klammern verwiesen (Rubrik und Ordnungsnummer des Beitrags).

Becker, Rainer, Dipl.-Ing., fobatec GmbH, Edelstahlweg 5c, 44287 Dortmund (C I).

Brameshuber, Wolfgang, Prof. Dr.-Ing. († 2016), RWTH Aachen University, ibac-Institut für Bauforschung, Schinkelstraße 3, 52062 Aachen (A I).

Burkert, Toralf, Dr.-Ing., Jäger Ingenieure GmbH, Büro Weimar, Paul-Schneider-Straße 17, 99423 Weimar (B I, B II).

Eis, Anke, Dipl.-Ing. (FH), Jäger Ingenieure GmbH, Wichernstraße 12, 01445 Radebeul (F I).

Fischer, Heinz-Martin, Prof. Dr.-Ing., Hochschule für Technik Stuttgart, Studiengang Bauphysik, Schellingstraße 24, 70174 Stuttgart (D I).

Fuchs, Christian, Dipl.-Ing. Architekt, winterfuchs Bauforschung, Crellestraße 33, 10827 Berlin (B I).

Gerschler, Tina, LL.M., Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Nationales Recht, Kolonnenstraße 30B, 10829 Berlin (E III).

Ghazi Wakili, Karim, Dipl.-Phys. ETHZ Dr., IABP Institut für angewandte Bauphysik, Rudolf-Diesel-Strasse 5, CH 8404 Winterthur (D III).

Graubner, Carl-Alexander, Prof. Dr.-Ing., Technische Universität Darmstadt, Institut für Massivbau, Franziska-Braun-Straße 3, 64287 Darmstadt (C II).

Graubohm, Markus, Dr.-Ing., Brameshuber + Uebachs INGENIEURE GmbH, Jakobstraße 12, 52064 Aachen (A III).

Hauschild, Carola, Dipl.-Ing., Jäger Ingenieure GmbH, Wichernstraße 12, 01445 Radebeul (E I).

Hirsch, Roland, Dr.-Ing., Deutsches Institut für Bautechnik Berlin DIBt, Kolonnenstraße 30 B, 10829 Berlin (A II, E II).

Hofmann, Jan, Prof. Dr.-Ing., Technische Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Pfaffenwaldring 4, 70569 Stuttgart (B III, C I).

Jäger, Wolfram, Prof. Dr.-Ing., Technische Universität Dresden, Fakultät Architektur, Lehrstuhl Tragwerksplanung, Zellescher Weg 17, 01069 Dresden sowie Jäger Ingenieure GmbH, Wichernstraße 12, 01445 Radebeul (A II, E II).

Marquardt, Helmut, Prof. Dr.-Ing., Institut für Weiterbildung & Bauprüfung (IWB) e. V. an der Hochschule 21, Harburger Straße 6, 21614 Buxtehude (D II).

Rauh, Peter, Dipl.-Ing., DIN Deutsches Institut für Normung, Normenausschuss Bauwesen, Burggrafenstraße 6, Am DIN-Platz, 10787 Berlin (E I).

Schmitt, Michael, Dr.-Ing., bauart Konstruktions GmbH & Co. KG, Beratende Ingenieure, Spessartstraße 13, 36341 Lauterbach (C II).

Schneider, Martin, M.Sc. Dipl.-Ing. (FH), Hochschule für Technik Stuttgart, Studiengang Bauphysik, Schellingstraße 24, 70174 Stuttgart (D I).

Schöps, Peter, Dipl.-Ing., Jäger Ingenieure GmbH, 01445 Radebeul, Wichernstraße 12 (B II).

Seim, Werner, Prof. Dr.-Ing., Universität Kassel, Fachgebiet Bauwerkserhaltung und Holzbau, Kurt-Wolters-Straße 3, 34125 Kassel (C III).

Sobott, Robert, Prof. Dr., Labor für Baudenkmalpflege Naumburg, Domplatz 1, 06618 Naumburg (B I).

Sommerlade, Kai, M.Sc., EHS Beratende Ingenieure für Bauwesen GmbH, Am Alten Rathaus 5, 34253 Lohfelden (C III).

Stahl, Thomas, M.Sc., IABP Institut für angewandte Bauphysik, Rudolf-Diesel-Strasse 5, CH 8404 Winterthur (D III).

Stipetic, Marina, Dr.-Ing., Universität Stuttgart, Materialprüfungsanstalt (MPA), Pfaffenwaldring 4c, 70569 Stuttgart (B III).

Thiele, Catherina, Dr.-Ing., Technische Universität Kaiserslautern, Bauingenieurwesen, FG Massivbau und Baukonstruktion, Paul-Ehrlich-Straße 14, 67663 Kaiserslautern (C I).

Wendel, Florian, Dipl.-Ing., TU Kaiserslautern, Bauingenieurwesen, FG Massivbau und Baukonstruktion, Königstraße 13, 67655 Kaiserslautern (C I).

A Baustoffe ■ Bauprodukte

- I Eigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen 3

Wolfgang Brameshuber[†], Aachen

- II Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (abZ) bzw. mit allgemeiner Bauartgenehmigung (aBg) 31

Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin

- III Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Drucktragverhalten von Mauerwerk 265

Markus Graubohm, Aachen

I Eigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen

Wolfgang Brameshuber[†], Aachen

1 Allgemeines

Im Zuge der Ablösung der nationalen Bemessungsnorm DIN 1053-1 [1] bzw. DIN 1053-100 [2] durch den Eurocode 6 [3–6] inklusive der zugehörigen Nationalen Anhänge [7–9] führen die Rechenansätze zur Bemessung von Mauerwerk insofern eine Veränderung herbei, als auch europäische Steine und Mörtel mit teilweise anderen Eigenschaften ihr Einsatzgebiet in Deutschland finden. Daher sind die überwiegend deutschen Ausgangsstoffe und das daraus erstellte Mauerwerk mit den erzielten Eigenschaften in diesem jährlich aktualisierten Beitrag zusammengestellt, der somit die direkte Möglichkeit eines Vergleichs mit Materialien anderer Länder gibt.

