

A Normen und Baustoffe

**A1 Eigenschaften und Eigenschaftswerte von Mauersteinen,  
Mauermörtel und Mauerwerk**

Ulf Schmidt

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>Verbund zwischen Mauerstein und Mauermörtel</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Mauersteine</b>	<b>3</b>	4.1	Allgemeines	10
2.1	Festigkeitseigenschaften	3	4.2	Haftscherfestigkeit	10
2.1.1	Druckfestigkeit in Richtung Steinhöhe	3	4.3	Haftzug- und Biegehaftzugfestigkeit	13
2.1.2	Druckfestigkeit in Richtung Steinlänge und Steinbreite	3	<b>5</b>	<b>Mauerwerk</b>	<b>13</b>
2.1.3	Zug-, Biegezug- und Spaltzugfestigkeit	4	5.1	Allgemeines	13
2.2	Verformungseigenschaften	5	5.2	Druckbeanspruchung senkrecht zur Lagerfuge	13
2.2.1	Elastizitätsmodul	5	5.2.1	Druckfestigkeit	13
2.2.2	Querdehnungsmodul, Querdehnzahl	5	5.2.2	Verformungseigenschaften	15
2.3	Kapillare Wasseraufnahme	6	5.3	Druckbeanspruchung parallel zur Lagerfuge	16
<b>3</b>	<b>Mauermörtel</b>	<b>7</b>	5.3.1	Längsdruckfestigkeit	16
3.1	Allgemeines	7	5.3.2	Druck-E-Modul (parallel zu den Lagerfugen)	16
3.2	Festigkeitseigenschaften	7	5.4	Zug- und Biegezugbeanspruchung	18
3.2.1	Prismendruckfestigkeit	7	5.4.1	Zugfestigkeit	18
3.2.2	Fugendruckfestigkeit	7	5.4.2	Zug-E-Modul (Zugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen)	19
3.2.3	Zugfestigkeit	8	5.4.3	Biegezugfestigkeit	20
3.3	Verformungseigenschaften	8	5.5	Schubbeanspruchung	20
3.3.1	Längsdehnungsmodul (E-Modul)	8	5.6	Feuchtedehnung, Kriechen, Wärmedehnung	21
3.3.2	Querdehnungsmodul	8			
3.3.3	Feuchtedehnung (Schwinden)	10			
				<b>Literatur</b>	<b>21</b>

## 1 Einleitung

Dieses Kapitel im Mauerwerk-Kalender wurde erstmals im Jahr 1989 von Dr. Peter Schubert<sup>†</sup> am Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen University (ibac) verfasst und ab dem Jahr 2013 durch Prof. Wolfgang Brameshuber<sup>†</sup> fortgeführt. Ab dem Jahr 2020 haben Prof. Michael Raupach, Doris Sänger und Bernd Winkels die Autorenschaft ibernommen und den Beitrag neu aufbereitet. Als ehemals langjähriger Mitarbeiter und Leiter der Arbeitsgruppe „Mauerwerk“ am ibac freue ich mich, diesen Beitrag in bewährter Form fortfuhren zu durfen und bedanke mich für das in mich gesetzte Vertrauen. Dieses Kapitel ist auch weiterhin als ständiger Beitrag vorgesehen.

Für die Bemessung von Mauerwerk im Grenzzustand der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit werden im Allgemeinen sogenannte Rechenwerte angesetzt. Hierbei handelt es sich um in Normen, Zulassungen, Bauartgenehmigungen und anderen Regelwerken anzusetzende Eigenschaftswerte und Mindesteigenschaftswerte der Bauprodukte. Diese wurden auf Basis von Versuchswerten und langjährigen Erfahrungswerten festgelegt, sodass eine auf der sicheren Seite liegende Nachweisführung möglich ist.

In zahlreichen Fällen, insbesondere bei gesonderten Fragestellungen wie z. B. bei der Beurteilung der Rissicherheit von Mauerwerk, bei einer Schadensdiagnose, im Rahmen von Forschung und Entwicklung oder aber bei genaueren Nachweisen für die Tragfähigkeit von Bauwerken werden Eigenschaftswerte benötigt, die den Regelwerken nicht zu entnehmen sind.

In den nachfolgenden Abschnitten werden wesentliche Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk dargestellt, die iber die Regelwerksanforderungen hinausgehen und bei den zuvor genannten gesonderten Fragestellungen helfen, eine fachlich fundierte Antwort zu finden.

Die Eigenschaftswerte werden jeweils kurz hinsichtlich Bedeutung und Prüfverfahren beschrieben und – soweit möglich und sinnvoll – Eigenschaftswerte angegeben. Diese beruhen auf Auswertungen von Daten tatsächlich geprüfter Materialien und Materialkombinationen, entstanden in zahlreichen Forschungsvorhaben am ibac bzw. zusammengetragen im Rahmen ergänzender Literaturrecherchen. Es wird deutlich, dass aufgrund der vielfältigen Materialien und Kombinationsmöglichkeiten eine große Bandbreite an Eigenschaftswerten entsteht.

Nicht Gegenstand dieses Beitrages sind wärme- und schallschutztechnische Eigenschaftswerte sowie Eigenschaftswerte, die regelmäßig im Rahmen von normativen Anforderungen oder ähnlichem nachzuweisen sind.

Die Zusammenstellung der Eigenschaftswerte bezieht sich jeweils auf Beiträge früherer Jahrgänge des Mauerwerk-Kalenders, die in den folgenden Jahrgängen

aufgrund neuer Ergebnisse aktualisiert werden. Hinweise auf bisher nicht erfasste Literatur und Untersuchungsergebnisse sind ausdrücklich erwünscht und werden gerne aufgenommen.

