

Mauerwerk

Bemessung nach DIN 1053-100

Wolfram Jäger, Gero Marzahn

Wolfram Jäger, Gero Marzahn
Mauerwerk
Bemessung nach DIN 1053-100

Mauerwerk

Bemessung nach DIN 1053-100

Wolfram Jäger, Gero Marzahn

Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger
Wichernstraße 12
01445 Radebeul

Dr.-Ing. Gero Marzahn
Landesbetrieb Straßenbau NRW
Betriebssitz
Abt. Konstruktiver Ingenieurbau
Wildenbruchplatz 1
45888 Gelsenkirchen

Titelbild: Frauenkirche Dresden
Foto: Jörg Schöner, Dresden

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.

ISBN: 978-3-433-01832-3

© 2010 Ernst & Sohn
Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten.
Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgend-
einer Form – durch Fotokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren –
reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungs-
maschinen, 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 photoprint, 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 Kenn-
zeichen 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
nicht eigens als solche markiert sind.

Umschlaggestaltung: eiche.eckert° | Werbeagentur, Kappelrodeck
Druck und Bindung: Scheel Print-Medien GmbH, Waiblingen-Hohenacker

Printed in Germany

**Den Wegbereitern des Ingenieurmauerwerks
Walther Mann und Kurt Kirtschig
gewidmet**

Vorwort

DIN 1053-100 hat die Bemessung und Nachweisführung für Mauerwerk nach dem Teilsicherheitskonzept zum Inhalt. Mit der bauaufsichtlichen Einführung der Norm darf nunmehr auch Mauerwerk im Einklang mit dem europäischen Vorgehen nach der semiprobabilistischen Sicherheitsphilosophie rechnerisch ausgelegt werden. Die Lücke zu den anderen Bauweisen, die bereits umgestellt haben, wurde damit geschlossen.

An der Erarbeitung der DIN 1053-100 waren die Mitglieder des Arbeitsausschusses „Rezept- und Ingenieurmauerwerk“ des Deutschen Instituts für Normung (DIN) e. V. sowie der Unterausschüsse „Baustoffe“ und „Bemessung“ beteiligt. Sie wurde noch unter der Obmannschaft von Prof. *Walther Mann* begonnen und 2007 von seinem Nachfolger Prof. *Wolfram Jäger* abgeschlossen. Inzwischen ist die Norm in den meisten Bundesländern bauaufsichtlich eingeführt worden und steht somit zur allgemeinen Anwendung zur Verfügung.

Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass für die Konstruktion und die Ausführung nach wie vor DIN 1053-1:1996-11 gilt und deshalb bauordnungsrechtlich weiterhin anwendbar bleibt. Für die Bemessung und die Nachweisführung kann sich der Planer jedoch alternativ zwischen den zwei Bemessungsverfahren nach

- 1) DIN 1053-1:1996-11 oder nach
- 2) DIN 1053-100:2007-09

entscheiden. Allerdings besteht wegen der unterschiedlichen Sicherheitsphilosophien ein striktes Mischungsverbot zwischen den Bemessungsregeln der beiden Normen. Auch wenn wir kurz vor der Einführung der europäischen Bemessungsnormen in Deutschland stehen, wird die DIN 1053-100 noch lange Bestand haben und nicht so schnell abgelöst werden können, wie die Erfahrung der beiden zurückliegenden Dezennien lehrt. Der Grund dafür ist, dass noch kein konsensfähiger Nationaler Anhang vorliegt, der dann auch noch des normalen Normungsdurchlaufes beim DIN e.V. bedürfte. In diesem Zusammenhang ist die Überarbeitung der DIN 1053-1 zu sehen, die im Ergebnis das Paket der Regelungen nach Eurocode 6, der Nationalen Parameter und der nicht im Widerspruch stehenden, ergänzenden Regelungen sowie anders zu lösender Problempunkte liefern soll. Die DIN 1053-100 ist ein erster Schritt, um zukünftig durchgängig semiprobabilistisch ein Gebäude bemessen zu können. Alle Nachweise sind auf die europäisch übliche Vorgehensweise und Nachweisformate umgestellt worden. Die Methodik folgt der des EC 6, sodass eine spätere Umstellung problemlos möglich ist.

Die deutschen und auch die europäischen Regeln zur Bemessung von Mauerwerk sind eng mit dem Wirken der Professoren *Walther Mann* und *Kurt Kirtschig* verbunden. Mit ihren Arbeiten bereiteten sie die wissenschaftliche Grundlage der heutigen Bemessungsnorm vor und gaben damit dem Mauerwerksbau ein solides Fundament für seine zukünftige Entwicklung und für den Wettbewerb mit den anderen Bauweisen.

Das vorliegende Buch zur Bemessung von Mauerwerk nach DIN 1053-100 vermittelt nicht nur den Norminhalt und die praktische Umsetzung, sondern beleuchtet auch den

wissenschaftlichen Hintergrund und die Wege, die zu den entstandenen oder weiterentwickelten Regelungen geführt haben. Damit ist die Grundlage für das Verständnis und für die zukünftige Fortschreibung der Norm gegeben.

Eingehend widmet sich das Buch den mechanischen Eigenschaften von Mauersteinen, Mauermörteln und Mauerwerk sowie den Grundlagen der Tragwerksgestaltung, Bemessung und Nachweisführung von Mauerwerksstrukturen. Die mathematischen und mechanischen Voraussetzungen werden ebenso erläutert wie die notwendigen baustofflichen und normungstechnischen Aspekte. Betrachtungen zur Erdbebensicherheit und ein gesonderter Abschnitt zum Natursteinmauerwerk ergänzen die Ausführungen. Zur Festigung des Verständnisses dienen viele einzelne Beispielrechnungen sowie ein nach dem vereinfachten Verfahren durchgearbeitetes komplexes Bemessungsbeispiel, das eine Brücke zur täglichen Praxis schlagen soll. Weitere Beispiele müssen ebenso wie eine durchgängige Nachweisführung eines Mauerwerkbaus gegenüber Erdbeben online bereitgestellt werden, um den Umfang des Buches noch in Grenzen halten zu können.

Das Buch wendet sich nicht nur an Studierende, sondern auch an Tragwerksplaner, Prüfingenieure, Sachverständige, Forscher und Lehrer sowie weitere am Mauerwerksbau Interessierte. Dem Leser wird ein wissenschaftliches Handwerkszeug gegeben, das es ihm ermöglichen soll, das Verhalten von Mauerwerk besser zu verstehen und das Wissen in der Praxis optimal und effektiv einzusetzen.