Die in den nachfolgenden Abschnitten aufgeführten Eigenschaftswerte beziehen sich auf das tatsächliche Verhalten von Mauerstein, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen, womit deutlich wird, dass aufgrund der vielfältigen Materialien und Kombinationen eine große Bandbreite von Eigenschaften entsteht. Anforderungen aus Normen und allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen sind Mindesteigenschaften. Die hier genannten 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 aber bei genaueren Nachweisen für die Tragfähigkeit bestehender Bauwerke. In Grenzfällen kann ein ingenieurmäßig überdachter Ansatz geeigneter Kennwerte zusätzliche Sicherheit bieten. Die Zusammenstellung der Eigenschaftskennwerte bezieht sich in einigen Fällen auf frühere Beiträge des Mauerwerk-Kalenders. In anderen Fällen wurde eine Aktualisierung vorgenommen. Der Bezug bei einer unveränderten Datenlage ist dann der Artikel aus dem Mauerwerk-Kalender 2010 [10]. Wenn Materialkennwerte/Rechenwerte aus dem Eurocode 6 entnommen wurden, wird hierfür auf die Kommentierung zum EC6 [11] verwiesen, die noch weiterführende Erläuterungen enthält.

2 Eigenschaftskennwerte von Mauersteinen

2.1 Festigkeitseigenschaften

2.1.1 Längsdruckfestigkeit

Die Längsdruckfestigkeit von Mauersteinen wird überall dort benötigt, wo eine Biegebeanspruchung in Wandebene erfolgt, so z. B. bei Wänden auf sich durchbiegenden Decken oder Stürzen mit Übermauerung. Gemäß [10] ergibt sich nach Auswertung der Literatur [12–14] folgendes Bild: Für Hochlochziegel lässt sich kein Zusammenhang zwischen dem Nennwert der Steindruckfestigkeit und der Längsdruckfestigkeit angeben, unabhängig vom Lochanteil, genauso wenig für Leichtbeton. Dies hat im Wesentlichen den Einfluss der Loch-/Steganordnung als Ursache. Im Einzelfall wird empfohlen, den Nachweis experimentell zu führen. Für Kalksandvollsteine und Kalksandlochsteine ergibt sich nach [10] ein durchaus verwertbarer Zusammenhang. Für Mauerziegel, Kalksandvollsteine und Kalksandlochsteine ist das Verhältnis Längsdruck-/Mauersteindruckfestigkeit von der Steindruckfestigkeit weitgehend unabhängig. Der Unterschied zwischen Längsdruck-/Normdruckfestigkeit bei Vollsteinen entsteht zum einen dadurch, dass die Normdruckfestigkeit durch Umrechnung der Prüfwerte mittels Formfaktoren ermittelt und für die Längsdruckfestigkeit der Prüfwert ohne Formfaktor gewählt wurde. Zum anderen ist eine produktionsbedingte leichte Anisotropie möglich. Für Porenbeton ergibt sich eine Abnahme des Druckfestigkeitsverhältnisses gemäß dem Zusammenhang $\beta_{D,st,1}/\beta_{D,st} = 0,91 - 0,04 \cdot \beta_{D,st}$ [10]. Auch hier ist ein Teil auf die Umrechnung mit Formfaktoren zurückzuführen, aber auch auf eine leichte Anisotropie durch den Herstellprozess. In den Bildern 1a–d sind für verschiedene Steinsorten die Verhältnisse $\beta_{D,st,1}/\beta_{D,st}$ in Abhängigkeit von der Normdruckfestigkeit $\beta_{D,st}$ aufgetragen. Tabelle 1 gibt eine Zusammenfassung des derzeitigen Stands der Literatur wieder.

2.1.2 Zugfestigkeiten

Für Mauerwerk mit Dickbettfuge (Normal- und Leichtmörtel) ist bei Druckbeanspruchung senkrecht zur Lagerfuge bei bestimmten Verhältnissen Stein-/Mörteldruckfestigkeit wegen des entstehenden mehraxialen Spannungszustands die Zugfestigkeit der Mauersteine eine für die Druckfestigkeit von Mauerwerk

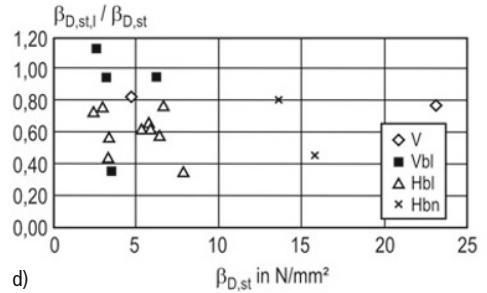
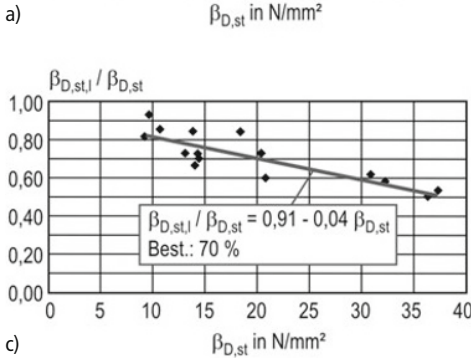
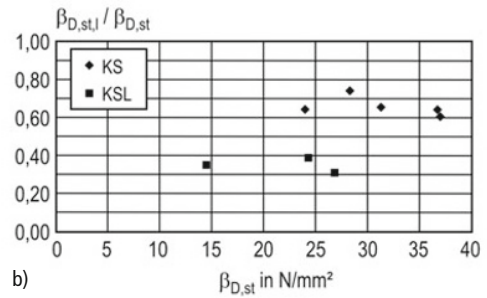
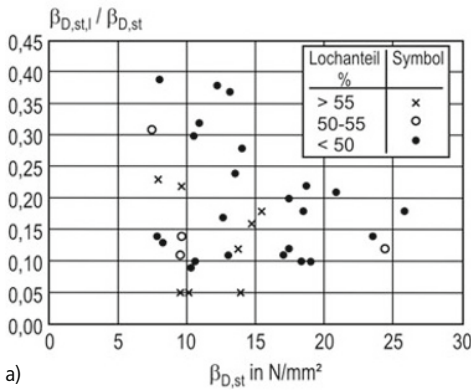