Das Titelbild dieses Buches zeigt das südliche Tympanon der in den Jahren 1994 - 2005 wiedererrichteten Dresdner Frauenkirche als Symbol für die Tradition des Mauerwerksbaus und für die Möglichkeiten, die wir mit seiner ingenieurmäßigen Durchdringung erschließen können. Das Bauwerk stellt nicht den Regelfall der Mauerwerksanwendung dar. Es demonstriert aber die Leistungsfähigkeit des Materials, der Bauweise und nicht zuletzt der semiprobabilistischen Bemessungsmethode. Noch weit vor seiner Einführung im deutschen Mauerwerksbau wurde dieses Vorgehen von den beteiligten Ingenieuren vorgeschlagen und vom Prüflingenieur akzeptiert. Die eigens für das Vorhaben entwickelte Mauerwerksrichtlinie erst machte es möglich, das wieder aufzubauen, was vorher 200 Jahre Bestand hatte. Aufgrund der Spezifik des Vorhabens konnten mit dem semiprobabilistischen Konzept - damals jedoch noch ohne Spannungsrechteck - Vorteile erwirtschaftet werden.

Die Fertigstellung des vorliegenden Fachbuches war nur durch die umfangreiche Unterstützung und die Geduld eines ganzen Teams möglich. Stellvertretend danken wir an dieser Stelle Frau Dipl.-Ing. (FH) *Anke Eis* ganz herzlich für ihre unermüdliche Mitwirkung sowie dem Verlag Ernst & Sohn für die beständige Förderung des Themas Mauerwerk.

Wir wünschen Ihnen, liebe Leser, dass Sie auf den nachfolgenden Seiten Antworten auf Ihre Fragen zur Bemessung von Mauerwerk finden und in der Folge (noch) mehr mit Mauerwerk planen und bauen.

Wolfram Jäger, Dresden/Radebeul
Gero Marzahn, Essen

November 2009

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	VII
1 Einführung	1
1.1 Geschichte und Entwicklung	1
1.2 Literatur zu Kapitel 1	5
2 Mauerwerksbauten	7
2.1 Übersicht.....	7
2.2 Anforderungen an Wandkonstruktionen aus Mauerwerk	15
2.2.1 Raumabschluss und Schutz des Menschen sowie von Sachwerten	15
2.2.2 Statische Anforderungen	16
2.2.3 Ästhetische und gestalterische Anforderungen.....	16
2.2.4 Ausführung	17
2.2.5 Nachhaltigkeit.....	17
2.3 Klassifizierung von Wandkonstruktionen.....	18
2.3.1 Strukturierung.....	18
2.3.2 Einschaliges Mauerwerk.....	19
2.3.3 Zweischaliges Mauerwerk	20
2.4 Verbände und Verbandsregeln.....	21
2.4.1 Grundlegende Verbandsregeln	22
2.4.2 Wesentliche Verbände	23
2.5 Literatur zu Kapitel 2.....	26
3 Normen und Sicherheitskonzept	29
3.1 Entwicklung der Normen für die Berechnung von Mauerwerk.....	29
3.1.1 Geschichtlicher Überblick	29
3.1.2 Aktueller Stand der Normung.....	29
3.2 Semiprobabilistisches Sicherheitskonzept	31
3.2.1 Grenzzustände	31
3.2.2 Zuverlässigkeitsbetrachtungen.....	32
3.2.3 Versagenswahrscheinlichkeit im Bauwesen und ihre Verteilung	33
3.3 Das Nachweisformat von DIN 1053-100.....	49
3.3.1 Allgemeines	49
3.3.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)	50
3.3.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG).....	53
3.3.4 Einwirkungen.....	53
3.3.5 Tragwiderstand	54
3.3.6 Begrenzung der planmäßigen Exzentrizitäten	55
3.4 Normen für Mauerwerk	59
3.5 Normen für die Einzelkomponenten	60
3.5.1 Europäische Produktnormen.....	60
3.5.2 Mauersteine und Mauermörtel.....	65
3.5.3 Ergänzungsbauteile.....	73

3.5.4	Bauaufsichtliche Zulassungen.....	74
3.6	Literatur zu Kapitel 3	75
4	Baustoffe und ihre Eigenschaften	79
4.1	Einführung	79
4.2	Mauersteine.....	79
4.2.1	Allgemeines	79
4.2.2	Mauerziegel	83
4.2.3	Kalksandsteine.....	89
4.2.4	Porenbetonsteine	92
4.2.5	Beton- und Leichtbetonsteine	94
4.2.6	Hüttensteine	97
4.3	Mauermörtel.....	98
4.3.1	Allgemeines	98
4.3.2	Normalmörtel (NM).....	100
4.3.3	Leichtmauermörtel (LM)	101
4.3.4	Mittelbettmörtel (MM).....	102
4.3.5	Dünnbettmörtel (DM)	103
4.3.6	Vormauermörtel (VM).....	104
4.4	Mauerwerk	105
4.4.1	Aufgaben des Mauerwerks.....	105
4.4.2	Festigkeitsverhalten von Mauerwerk	105
4.4.3	Verformungsverhalten von Mauerwerk	106
4.4.4	Spannungs-Dehnungs-Beziehung, Elastizitätsmodul.....	108
4.4.5	Verhalten gegenüber Feuchtigkeit	112
4.4.6	Zwängungen im Mauerwerk	113
4.5	Literatur zu Kapitel 4	119
5	Mechanische Festigkeit von Mauerwerk	123
5.1	(Zentrische) Druckfestigkeit	123
5.1.1	Bruchmechanismus von zentrisch gedrücktem Mauerwerk	123
5.1.2	Bestimmung der Druckfestigkeit	126
5.1.3	Normative Regelungen zur Druckfestigkeit von Mauerwerk	128
5.1.4	Druckfestigkeit parallel zu den Lagerfugen	134
5.2	Einzellasten und Teilflächenpressung.....	135
5.2.1	Grundlagen.....	135
5.2.2	Normative Regelungen	138
5.3	Zugfestigkeit von Mauerwerk.....	142
5.3.1	Allgemeines	142
5.3.2	Zugfestigkeit parallel zur Lagerfuge.....	144
5.3.3	Zugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge.....	153
5.4	Biegezugfestigkeit.....	154
5.4.1	Allgemeines	154
5.4.2	Biegezugfestigkeit parallel zur Lagerfuge	155
5.4.3	Biegezugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge	161
5.5	Schubfestigkeit.....	164
5.5.1	Allgemeines	164