Bild 1. Steinlängs- $(\beta_{D,st,l})$ /Normdruckfestigkeit $(\beta_{D,st})$ in Abhängigkeit von der Normdruckfestigkeit [10]; a) Leichthochlochziegel, b) Kalksandvollsteine, Kalksandlochsteine, c) Porenbeton-Blocksteine, Porenbeton-Plansteine, d) Leichtbetonsteine, Betonsteine

Tabelle 1. Verhältniswerte Steinlängs- $(\beta_{D,st,l})$ /Normdruckfestigkeit $(\beta_{D,st})$, aus [10]

Mauerstein	n	$\beta_{D,st}$, Wertebereich	$\beta_{D,st,l}/\beta_{D,st}$		
			\bar{x}	min x	max x
N/mm ²					
Mz	2	21,9/22,7	0,67	0,64	0,70
HLZ ¹⁾	5	20 ... 47	0,23	0,12	0,33
HLZ ²⁾	37	7,4 ... 26	0,18	0,05	0,39
KS	8	24,1 ... 36,8	0,59	0,32	0,75
KS L	7	8,9 ... 26,9	0,40	0,32	0,56
V	5	4,1 ... 23,1	0,75	0,61	0,83
Vbl	5	2,7 ... 3,6	0,90	0,36	1,13
Hbl	12	2,5 ... 7,9	0,61	0,35	0,81
Hbn	1	15,8	0,46	–	–
PB, PP	15	2,3 ... 9,4	0,70	0,50	0,92

1) Trockenrohddichte $\rho_d > 1,0 \text{ kg/dm}^3$
 2) $\rho_d \leq 1,0 \text{ kg/dm}^3$

n Anzahl der Versuchsserien
 \bar{x} Mittelwert
 min x Kleinstwert
 max x Größtwert

maßgebende Größe. Für die Schubtragfähigkeit und die Biegezugfestigkeit in Wandebene kann die Steinzugfestigkeit maßgebend werden. Es ist daher sehr hilfreich, etwas detailliertere Angaben im Vergleich zu den Normangaben zu erhalten. Bislang gilt, und dies ist in DIN EN 1996-1-1/NA [7] auch so von DIN 1053-1 [1] übernommen worden (2. Spalte der Tabelle 2), die Einteilung nach Hohlblocksteinen, Hochlochsteinen, Steinen mit Grifflöchern oder Griffaschen, Vollsteinen ohne Grifflöcher oder Griffaschen. Hinzugenommen wurde in DIN EN 1996-1-1/NA [7] der Porenbetonstein.

Die Prüfung der Zugfestigkeit ist relativ aufwendig. Eine Prüfnorm oder -richtlinie existiert zurzeit nicht (siehe aber [15]). Meist werden die Mauersteine in Richtung Steinlänge geprüft. Wesentliche Eigenschaftsunterschiede zwischen Steinlänge und -breite ergeben sich vor allem bei Lochsteinen mit richtungsorientierten Lochungen. Zugfestigkeitswerte in Richtung Steinbreite liegen nur für HLZ vor (8 Werte, Wertebereich $\beta_{z,b}/\beta_{D,st} = 0,003 \dots 0,026$, Mittelwert: 0,009). Sinnvollerweise werden die in Richtung Steinlänge bestimmten Zugfestigkeitswerte auf die in Richtung Steinhöhe geprüften Druckfestigkeitswerte bezogen als Verhältniswerte $\beta_{z,l}/\beta_{D,st}$ angegeben.

Tabelle 2 gibt den heutigen Stand der Auswertung [10, 16, 17] wieder.

Tabelle 2. Verhältniswerte Steinzug-/Steindruckfestigkeit

Steinart	$\delta_i = f_{bt,cal}/f_{st}$	Mauerstein	$\beta_{z,l}/\beta_{D,st,prüf}$ [10]		
	DIN EN 1996-1-1/NA [7]		Mittelwert	Wertebereich	Anzahl Versuchswerte
Hohlblocksteine	0,020	Hbl	0,08	0,05 ... 0,13	8
		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	0,026	HLz	0,03	0,13 ... 0,41	20
		LHLz	0,01	0,002 ... 0,019	54
		KS L	0,035	0,026 ... 0,055	19
Steine mit Grifflöchern und Griffaschen	0,026	KS(GL)	0,045	0,027 ... 0,065	24
Vollsteine ohne Griff-löcher oder Griffaschen	0,032	KS	0,063	0,039 ... 0,081	18
		Mz	0,04	0,01 ... 0,08	9
		V, Vbl	0,08	0,04 ... 0,21	23
		V2, Vbl2	0,11	0,06 ... 0,18	16
		V, Vbl ≥ 4	0,07	0,05 ... 0,09	7
Porenbeton	$\frac{0,082}{1,25} \cdot \frac{1}{0,7 + \left(\frac{f_{st}}{25}\right)^{0,5}}$	PB, PP	0,11	0,06 ... 0,19	24
		PB2, PP2	0,18	0,13 ... 0,20	7
		PB und PP 4, 6, 8	0,11	0,09 ... 0,13	8