5.5.2	Arten der Schubbeanspruchung.....	164
5.5.3	Bruchmechanismus beim Scheibenschub.....	164
5.5.4	Bruchmechanismus und Bemessung beim Plattenschub.....	176
5.6	Literatur zu Kapitel 5.....	177
6	Ermittlung der Schnittgrößen und Formänderungen	181
6.1	Vorgehen.....	181
6.1.1	Ingenieurmäßige Modellbildung.....	184
6.1.2	Komplexe Modellbildung.....	186
6.1.3	Lastkombinatorik.....	188
6.2	Grundsätze bei der Ermittlung von Schnittgrößen.....	188
6.2.1	Wandabmessungen und Systemgrößen.....	188
6.2.2	Schlitze und Öffnungen in Wänden.....	190
6.2.3	Mitwirkende Breite von zusammengesetzten Querschnitten.....	191
6.2.4	Begrenzung der planmäßigen Exzentrizität.....	194
6.3	Ermittlung der Schnittgrößen im vereinfachten Nachweisverfahren.....	195
6.3.1	Auflagerkräfte aus Decken.....	196
6.3.2	Knotenmomente.....	196
6.3.3	Wind.....	197
6.4	Ermittlung der Schnittgrößen im genaueren Verfahren.....	197
6.4.1	Auflagerkräfte aus Decken.....	198
6.4.2	Knotenmomente.....	198
6.4.3	Vereinfachte Berechnung der Knotenmomente.....	199
6.4.4	Begrenzung der Knotenmomente.....	201
6.4.5	Wandmomente und Windlasten.....	201
6.5	Grundsätze bei der Berechnung der Formänderungen.....	202
6.6	Literatur zu Kapitel 6.....	204
7	Räumliche Aussteifung	207
7.1	Allgemeines.....	207
7.2	Anordnung der vertikalen Aussteifungselemente.....	208
7.3	Aussteifende Wände.....	210
7.4	Horizontale Einwirkungen.....	212
7.5	Horizontale Lasten auf Wandscheiben.....	213
7.6	Räumliche Steifigkeit gemauerter Gebäude.....	216
7.7	Beispiel einer Aussteifungsrechnung.....	217
7.7.1	Festlegungen.....	217
7.7.2	Windlasten.....	218
7.7.3	Schiefstellungslasten.....	219
7.7.4	Steifigkeitskennwerte des Systems.....	221
7.7.5	Torsion infolge exzentrischer Windeinwirkung.....	222
7.7.6	Aufteilung der Windkraft auf die Einzelscheiben „j“ je Deckenebene „i“.....	223
7.7.7	Aufteilung der Horizontalkraft infolge Schiefstellung auf die Einzelscheiben „j“ je Deckenebene „i“.....	227
7.7.8	Ermittlung der Schnittgrößen der Wandscheiben.....	227
7.8	Literatur zu Kapitel 7.....	230

8	Grundlagen der Bemessung	233
8.1	Grundlegende Nachweisverfahren	233
8.1.1	Vereinfachtes Nachweisverfahren	233
8.1.2	Genauerer Nachweisverfahren	233
8.2	Übergang auf die Kraftebene	234
8.3	Zentrische und exzentrische Druckbeanspruchung	236
8.3.1	Grundlagen	236
8.3.2	Bemessungswert der einwirkenden Normalkraft	249
8.3.3	Querschnittstragfähigkeit	251
8.4	Berücksichtigung von Einflüssen aus Theorie II. Ordnung	256
8.4.1	Grundlagen zum Knickverhalten	256
8.4.2	Lösung des Knickproblems für Mauerwerk	263
8.4.3	Lösung in DIN 1053-100:2007-09	293
8.4.4	Knicklängen	294
8.5	Schubbeanspruchung	299
8.5.1	Grundlagen	299
8.5.2	Nachweisformat	302
8.5.3	Bemessungswert der Schubbeanspruchung	303
8.5.4	Querkrafttragfähigkeit	303
8.6	Zug- und Biegezugbeanspruchung	307
8.6.1	Grundlagen	307
8.6.2	Nachweis	308
8.7	Literatur zu Kapitel 8	308
9	Vereinfachtes Nachweisverfahren	315
9.1	Anwendungsgrenzen	315
9.2	Aussteifung und Knicklänge von Wänden	316
9.2.1	Grundlagen	316
9.2.2	Knicklängen	316
9.3	Zentrische und exzentrische Druckbeanspruchungen	317
9.3.1	Grundlagen	317
9.3.2	Abminderungsfaktoren für exzentrische Beanspruchungen und Knicken	318
9.3.3	Außergewöhnliche Einwirkungen auf Wände	329
9.3.4	Beispiel Außenwand	331
9.4	Einzellasten und Teilflächenpressung	335
9.5	Zug- und Biegezugbeanspruchung	336
9.5.1	Grundlagen	336
9.5.2	Charakteristische Zug- und Biegezugfestigkeit	336
9.6	Schubbeanspruchung	337
9.6.1	Grundlagen	337
9.6.2	Charakteristische Schubfestigkeit	337
9.6.3	Beispiel Schubwand	338
9.7	Literatur zu Kapitel 9	345
10	Genauerer Nachweisverfahren	347
10.1	Allgemeines	347