$f_{bt,cal}$ rechnerische Steinzugfestigkeit nach DIN EN 1996-1-1/NA
 f_{st} umgerechnete mittlere Steindruckfestigkeit nach DIN EN 1996-1-1/NA
 $\beta_{z,l}$ Prüfwert der Steinzugfestigkeit in Richtung Steinlänge
 $\beta_{D,st,prüf}$ Prüfwert der Steindruckfestigkeit in Richtung Steinhöhe

Die beiden angeführten Verhältniswerte sind nicht direkt miteinander vergleichbar, da der Prüfwert jeweils noch mit Formbeiwerten zu versehen und näherungsweise beim Druck mit 0,8 und beim Zug mit 0,7 zu multiplizieren wäre, um auf die charakteristischen Werte zu kommen. Näherungsweise kann man aber die Verhältniswerte gleichsetzen (im Rahmen der hier vorliegenden Genauigkeit).

Für Vollsteine besteht wegen der versuchstechnisch sehr aufwendigen Bestimmung der einaxialen Längszugfestigkeit noch die Möglichkeit der Messung der Spaltzugfestigkeit. Allerdings gibt es für Mauersteine noch keinen einheitlichen Wert zur Umrechnung von der Spaltzugfestigkeit auf die Zugfestigkeit. Dieser Wert hängt erfahrungsgemäß von der Festigkeit ab. Näherungsweise gilt, dass das Verhältnis Spaltzugfestigkeit $\beta_{sz,l}$ zu Zugfestigkeit $\beta_{z,l}$ zwischen 1,1 und 1,3 liegt. Für Lochsteine ist nach Auffassung des Verfassers die Ermittlung der Spaltzugfestigkeit [18] aus Gründen des Spannungszustands nicht sinnvoll anzuwenden.

2.2 Verformungseigenschaften

2.2.1 Elastizitätsmodul senkrecht zur Lagerfuge unter Druckbeanspruchung

Der Elastizitätsmodul der Mauersteine beeinflusst die Steifigkeit des Mauerwerks maßgeblich, er muss in den Fällen, in denen sie eine Rolle spielt, im Einzelfall nachgewiesen werden.

Der E-Modul ist als Sekantenmodul bei 1/3 der Höchstspannung (Druckspannung senkrecht zu den Lagerfugen) und einmaliger Belastung definiert:

$$E_D = \frac{\max \sigma_D}{3 \cdot \varepsilon_1}$$

mit
 ε_1 Längsdehnung bei 1/3 $\max \sigma_D$

Nach [10] können für eine erste Abschätzung des Druck-E-Moduls folgende Beziehungen gewählt werden:

Kalksandstein: $E_D = 230 \cdot \beta_{D,St}$
 Porenbeton: $E_D = 700 \cdot \beta_{D,St}^{0,74}$

Es empfiehlt sich, bei den wenigen Einzelfällen, wo der Elastizitätsmodul des Mauerwerks für Nachweise benötigt wird, z. B. Durchbiegung bei Brückenüberbauten, den Elastizitätsmodul von Steinen vor dem Vermauern bzw. bei bestehenden Bauwerken mittels Probenentnahme zu bestimmen und eine rechnerische Abschätzung vorzunehmen, wozu allerdings eine sehr große Erfahrung erforderlich ist.

2.2.2 Elastizitätsmodul in Steinlängsrichtung unter Zugbeanspruchung

Der Elastizitätsmodul der Mauersteine unter Zugbeanspruchung liegt erfahrungsgemäß in der gleichen Größenordnung wie der unter Druckbeanspruchung. Geringe Abweichungen sind in der Nichtlinearität der Spannungs-Dehnungslinien der Steinmaterialien begründet. Der Zug-E-Modul ist analog zum Druck-E-Modul als Sekantenmodul bei 1/3 der Höchstspannung (Zugfestigkeit) und einmaliger Belastung definiert. Zwischen dem Elastizitätsmodul und der Steinzugfestigkeit wurden folgende Zusammenhänge ermittelt [10] (Best.: Bestimmtheitsmaß):

Kalksandsteine (Prismen; 13 Mittelwerte)
 $E_Z = 5800 \cdot \beta_{z,1}^{0,73}$ (Best.: 95%)

Leichtbetonsteine (V, Vbl, Hbl; Prismen; Prüfung in Steinlängsrichtung; 35 Einzelwerte, große Streuung)
 $E_Z = 6000 \cdot \beta_{z,1}$ (Best.: 77%)

Porenbetonsteine
 $E_Z = 3180 \cdot \beta_{z,1}$ (Best.: 78%)
 (Zylinder, Prismen; 21 Mittelwerte)

$E_Z = 1,01 \cdot E_D$ (Best.: 93%)
 (Zylinder; 11 Mittelwerte)

2.2.3 Spannungs-Dehnungslinie

In Bild 2 sind die Spannungs-Dehnungslinien von Ziegeln, Kalksandstein, Leichtbeton und Porenbeton, wie man sie am Vollmaterial ermittelt, beispielhaft dargestellt.

2.2.4 Querdehnungsmodul

Diese Kenngröße ist von maßgebender Bedeutung für die Drucktragfähigkeit von Mauerwerk. Bei einem ungünstigen Verhältnis der Querdehnungsmoduln von Mörtel und Stein wird letzterer stärker auf Zug beansprucht, was die Druckfestigkeit des Mauerwerks reduziert. Nach [10] können die Wertebereiche aus Tabelle 3

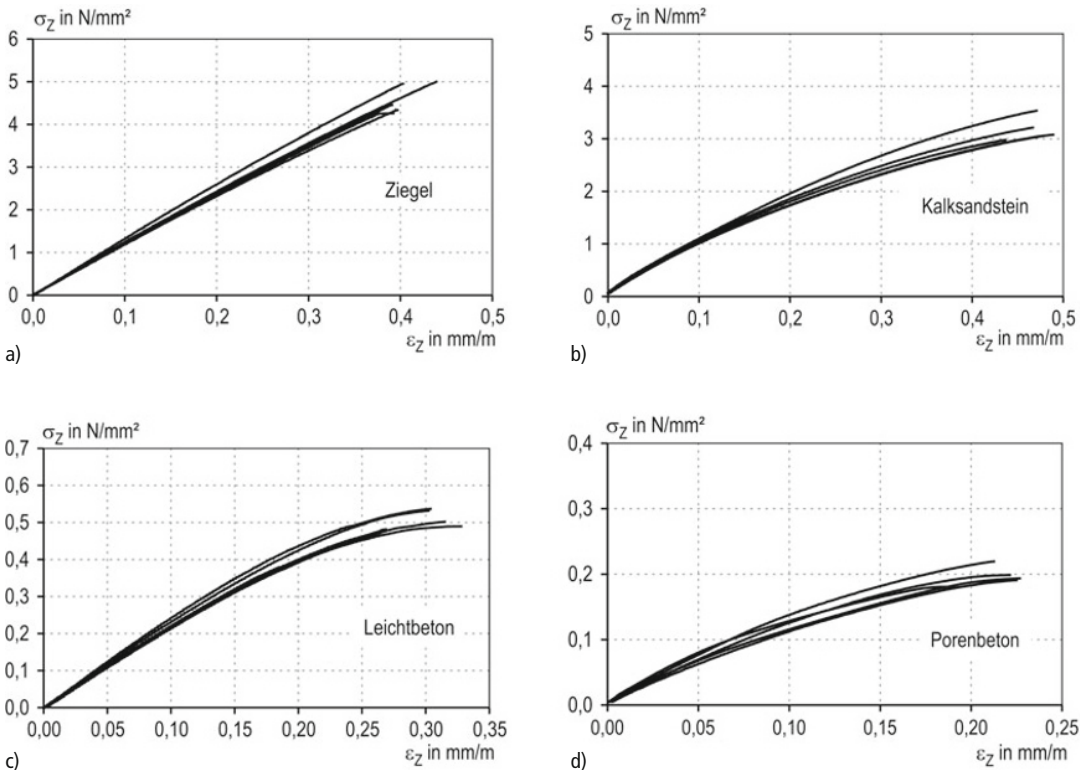


Bild 2. Spannungs-Dehnungslinien von a) Ziegel, b) Kalksandstein, c) Leichtbeton und d) Porenbeton

Tabelle 3. Mauersteine; Querdehnungsmodul $E_{q,I}$ in 10^3 N/mm^2 , Querdehnungszahl μ , Anhaltswerte [19–22], aus [10]

Mauerstein	Festigkeitsklasse	$E_{q,I}$		μ
		n	Wertebereich	
Hbl, Vbl	2 ... 6	8	3,6 ... 20	0,08 ... 0,11
PB, PP	2 ... 6	7	5,6 ... 25	0,15
KS, KS L, KSHbl	8 ... 28	12	12 ... 100	
HLZ	6	4	2,7 ... 40	0,11 ... 0,20
	8	8	12 ... 59	
	12	4	31 ... 55	
	48	–	133	

n Anzahl der Versuchswerte

für den Querdehnungsmodul von Mauersteinen angegeben werden.

2.3 Dehnung aus Schwinden und Quellen, thermische Ausdehnungskoeffizienten

Für die Steinmaterialien selbst werden eher selten Formänderungswerte aus lastunabhängiger Beanspruchung angegeben, siehe z. B. [23, 24]. Bei einem Verbundwerkstoff wie Mauerwerk hängen Formänderungswerte sehr stark ab von den jeweiligen Anteilen; z. B. schwindet großformatiges Mauerwerk mit Dünnbettfuge anders als kleinformatiges mit Dickbettfuge. Für Abschätzungen wird daher auf Abschnitt 5.6.5 verwiesen.

3 Eigenschaftswerte von Mauermörteln

3.1 Allgemeines

Mauermörtel wird durch den Kontakt mit den Steinen in mehr oder weniger starkem Umfang beeinflusst. In aller Regel wird dem Mörtel Wasser entzogen, sodass nach einer gewissen Phase der Konsolidierung – entspricht quasi einer echten Reduktion des Wasserzementwerts – der Wasserentzug leere Poren hinterlässt, die sich festigkeitsmindernd auswirken. Insofern können Eigenschaftswerte, die an nicht beeinflusstem Mörtel ermittelt werden, für weiterführende Analysen und Abschätzungen meist nicht verwendet werden. Die zur Verfügung stehenden Daten werden nachfolgend aufgeführt und sind [10] entnommen.