10.2	Aussteifung und Knicklänge.....	347
10.2.1	Grundlagen	347
10.2.2	Knicklängen	347
10.3	Zentrische und exzentrische Druckbeanspruchung.....	348
10.3.1	Grundlagen	348
10.3.2	Abminderungsfaktor Φ_1 bei vorwiegender Biegebeanspruchung.....	348
10.3.3	Abminderungsfaktor Φ bei geschosshohen Wänden	348
10.3.4	Außergewöhnliche Einwirkungen auf Wände	351
10.3.5	Nachweis der Knicksicherheit	351
10.3.6	Beispiel Außenwand.....	351
10.4	Einzellasten und Teilflächenpressung.....	359
10.4.1	Beispiel Teilflächenpressung	361
10.5	Zug- und Biegezugbeanspruchung	363
10.5.1	Grundlagen	363
10.5.2	Charakteristische Zug- und Biegezugfestigkeit	363
10.6	Schubbeanspruchung	364
10.6.1	Grundlagen	364
10.6.2	Charakteristische Schubfestigkeit	364
10.6.3	Beispiel Schubwand.....	366
10.7	Literatur zu Kapitel 10.....	368
11	Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit	371
11.1	Allgemeines	371
11.2	Begrenzung der planmäßigen Exzentrizitäten	371
11.3	Nachweis der Randdehnung	372
11.4	Literatur zu Kapitel 11.....	374
12	Spezielle Kapitel der Mauerwerksbemessung	375
12.1	Knotenmomente am Wand-Decken-Knoten (WDK).....	375
12.1.1	Grundlagen zur Modellierung des WDK.....	375
12.1.2	Theoretische Ansätze und Modelle.....	377
12.1.3	Vereinbarungen zur rechnerischen Ermittlung der Knotenmomente.....	380
12.1.4	Knotenmomente am Dachdecken-Teilsystem	382
12.1.5	Knotenmomente am Zwischendecken-Teilsystem	385
12.1.6	Sonderfall für Kragplatten als Geschossdecken.....	390
12.1.7	Vereinfachte Berechnung der Knotenmomente.....	395
12.1.8	Kriecheinfluss auf die Knotenmomente.....	402
12.1.9	Knotenmomente bei zweiachsig gespannten Decken	402
12.2	Kellerwände ohne Nachweis auf Erddruck.....	402
12.2.1	Einleitung.....	402
12.2.2	Kellerwände mit geringer Auflast.....	403
12.2.3	Kellerwände unter hoher Auflast	406
12.2.4	Beispiel zur Berechnung einer Kellerwand	412
12.3	Giebelwände	417
12.3.1	Konstruktive Grundsätze	417
12.3.2	Nachweischema.....	419
12.3.3	Beispiel einer Giebelwand.....	420

12.3.4	Kritische Anmerkungen	422
12.4	Gewölbe und Ingenieurmauerwerk	424
12.4.1	Allgemeines	424
12.4.2	Die Stützlinie	426
12.4.3	Der Dreigelenkbogen	428
12.4.4	Stützlinienverfahren	432
12.4.5	Bemessungsgrundlagen für Gewölbe im Hochbau	436
12.4.6	Gewölbeberechnungen im Ingenieur- bzw. Gewölbebrückenbau	444
12.4.7	Traglasteinfluss von Bogenhinterfüllungen und Überschüttungen	448
12.4.8	Traglasteinfluss von Brüstungen und Bogenhintermauerungen	449
12.4.9	Räumliche Gewölbe	450
12.5	Literatur zu Kapitel 12	455
13	Nachweis von Mauerwerksbauten unter Erdbebeneinwirkung	459
13.1	Einführung	459
13.2	Normative Regelungen	459
13.3	Erdbebenzonen und Untergrund	460
13.4	Vereinfachter konstruktiver Nachweis	462
13.4.1	Allgemeine Anforderungen an Hochbauten	462
13.4.2	Spezielle Anforderungen an Hochbauten aus Mauerwerk	462
13.5	Rechnerischer Nachweis	464
13.5.1	Allgemeines	464
13.5.2	Rechenmodelle	465
13.5.3	Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren	466
13.6	Weiterführende Informationen	468
13.7	Komplexbeispiel Erdbeben	468
13.8	Literatur zu Kapitel 13	469
14	Natursteinmauerwerk	471
14.1	Einleitung	471
14.2	Naturstein – Entstehung, Eigenschaften und Einteilung	471
14.2.1	Magmatite	471
14.2.2	Sedimentite	475
14.2.3	Metamorphite	479
14.3	Natursteinbearbeitung	481
14.4	Mauerwerksverbände	481
14.4.1	Zyklopen- oder Findlingsmauerwerk	482
14.4.2	Bruchsteinmauerwerk	482
14.4.3	Schichtenmauerwerk	483
14.4.4	Quadermauerwerk	484
14.4.5	Trockenmauerwerk	485
14.5	Tragverhalten von Natursteinmauerwerk	486
14.5.1	Einleitung	486
14.5.2	Bruchmechanismus von Natursteinmauerwerk	486
14.5.3	Zugversagen der Steine	492
14.6	Bemessung von Natursteinmauerwerk	493
14.6.1	Einteilung in Güteklassen	493

14.6.2	Zentrische und exzentrische Druckfestigkeit	494
14.6.3	Zug- und Biegezugfestigkeit	496
14.6.4	Schubfestigkeit	496
14.6.5	Beispielrechnung Natursteinmauerwerk	497
14.7	Literatur zu Kapitel 14	500
15	Komplexbeispiel	501
15.1	Ansichten und Pläne	501
15.1.1	Dach	502
15.1.2	Decke	502
15.2	Inhaltliche und Bautechnische Erläuterungen	505
15.2.1	Formelzeichen	505
15.2.2	Mauerwerk	505
15.3	Pos. 1.1 Pfettendach mit Firstgelenk	506
15.3.1	Material und statisches System	506
15.3.2	Lastannahmen	506
15.3.3	Maßgebende charakteristische Schnittgrößen	508
15.4	Pos. 1.2 Zangendecke	508
15.4.1	Material und statisches System	508
15.4.2	Lastannahmen	509
15.4.3	Maßgebende charakteristische Schnittgrößen	509
15.5	Pos 1.3 Mittelpfette Süden	509
15.5.1	Material und statisches System	509
15.5.2	Lastannahmen	510
15.5.3	Maßgebende charakteristische Schnittgrößen	510
15.5.4	Auflagerpressung des Plansteins am Mittelaufleger	510
15.5.5	Pos. 1.7 Ringbalken unter dem Dach	513
15.6	Pos. 1.8 Schubwand	514
15.7	Pos. 2.0 Standard-Hohlplatte Decke EG	519
15.7.1	Material und statisches System (siehe Pos. Plan)	519
15.7.2	Lastannahmen	520
15.7.3	Platte 2.1 (Wohnen)	520
15.7.4	Auflagerlasten Decke EG	520
15.8	Pos. 2.6 Außenwand	521
15.9	Pos. 4.0 Standard-Hohlplatte Decke KG	524
15.9.1	Material und statisches System	524
15.9.2	Lastannahmen	525
15.9.3	Auflagerlasten Decke KG	525
15.10	Pos. 6.1 Kellerwand Hobby	526
15.10.1	Lastannahmen	526
15.10.2	Material und statisches System	526
15.10.3	Charakteristischer Erddruck	527
15.10.4	Vereinfachter Nachweis	527
15.10.5	Genauerer Nachweis	528
15.11	Literatur zu Kapitel 15	533
	Stichwortverzeichnis	535