3.2 Festigkeitseigenschaften

3.2.1 Zugfestigkeit β_Z

Für Normalmörtel ergab sich mit 33 Versuchswerten (Mittelwerte) der folgende Zusammenhang zur Druckfestigkeit β_D :

$$\beta_Z = 0,11 \cdot \beta_D \quad (\text{Best.: } 91 \%)$$

3.2.2 Scherfestigkeit β_S

Die Scherfestigkeit von Mauermörtel ist definiert als maximale Spannung bei einschrittiger Scherbeanspruchung. Ein genormtes Prüfverfahren existiert nicht. Üblicherweise wird die Scherfestigkeit an nach DIN EN 1015 hergestellten Mörtelprismen $160 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ geprüft. Dabei wird das Prisma senkrecht zur Prismenlängsachse auf Scheren beansprucht. Die Scherfestigkeit von Mauermörtel ist z. B. von Interesse bei der rechnerischen Berücksichtigung von mit Mauermörtel verfüllten Mauersteinkanälen (Verfüllziegel-Mauerwerk) und beim rechnerischen Nachweis von Verankerungen mit Haken, z. B. bei zweischaligem Mauerwerk.

Mit den für diese Auswertung vorliegenden 11 Versuchswerten für Werk-Trockenmörtel, Werk-Frischmörtel und Rezeptmörtel ergeben sich folgende Zusammenhänge zwischen der Scherfestigkeit β_S und der Normmörteldruckfestigkeit β_D , ermittelt nach DIN EN 1015-11 [25] (Bereich für β_D : 4 bis 18 N/mm^2):

$$\beta_S = 0,55 \cdot \beta_D^{0,68} \quad (\text{Best.: } 89 \%)$$

$$\beta_S = 0,25 \cdot \beta_D \quad (\text{Best.: } 76 \%)$$

Die Auswertung einer Vielzahl von Festigkeitsprüfungen in [26] ergab

$$\beta_S = 0,71 \cdot \beta_D^{0,57}$$

$$\beta_S = 2 \cdot \beta_Z$$

3.3 Verformungseigenschaften

3.3.1 E-Modul (Längsdehnungsmodul) E

Der E-Modul wird in der Regel nach DIN 18555-4 [29] zusammen mit dem Querdehnungsmodul ermittelt. Nach den vorliegenden Versuchsergebnissen lassen sich folgende Beziehungen zwischen E und der Normdruckfestigkeit β_D angeben [30] (s. auch Bild 3):

a) Normalmauermörtel

$$E = 2100 \cdot \beta_D^{0,7} \text{ bzw. } E \leq 700 \cdot \beta_D$$

b) Leichtmauermörtel mit Gesteinskörnungen aus Blähton

$$E = 1200 \cdot \beta_D^{0,6}$$

c) Leichtmauermörtel mit Gesteinskörnungen aus Perliten

$$E = 1200 \cdot \beta_D^{0,4}$$

3.3.2 Querdehnungsmodul E_q

Ist der Querdehnungsmodul des Mauermörtels deutlich kleiner als der des Steins, 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 der Fall.

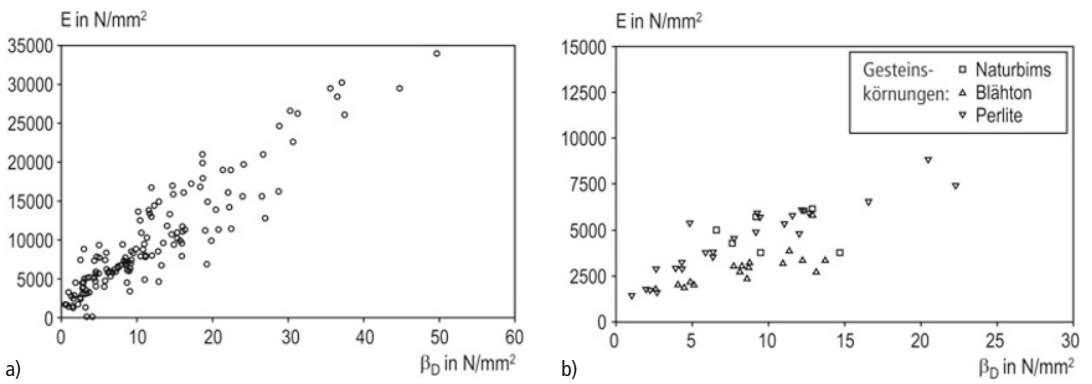


Bild 3. Mauermörtel; Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Normdruckfestigkeit β_D [10]; a) Normalmörtel, b) Leichtmörtel

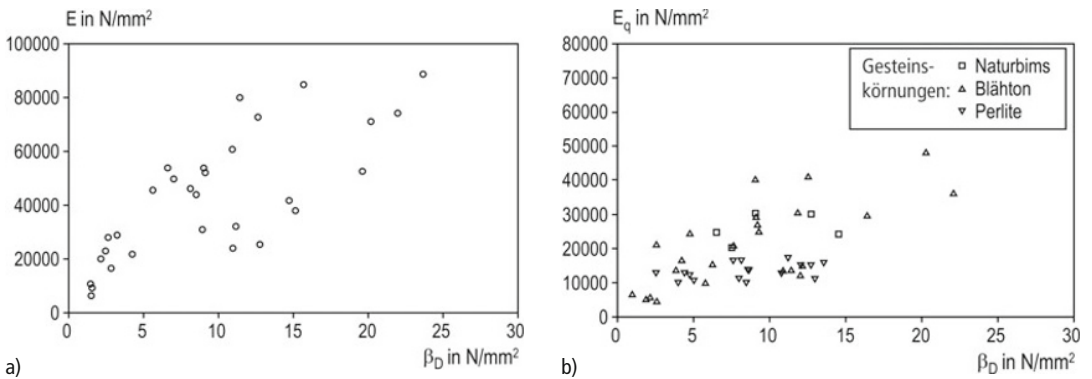


Bild 4. Mauermörtel; Querdehnungsmodul E_q in Abhängigkeit von der Normdruckfestigkeit β_D [10]; a) Normalmörtel, b) Leichtmörtel

Ein Zusammenhang zwischen E_q und der Normdruckfestigkeit β_D kann jeweils nur für Mörtel mit gleicher Gesteinskörnung (gefügedichter Sand, Blähton, Naturbims, Perlite usw.) erwartet werden (Bild 4).