1 Einführung

1.1 Geschichte und Entwicklung

Mauerwerk ist einer der ältesten Baustoffe, dessen Anwendung bis weit ins Altertum zurückreicht. Als die Menschen sesshaft wurden, begannen sie, Mauern aufzuschichten und Wohnstätten zu bauen, die Schutz boten. Die ersten Orte wurden dauerhaft begründet. Neue, bisher unbekannte Baustoffe entwickelten sich: Mauersteine und Mörtel. Der Mörtel dient als Bindeglied und Toleranzausgleich zwischen den Steinen. Bitumen („Erdpech“) als Bindemittel im Mörtel lässt sich in Mesopotamien bereits aus vorgeschichtlicher Zeit nachweisen. Luftgetrocknete Lehmsteine sind seit etwa 14000 v. Chr. bekannt. Die Kenntnis des Haltbarmachens von Lehmsteinen durch Brennen wird seit etwa 5000 v. Chr. angewandt [1.1].



Bild 1-1 Natursteinmauerwerk verschiedener Epochen an der Prepositura di San Nicolò in Rada, Italien

Seit jener Zeit hat das Mauerwerk eine enorme Entwicklung erfahren und dabei nie seine Ausstrahlung und Anziehungskraft verloren. Nach wie vor ist die Vielfalt an Gestaltungsmöglichkeiten fast unbegrenzt und die Wirtschaftlichkeit hoch. Insbesondere in den Wiederaufbauphasen nach Kriegsereignissen kam Mauerwerk in großem Stil zur Anwendung. Mit der Entwicklung des Stahlbetonbaus wurde die Bedeutung des Mauerwerks etwas zurückgedrängt, dennoch beträgt der Marktanteil im Wohnungsbau über 80 % [1.2]. Aufgrund seiner Vorteile wie kostengünstige Herstellung, hervorragende

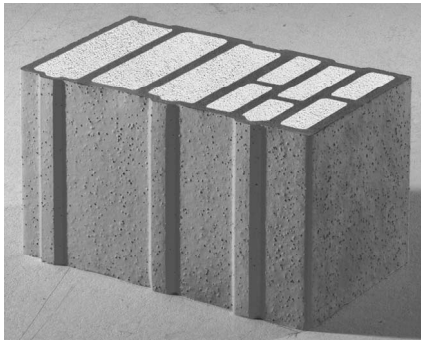
bauphysikalische Eigenschaften und Kombination von raumabschließender und statischer Funktion gehört Mauerwerk unverändert zu den bevorzugten Baustoffen des Wohnungsbaus. Im Nichtwohnungsbau weist das Mauerwerk einen Anteil von ca. 16 % auf. Es ist damit ebenfalls in diesem Bereich eine etablierte Bauweise.



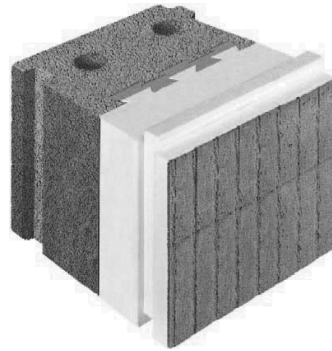
Bild 1-2 Moderner Mauerwerksbau der heutigen Zeit (Haus Reichert, Wilhelmshorst/Potsdam) [1.3]

Die Notwendigkeit der weiteren Energieeinsparung mit dem Ziel, den CO₂-Ausstoß zu verringern, hat zu strengeren Anforderungen an die Hüllkonstruktionen von Gebäuden und damit auch an den Mauerwerksbau geführt. Auf diese Entwicklungen haben die Stein- und Mörtelhersteller mit Innovationen reagiert, die zu einer erheblichen Veränderung des Mauerwerks von heute geführt haben. Der traditionelle Baustoff ist zu einem hochentwickelten Zwei-Komponenten-Material (Stein und Mörtel) geworden, das in der Lage ist, diese Anforderungen zu erfüllen.

Dabei ist noch längst nicht das Ende der Weiterentwicklungen erreicht, wie neu auf dem Markt befindliche Produkte beweisen (z. B. Bild 1-3, Bild 1-4 und ausführlich [1.4]).



a)

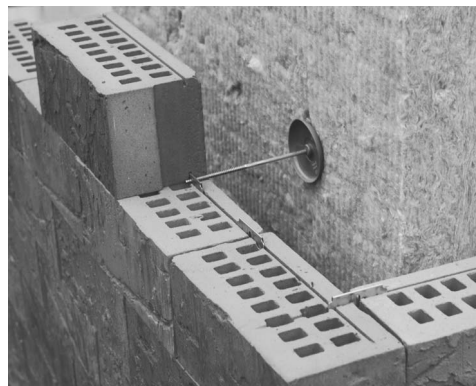


b)

Bild 1-3 Neueste Entwicklungen im Bereich der Mauersteine für einschalige Wände;
 a) Hochlochziegel mit ausgefüllten Hohlräumen – Dämmkern aus mineralischem Perlit (Trennung in Trag- u. Dämmschicht) [1.5],
 b) Zweikomponentenstein mit Trag- und Dämmschicht im Verbund aus unterschiedlichen Materialien [1.6]



a)



b)

Bild 1-4 Neueste Entwicklungen im Bereich der Vormauersteine;
 a) Kalksandstein-Fasenstein – Wandaufbau [1.7],
 b) Vormauerschale in Trockenmauerwerk mit speziellem Verankerungssystem [1.8]

Zu Beginn des vorigen Jahrhunderts reichte noch die Einhaltung von in örtlichen Bauvorschriften festgelegten Wandstärken aus, um Mauerwerksgebäude zu errichten [1.9]. Vor allem seit der verstärkten Entwicklung des Stahl- und Stahlbetonbaus wurden zur Berechnung und Bemessung von Baukonstruktionen immer mehr ingenieurmäßige Verfahren angewendet.

Einfache Nachweisverfahren hielten 1937 auch im Mauerwerksbau mit Einführung der ersten DIN-Norm Einzug [1.10]. Sie war noch davon geprägt, dass es sich bei Mauerwerk um einen Baustoff handelte, der im Wesentlichen auf der Grundlage von Erfahrungen eingesetzt wurde.

Der Wettbewerb mit den anderen Baustoffen führte schließlich dazu, in Deutschland auch im Mauerwerksbau 1984 die ingenieurmäßige Bemessung zu etablieren [1.11]. Der Ausgabe dieser Norm ging eine Zeit voran, die von dem Ziel geprägt war, auch Hochhäuser in größerem Stile in Mauerwerk zu errichten. Wenngleich sich diese Tendenz in Deutschland nicht durchgesetzt hat, war in jener Epoche doch ein bedeutender Erkenntnisgewinn zu verzeichnen. Heute sind es die Anforderungen aus dem Klimaschutz, die die Entwicklung und die Normung bestimmen. Die wirtschaftliche Beherrschung der Planung und Ausführung setzt entsprechende Berechnungs- und Bemessungsvorschriften für die tägliche Arbeit voraus. Material- und Energieeinsparung (z. B. Passivhaus, Bild 1-5) sowie einfache und schnelle Berechnung und Nachweisführung sind die Kriterien, an denen diese gemessen werden.



a)



b)

Bild 1-5 Passivhaus in Adelzhausen (Architekt: Werner Friedl, Adelzhausen);

a) Rohbau mit KS-Außenwänden,

b) Fertiggestelltes Haus mit Wärmedämmverbundsystem [1.17]

So ist es nicht nur der in Europa eingeschlagene Weg, der den Übergang auf das semiprobabilistische Bemessungskonzept auch in Deutschland notwendig machte, sondern die genannten Kriterien sind es, die das Verlassen des althergebrachten globalen Sicherheitskonzeptes erfordern. Leider ist der Übergang auf das Teilsicherheitskonzept mit einer Verschärfung der Nachweisführung bei horizontalen Einwirkungen verbunden, die sich besonders bei nicht-zugfestem Material wie dem Baugrund und dem Mauerwerk nachteilig auswirken. Das ist aber nur bedingt dem Teilsicherheitskonzept selbst zuzuschreiben, sondern vor allem der Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte in Verbindung mit der Übereinkunft zur Versagenswahrscheinlichkeit von Gebäuden und Bauwerken ([1.12], [1.13] u. [1.14]). Eine kritische Bewertung des dabei in Deutschland eingeschla-

genen Weges erscheint notwendig, so wie es bereits *Spaethe* [1.18] 1992 für sinnvoll gehalten hat.

Mit der DIN 1053-100 [1.15] ist der Übergang auf das semiprobabilistische Sicherheitskonzept nunmehr auch im Mauerwerksbau vollzogen und die Bemessung kann im Mauerwerk nach dem Teilsicherheitskonzept erfolgen. Für die Konstruktion und Ausführung gilt nach wie vor DIN 1053-1:1996-11 [1.16]. Auf das strikte Mischungsverbot sei an dieser Stelle hingewiesen. Die Abtrennung der Bemessung hatte sich erforderlich gemacht, um zügig die Bereitstellung der Algorithmen nach dem neuen Sicherheitskonzept entsprechend DIN 1055-100 auch im Mauerwerksbau zu ermöglichen. Die Umstellung auf das Teilsicherheitskonzept hatte dann doch eine längere Zeit in Anspruch genommen, sodass sich das eingeschlagene Vorgehen bestätigte.

An der Erarbeitung der DIN 1053-100 zur Berechnung von Mauerwerk auf der Grundlage des semiprobabilistischen Sicherheitskonzeptes waren die Mitglieder des Arbeitsausschusses „Rezept- und Ingenieurmauerwerk“ sowie der Unterausschüsse „Baustoffe“ und „Bemessung“ des Deutschen Instituts für Normung e. V. beteiligt. Sie wurde noch unter der Obmannschaft von Prof. *Walther Mann* in Angriff genommen und 2007 vollständig abgeschlossen. Inzwischen ist die Norm bauaufsichtlich eingeführt und steht für die allgemeine Anwendung zur Verfügung (s. [1.19] u. z. B. [1.20]).

Das vorliegende Buch soll die Umstellung auf die neue Norm im Mauerwerksbau erleichtern. Es wird gleichzeitig auf die aktuelle Situation auf dem Sektor der Mauerwerksprodukte eingegangen, die durch den Übergang auf europäische Normen und die Beibehaltung des bisherigen, hohen Niveaus entstanden ist. Neben der Erläuterung der Berechnungs- und Bemessungsvorschriften der DIN 1053-100 wird ein Einblick in Hintergründe und Zusammenhänge gegeben, die den sicheren Umgang mit der Norm erleichtern sollen. Die Beispiele demonstrieren die Berechnungs- und Nachweisalgorithmen und tragen zur Verdeutlichung bei. Die Auswahl erfolgte dabei unter dem Gesichtspunkt der Überschaubarkeit der Berechnungsgänge.

1.2 Literatur zu Kapitel 1

- [1.1] *Pfeifer, G.* et al.: Mauerwerk Atlas. Birkhäuser, Basel, Boston, Wien 2001.
- [1.2] DGfM Deutsche Gesellschaft für Mauerwerksbau e. V. (Hrsg.): Jahresbericht 2006. Berlin 2007 (www.dgfm.de).
- [1.3] Callwey Verlag München (Hrsg.): brick '06 - Die beste europäische Ziegelarchitektur, Brick Award 2006 Wienerberger AG Wien. Callwey, München 2006.
- [1.4] *Hirsch, R.*: Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung. In: *Jäger, W.* (Hrsg.): Mauerwerk-Kalender 34 (2009), S. 29–205. Ernst & Sohn, Berlin.
- [1.5] Wienerberger POROTON-Planziegel. Wienerberger Ziegelindustrie GmbH, Oldenburger Allee 26, 30659 Hannover (www.wienerberger.de).
- [1.6] GISOTON Wandsysteme GmbH, Baustoffwerke Gebhart & Söhne GmbH & Co. KG, Hochstr. 2, 88317 Aichstetten (www.gisoton.de).