In Tabelle 4 sind E_q -Werte angegeben. Für Leichtmauermörtel wurde der Zusammenhang zwischen Quer- und Längsdehnungsmodul (bei allerdings großer Streuung)

$$E_q = 4,92 \cdot E \quad (\text{Best.: } 67\%)$$

ermittelt.

3.3.3 Feuchtedehnung (Schwinden ϵ_s)

Das Schwinden des Mauermörtels kann die Rissicherheit von Mauerwerk beeinflussen. Schnelles und starkes Schwinden führt gelegentlich im oberflächennahen Bereich zum Ablösen des Fugenmörtels vom Mauerstein. Das Schwinden kann nach DIN 52450 [31] an gesondert in Stahlschalung hergestellten Mörtelprismen ermittelt werden. Der Mörtel im Mauerwerk schwindet in der Regel weniger, weil der Mauerstein dem Mörtel einen Teil des Anmachwassers entzieht. Quantitative Aussagen dazu liegen bislang nicht vor.

Tabelle 4. Mauermörtel; Querdehnungsmodul E_q [27], aus [10]

Mörtelart	n	ρ_d	β_D	E_q
		kg/dm ³	N/mm ²	10 ³ N/mm ²
Normalmörtel	49	1,1 ... 1,9	1,5 ... 24	1,2 ... 116
Dünnbettmörtel	5	1,4 ... 1,6	14 ... 21	36 ... 49
Leichtmörtel LM 21 (Zuschlag: Polystyrol, Perlite, Naturbims)	23	0,6 ... 0,8	8,4 ... 11,6	6,7 ... 15
Leichtmörtel LM 36 (Zuschlag: Blähton, Naturbims, Blähschiefer)	36	0,8 ... 1,2	4,0 ... 21	16 ... 48

n Anzahl Versuchswerte
 ρ_d Trockenrohdichte
 β_D Normdruckfestigkeit

Tabelle 5. Mauermörtel; Endschwindwerte ϵ_{500r}
Normamörtel [28] – Anhaltswerte

Relative Luftfeuchte %	Rechenwerte	Wertebereich
	mm/m	
30	1,2	0,7 ... 2,0
50	0,9	0,5 ... 1,5
65	0,8	0,5 ... 1,5
80	0,5	0,2 ... 1,0

Schwindwerte ϵ_{500r} (rechnerische Endwerte) für Normalmauermörtel sind in der Tabelle 5 in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte des Schwindklimas angegeben. Endschwindwerte von Leichtmörteln können je nach verwendetem Leichtzuschlag bis etwa doppelt so groß sein.

3.3.4 Kriechen (Kriechzahl ϕ)

Das Kriechen kann wie das Schwinden die Rissicherheit von Mauerwerk beeinflussen. Es wird in analoger Weise wie bei Beton ermittelt. Für im Alter von 7 d mit einer Kriechspannung von etwa 1/3 der Prismendruckfestigkeit belastete Mörtelprüfkörper ergaben sich Endkriechzahlen ϕ_{∞} im Bereich von rd. 5 bis 15, im Mittel von etwa 10 [32]. Auch hier gilt – wie beim Schwinden – dass sich das Kriechen des Mauermörtels im Mauerwerk wesentlich von dem der Mörtelprismen unterscheidet.

4 Verbundeigenschaften zwischen Stein und Mörtel

4.1 Allgemeines

Nahezu alle Festigkeitseigenschaften von Mauerwerk hängen von dem Verbund zwischen Stein und Mörtel ab. Erst wenn die Verbundfestigkeiten sehr hoch werden, kommt die Steinzugfestigkeit zum Tragen. In Abhängigkeit der Mörtelart und der Mörtelgruppe sind in DIN V 18580 [33] Mindestanforderungen an die Verbundfestigkeit im Alter von 28 Tagen angegeben. Geprüft wird die Haftscherfestigkeit entweder nach DIN 18555-5 [34] oder nach dem europäischen Verfahren in DIN EN 1052-3 [35]. Eine sehr detaillierte Zusammenfassung von Prüfmethoden und Kennwerten wurde in [17] veröffentlicht. In [37] wird auf die Beanspruchungsarten spezifisch eingegangen.

4.2 Haftscherfestigkeit

Das Institut für Bauforschung der RWTH Aachen hat im Rahmen eines Forschungsprojekts [38] eine sehr umfassende Auswertung von Haftscherfestigkeitsuntersuchungen durchgeführt und damit verdeutlicht,

dass eine Differenzierung zwischen unterschiedlichen Stein-/Mörtelkombinationen bezüglich der tatsächlichen Werte sehr sinnvoll ist (s. Tabellen 6a–e).

In Tabelle 7 sind Anhaltswerte für die Haftscherfestigkeit angegeben. Dabei wurden die Versuchsergebnisse nach EN-Verfahren mit dem Faktor 2 multipliziert – in etwa ist dies zulässig, um auf den Wert nach dem DIN-Verfahren schließen zu können.

Bei der Biegezugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen kann zur Abschätzung der Biegezugfestigkeit bei Fugenversagen ersatzweise die Haftscherfestigkeit angesetzt werden (s. Abschnitt 5.5), obwohl hier die Drehbewegung des Steins einer Torsionsbeanspruchung entspricht. In [17] und [39] wird darauf speziell eingegangen.

4.3 Haftzugfestigkeit

Dieser Kennwert ist u. a. für die Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen von Relevanz. Tabelle 8 ist [10] entnommen und stellt die aktuellen Daten dar. Eine deutsche Prüfnorm bzw. -richtlinie existiert derzeit nicht. Zwei häufig angewendete Prüfverfahren – die zentrische Beanspruchung und das sogenannte Bondwrench-Prüfverfahren – sind in [15] (s. auch [40]) beschrieben.