- [1.7] Silka Kalksandstein Fasenstein. XELLA Deutschland GmbH, Dr.-Hammacher-Str. 49, 47119 Duisburg (www.xella.de).
- [1.8] ClickBrick-Befestigungssystem. daas ClickBrick bv, Terborgseweg 12, 7038 EX Zeddam, Niederlande (www.daasbaksteen.nl).
- [1.9] *Ahnert, R.; Krause, K. H.*: Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960, Band 1. Verlag für Bauwesen, Bauverlag, Berlin 1991.
- [1.10] DIN 1053:1937-02: Bauteile aus künstlichen und natürlichen Steinen, Berechnungsgrundlagen. Ausschuss einheitliche technische Baubestimmungen (ETB), Deutscher Normenausschuss, Berlin 1937.
- [1.11] DIN 1053:1984-07: Mauerwerk. Mauerwerk nach Eignungsprüfung. Berechnung und Ausführung. NABau im DIN, Berlin 1984.
- [1.12] *Möller, B.; Graf, W.; Beer, M.; Sickert, J.-U.*: Das Datenmodell Fuzzy-Zufälligkeit und seine Anwendungsmöglichkeiten im Ingenieurbau. In: Festschrift Prof. D. Hartmann 60. Geburtstag, Ruhr-Uni Bochum, 2004 Shaker-Verl., Aachen, 2004, S. 97–106.
- [1.13] *Eibl, J.; Schmidt-Hurtienne, B.*: Grundlagen für ein neues Sicherheitskonzept. Bautechnik (1995) 8, S. 501–506.
- [1.14] *Gerstner, H.; Jäger, W.; Nguyen, S. H.*: Kann der Mauerwerksbau noch vom ETV Beton der ehemaligen DDR profitieren? Mauerwerk 11 (2007) 4, S. 190–198.
- [1.15] DIN 1053-100:2007-09: Mauerwerk – Teil 100: Berechnung auf der Grundlage des semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts. NABau im DIN, Berlin 2007.
- [1.16] DIN 1053-1:1996-11: Mauerwerk. Teil 1: Berechnung und Ausführung. NABau im DIN, Berlin 1996.
- [1.17] *Schneider, F.*: Konstruktionsregeln für Mauerwerk, Teil 3: Ausführungsbeispiele. In: *Jäger, W.* (Hrsg.): Mauerwerk-Kalender 33 (2008), S. 329–351. Ernst & Sohn, Berlin.
- [1.18] *Spaethe, G.*: Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen. 2. Auflage. Springer-Verlag, Wien - New York 1992.
- [1.19] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen. Berlin, Fassung Februar 2009, mit Änderungen September 2009. DIBt Berlin, 2009 (www.dibt.de).
- [1.20] Bekanntmachung des Ministeriums für Infrastruktur und Raumordnung v. 5. Nov. 2007. Technische Baubestimmungen - Fassung Februar 2007. In: Amtsblatt Brandenburg 18 (2007) 50, S. 2563–2597.

2 Mauerwerksbauten

2.1 Übersicht

Mauern, d. h. Steine - mit oder ohne Mörtel - geordnet und einer vorausbestimmten Form folgend schichtenweise zu verlegen, ist eine der ältesten Methoden der Menschheit, Bauwerke zu errichten (s. Bild 2-1 u. Bild 2-2). Entscheidend dabei war, dass man entweder die Steine vor Ort gewinnen bzw. vorfinden konnte oder das Rohmaterial am Ort oder in der Nähe zur Verfügung stand, aus dem sich die Steine herstellen ließen.



Bild 2-1 Sphinx-Allee zu dem ersten Pylon (ca. 7. Jh. v. Chr.) des Eingangs zum Tempel Amun-Re (ca. 2000 bis 220 v. Chr.) in Karnak/Luxor (Ägypten)



Bild 2-2 Die Zitadelle von Bam vor der Zerstörung 2003 –ca. 2500 Jahre Tradition im Mauerwerksbau mit ungebrannten Lehmsteinen (Foto: Recovery Project of Bam's Cultural Heritage)

Die Verfügbarkeit des Materials war dabei ein großer Vorteil; die fehlende Eigenschaft, Biegekräfte, etwa wie der Baumstamm, aufzunehmen, war ein scheinbarer Nachteil, der als solcher aber der Verbreitung des Mauerwerks keinen Abbruch tat. Man trug der erkannten Eigenschaft durch entsprechende Formgebung Rechnung, indem im Bauteil oder Bauwerk nur Druckkräfte entstehen durften (s. [2.1], S. 160 ff.).

Wände waren und sind so auszubilden, dass die resultierende Normalkraft immer im Querschnitt bleibt, sofern keine Bewehrung eingelegt wird. Damit lassen sich bei entsprechender Form Öffnungen mit Bögen und Flächen mit Gewölben überdecken. Das Holz wurde dort, wo es verfügbar war, verwendet, um Gleiches auf wirtschaftlichere Art zu erreichen. Wände werden und wurden so dimensioniert, dass sie die im Bauwerk aus Öffnungs- und Flächenüberdeckungen entstehenden Horizontalkräfte aufnehmen können. Die statischen Gesetze bestimmten lange Zeit bei Einsatz von Mauerwerk die Formen in der Architektur - bis zur Einführung des Stahls und des Stahlbetons, da diese beiden Materialien auch Zugkräfte übertragen können.

Tabelle 2-1 Einsatz von Mauerwerk

Wohnungsbau	Nichtwohnungsbau
Einfamilienhäuser	Gewerbebau
Reihenhäuser	Industriebau
Mehrfamilienhäuser	Öffentliche Gebäude
Mehrgeschossiger Wohnungsbau	Ingenieurbau

Heute wird Mauerwerk vornehmlich für vertikale Bauteile wie Wände und Stützen eingesetzt. Für Öffnungsüberdeckungen gibt es Stürze und Träger aus Stahl, Stahlbeton oder bewehrtem Mauerwerk. Räume werden mit Decken aus Holz oder Stahlbeton überdeckt. Sie können sowohl vertikale als auch horizontale Lasten aufnehmen und ableiten, wobei die Übertragung von Biegekräften stark von der wirkenden Normalkraft abhängt.

Haupteinsatzgebiete für Mauerwerk heute sind der Wohnungs- und Gesellschaftsbau (s. Tabelle 2-1). Auch im Gewerbe- und Industriebau besitzt der Mauerwerksbau Marktanteile. Für Brücken, Türme, Stützbauwerke und andere Ingenieurbauten wird Mauerwerk kaum noch ausgeführt, besitzt aber in diesen Bereichen im Bauwerksbestand eine erhebliche Bedeutung. Gleiches gilt für Kuppeln und Gewölbe, die nur noch im Rahmen der Erhaltung wertvoller Substanz und von Rekonstruktionen zerstörter Bauwerke eine Rolle spielen.

Wohnungs- und Gesellschaftsbau

Im Wohnungs- und Gesellschaftsbau hat heute das Mauerwerk seinen größten Anwendungsbereich. Vielfalt, Variabilität und vor allem Wirtschaftlichkeit sind die Kriterien, die der Mauerwerksbau im Wettbewerb mit anderen Bauarten traditionell vorweisen

kann. Die Mauerwerksprodukte sind ebenso wie die Verarbeitungstechnologien und Konstruktionen weiter entwickelt worden, sodass der Mauerwerksbau die fortwährend gestiegenen Anforderungen heute wirtschaftlich erfüllen kann. Bemessung und Berechnung sind nach wie vor für die Standardanwendungen einfach geblieben. Die Verarbeitung erfordert handwerkliches Können, das sich im Rahmen des Beherrschbaren hält.

Vorwiegend kommen heute Mischkonstruktionen zur Anwendung, bei denen i. d. R. die Wände aus Mauerwerk hergestellt werden. Decken und Dächer sind meist aus Holz oder Stahlbeton, seltener aus Stahl oder im Verbund damit hergestellt. Auch im Wandbereich sind weitergehende Kombinationen wie z. B. mit Stahlbeton (insbesondere bei mehr als 5-geschossigen Gebäuden) möglich (s. Bild 2-4 a).



a) Neubau einer Reihenhauses-Wohnanlage in Dresden („Lucas-Areal“) mit Kalksandsteinmauerwerk



b) Neubau eines Einfamilienhauses in der Nähe von Bonn mit Leichtbetonmauerwerk

Bild 2-3 Anwendungsbeispiele von Mauerwerk im Wohnungs- und Gesellschaftsbau

Einen Sonderfall stellt unabhängig von der Bauwerkstypologie die originalgetreue Wiedererrichtung zerstörter Bauten dar, wie beispielsweise der Wiederaufbau der Dresdner Frauenkirche in den Jahren 1994–2005 (Bild 2-4 b).

Im Industrie- und Gewerbebau wird Mauerwerk nach wie vor eingesetzt. Aufgrund der oft größeren zu überdeckenden Spannweiten machen sich i. d. R. Kombinationen von Tragsystemen aus anderen Baustoffen und Mauerwerksausfachungen erforderlich, die wirtschaftlich sinnvoll sind. Jedoch wird hier Mauerwerk häufig auch für Einbauten und Raumtrennungen verwendet.



a) Mehrgeschossiger Wohnungs- und Gewerbebau
(Bebauung QF Neumarkt, Dresden)



b) Ingenieurmauerwerk - Wiederaufbau
der Frauenkirche Dresden
(Foto: T. Albrecht, Dresden)

Bild 2-4 Weitere Beispiele für den Einsatz von Mauerwerk

Industrie- und Gewerbebau



a) Mauerwerkshülle des ehemaligen Kaispeichers A
(1965) in Hamburg nach Entfernung des inneren Skeletts



b) Digital gestaltetes und gefertigtes Aus-
fachungsmauerwerk des Weingutes
Gantenbein, Schweiz (Foto aus [2.23])

Bild 2-5 Anwendungsbeispiele von Mauerwerk im Industrie- und Gewerbebau

Brücken

Bogenbrücken aus Mauerwerk gehören zur ältesten Konstruktionsform von Brücken. Ausgehend vom halbkreisförmigen Brückenbogen, der schon vor der christlichen Zeitrechnung angewendet wurde, entwickelten sich der Segmentbogen und eine Vielzahl anderer Bogenvarianten, wodurch die Brücken später auch flacher gestaltet werden konnten.

Eine Vielzahl gemauerter Steinbrücken erfüllen noch heute ihre Dienste, so zum Beispiel die Göltzschtalbrücke - erbaut unter der Leitung von *Johann Andreas Schubert* im Rahmen der Entwicklung des sächsischen Eisenbahnwesens Mitte des 19. Jahrhunderts. Sie ist außerdem bis heute die größte Ziegelbrücke der Welt. Ein weiteres bekanntes Beispiel aus der Reihe namhafter Steinbogenbrücken ist die Karlsbrücke in Prag, s. a. [2.2].



Bild 2-6 Karlsbrücke in Prag, erbaut 1357 [2.2]

Heute wird Mauerwerk im Brückenbau fast ausschließlich nur noch zur Verblendung eingesetzt. Die Pflege und Erhaltung einer Vielzahl von Brückenbauwerken aus Mauerwerk erfordert jedoch entsprechende Kenntnisse in den Berechnungs- und Nachweisverfahren, auch wenn die derzeit gültigen Normen im Mauerwerksbau nicht für den Bestand erarbeitet worden sind. Hier muss der Ingenieur auf der Basis seines Wissens und seiner Erfahrung vorgehen.

Türme und Schornsteine

Türme aus Mauerwerk können sowohl einzeln stehen (z. B. Leuchttürme, Schachttürme im Bergbau, Wassertürme wie z. B. Bild 2-7 b) als auch Teil eines größeren Gebäudes sein (z. B. Kirchtürme, Wehrtürme bei Burganlagen).

Ein weiteres Anwendungsgebiet für Mauerwerk waren in der Vergangenheit die Kraftwerks- und Industrieschornsteine (z. B. Halsbrücker Esse bei Freiberg, 140 m hoch). Bild 2-7 a) zeigt ein zu Beginn des 20. Jahrhunderts in London gebaute Kohlekraftwerk mit zwei integrierten Schornsteinen aus Mauerwerk.



a) Gemauerte Schornsteine im Kraftwerk Lots Road, erbaut 1902–05, London, UK
(Foto: Adrian Pingstone, Bristol, UK)



b) Wasserturm Berlin Charlottenburg, erbaut 1889–91
(Foto: Doris Antony, Berlin)

Bild 2-7 Anwendungsbeispiele von Mauerwerk für Türme und Schornsteine

Kuppeln und Gewölbe



a) Ansicht



b) Innenraum der Kuppel

Bild 2-8 Hagia Sophia in Istanbul (erbaut 532–537), Türkei