5 Eigenschaftswerte von Mauerwerk

5.1 Allgemeines

Die Eigenschaftswerte von Mauerwerk können aufgrund seiner ausgeprägten Anisotropie und Heterogenität in Abhängigkeit der zahlreichen in der Praxis vorkommenden Stein-Mörtel-Kombinationen sehr unterschiedlich sein und weichen zudem teilweise deutlich von denen anderer Baustoffe ab. Ähnlich wie Beton ist auch Mauerwerk ein Baustoff, der sich in erster Linie für druckbeanspruchte Bauteile eignet. Die Beanspruchbarkeit auf Zug, Biegezug und Schub ist wesentlich geringer als die auf Druck. Mauerwerk wird daher in erster Linie zum Abtrag von vertikalen Lasten herangezogen. Die nachfolgenden Abschnitte enthalten eine Übersicht über die für die unterschiedlichen Beanspruchungen maßgebenden Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Mauerwerk.

5.2 Druckfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen

5.2.1 Experimentelle Bestimmung

Die Druckfestigkeit von Mauerwerk senkrecht zu den Lagerfugen kann sowohl experimentell als auch rechnerisch ermittelt werden.

Bei der experimentellen Bestimmung der Mauerwerkdruckfestigkeit werden kleine (sogenannte RILEM) Mauerwerkwände durch vertikale Lasten senkrecht zu den Lagerfugen gleichmäßig bis zum Bruch belas-

Tabelle 6a. Kalksandsteine; Haftscherfestigkeit β_{HS}

Mauerstein	Mauermörtel	PV	n (n_i)	h_m	min \bar{x}	max \bar{x}	\bar{x}
				M.-%			
KS-Referenz	NM II	DIN	3 (> 15)	3,0 ... 12,1 ¹⁾	0,10	0,40	0,23
		EN	2 (9)	3,0 ... 12,1	0,10	0,24	0,17
	NM IIa	DIN	23 (> 129)	4,0 ... 11,3 ¹⁾	0,02	0,60	0,19
		EN	10 (49)	5,5 ... 11,3 ¹⁾	0,03	0,27	0,10
	NM IIIa	DIN	6 (30)	2,3 ... 11,5	0,27	0,67	0,42
		EN	2 (10)	2,3 ... 11,5	0,21	0,60	0,41
	LM 21	DIN	3 (> 14)	5,1 ¹⁾	0,37	0,58	0,47
		EN	–	–	–	–	–
	LM 36	DIN	3 (30)	5,0 ¹⁾	0,12	0,82	0,43
		EN	–	–	–	–	–
DM	DIN	21 (170)	3,4 ... 5,0 ¹⁾	0,37	1,68	0,94	
	EN	–	–	–	–	–	
KS (ohne Referenz)	NM II	DIN	1 (– ²⁾)	1,8	–	–	0,06
		EN	4 (40)	14,4	0,16	0,64	0,37
	NM IIa	DIN	21 (> 76)	1,8 ... 3,2 ¹⁾	0,01	0,51	0,20
		EN	21 (> 67)	1,8 ... 10,5 ¹⁾	0,02	0,31	0,13
	NM III	DIN	2 (– ²⁾)	1,8 ... 3,2	0,04	0,07	0,06
		EN	13 (> 27)	1,5 ... 13,2 ¹⁾	0,03	0,35	0,16
	LM 21	DIN	2 (10)	3,2 ... 12,1	0,36	1,64	1,00
		EN	2 (10)	3,2 ... 12,1	0,27	1,10	0,69
	DM	DIN	8 (45)	3,9 ... 6,7 ¹⁾	0,46	1,07	0,78
		EN	12 (56)	2,7 ... 6,8 ¹⁾	0,10	0,90	0,43

1) Feuchtegehalte liegen nicht bei allen Versuchsserien vor.

2) Anzahl der Einzelwerte nicht bekannt.

PV	Prüfverfahren
n	Anzahl der Versuchsserien
(n_i)	Anzahl der Einzelwerte
h_m	Feuchtegehalt der Mauersteine
min \bar{x}	kleinster Mittelwert
max \bar{x}	größter Mittelwert
\bar{x}	Mittelwert

tet. Alternativ kann die vertikale Beanspruchbarkeit auch aus der Druckprüfung von geschosshohen Wandprüfkörpern hergeleitet werden. Die Mauerwerkdruckfestigkeit errechnet sich dabei in beiden Fällen aus der im Versuch ermittelten Höchstlast und der belasteten Mauerwerkquerschnittsfläche. Bei der Prüfung können durch kontinuierliche Verformungsmessungen (z. B. mit induktiven Wegaufnehmern) auch die Spannungs-Dehnungslinien und der Druck-E-Modul (siehe Abschnitt 5.6.2.1) mit bestimmt werden. Die Prüfung ist in der europäischen Norm DIN EN 1052-1 [41] beschrieben.

5.2.2 Rechnerische Bestimmung

Es ist inzwischen hinlänglich bekannt, dass die Druckfestigkeit von Mauerwerk nicht nur von den Festigkeitseigenschaften seiner Ausgangsstoffe abhängt, sondern von einer Vielzahl weiterer Parameter, u. a. den horizontalen Formänderungsunterschieden von Mauerstein und Mauermörtel sowie der hygrischen Wechselwirkung zwischen dem Wasserabsaugverhalten des Steins und dem Wasserrückhaltevermögen des Mörtels, beeinflusst wird. Ein theoretisch begründetes und abgesichertes Ingenieurmodell zur rechnerischen