## 2 Mauersteine

### 2.1 Festigkeitseigenschaften

#### 2.1.1 Druckfestigkeit in Richtung Steinhöhe

Die Druckfestigkeit in Richtung Steinhöhe ist eine der wesentlichen Kenngrößen von Mauersteinen. Die Prüfung der Druckfestigkeit erfolgt nach DIN EN 772-1 [26] i. d. R. an ganzen Mauersteinen oder bei Vollsteinen an repräsentativen Teilstücken. Die Mauersteine werden unter Berücksichtigung der Prüfrandbedingungen (i. W. Konditionierung der Mauersteine, Prüfkörpergeometrie) in Druckfestigkeitsklassen eingestuft. Die Druckfestigkeitsklasse der Mauersteine ist eine der wesentlichen Bezugsgrößen für die rechnerische Mauerwerk-Druckfestigkeit, aber auch für die Biege- und Schubtragfähigkeit.

#### 2.1.2 Druckfestigkeit in Richtung Steinlänge und Steinbreite

Bei einigen Beanspruchungen von Mauerwerkbauteilen bzw. Bauteilbereichen – wie Scheibenschub, Biegung (z. B. Biegedruckzone bei bewehrtem Mauerwerk und Stürzen) oder Teilflachenbelastung senkrecht zur Wandebene – können die Mauersteine in Richtung Steinlänge bzw. -breite auf Druck beansprucht werden. Normative Rechenwerte für die Druckfestigkeit in diese Richtungen liegen nicht vor. In Zulassungen von Stürzen oder bei Erdbebennachweisen sind teilweise Anforderungswerte an die Steinlangendruckfestigkeit festgelegt. Die europäischen Mauersteinnormen lassen eine Deklaration der Druckfestigkeit in Richtung Steinlänge oder Steinbreite grundsätzlich zu. Die Prüfung der Druckfestigkeit in diese Richtungen kann in Anlehnung an DIN EN 772-1 [26] erfolgen. Bei der Prüfung ist zu beachten, dass sowohl die Prüfkörpergeometrie (i. W. die Schlankheit des Prüfkörpers) als auch insbesondere bei Mauersteinen mit Nut+Feder-System die Vorbereitung der Lasteinleitungsflachen einen Einfluss auf die Prüfwerte haben können.

Die Druckfestigkeit in Richtung Steinlänge und -breite ist im Allgemeinen kleiner als in Richtung Steinhöhe. Bei Lochsteinen resultieren je nach Lochanteil, Form der Lochung, Lochanordnung etc. weitaus kleinere Druckfestigkeitswerte als in Richtung Steinhöhe. Aber auch bei Vollsteinen kann herstellungsbedingt (Pressen, Strangpressen, Ruttelverdichtung oder Treiben) eine leichte Anisotropie vorliegen.

Anhaltswerte von Druckfestigkeitsverhaltnissen Steinlänge/Steinhöhe aus einer Auswertung vorliegender

**Tabelle 1.** Mauersteine; Verhältniswerte  
Steinlängsdruckfestigkeit/Normdruckfestigkeit (aus [1])

Mauerstein	n	$\beta_{D,st}$	$\beta_{D,st,l}/\beta_{D,st}$	
		Wertebereich	Mittelwert	Wertebereich
–	–	N/mm <sup>2</sup>	–	
Mz	2	21,9/22,7	0,67	0,64 ... 0,70
HLz <sup>a)</sup>	5	20 ... 47	0,23	0,12 ... 0,33
HLz <sup>b)</sup>	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

a) Trockenrohdichte  $r_d > 1,0 \text{ kg/dm}^3$ b) Trockenrohdichte  $r_d \leq 1,0 \text{ kg/dm}^3$  $\beta_{D,st}$  Normdruckfestigkeit in Richtung Steinhöhe (mit Formfaktor) in N/mm<sup>2</sup> $\beta_{D,st,l}$  Prüfwert der Druckfestigkeit in Richtung Steinlänge (ohne Formfaktor) in N/mm<sup>2</sup>

n Anzahl der Versuchswerte

deutscher Versuchswerte aus [1] sind in Tabelle 1 angegeben. In [1] sind die Versuchswerte auch grafisch dargestellt. Hieraus lassen sich folgende Zusammenhänge ableiten: Für Hochlochziegel und Leichtbetonhohlblöcke kann erwartungsgemäß kein Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit in Steinhöhe und der Druckfestigkeit in Steinlänge festgestellt werden. Für Porenbetonsteine ergibt sich mit zunehmender Steindruckfestigkeit eine Abnahme des Druckfestigkeitsverhältnisses Steinlänge/Steinhöhe. Bei Mauerziegeln sowie Kalksandvoll- und Kalksandlochsteinen bleibt dagegen das Druckfestigkeitsverhältnis Steinlänge/Steinhöhe mit zunehmender Steindruckfestigkeit weitgehend konstant. Zu beachten ist, dass der Verhältniswert Steinlängs-/Normdruckfestigkeit durch den bei der Normdruckfestigkeit angesetzten Formfaktor beeinflusst wird. In [1] sind weiterhin Druckfestigkeitsverhältnisse Steinbreite/Steinhöhe angegeben.

### 2.1.3 Zug-, Biegezug- und Spaltzugfestigkeit

Die Zugfestigkeit ist ebenfalls eine wesentliche Kenngröße von Mauersteinen. Die maßgebende Richtung hängt von der Art der Beanspruchung ab.

Bei der üblichen vertikalen Druckbeanspruchung von Mauerwerk resultieren – aufgrund des entstehenden mehraxialen Spannungszustands – Zugspannungen im Mauerstein in Richtung Steinbreite und -länge. Bei einer Zug- bzw. Biegezugbeanspruchung von Mauerwerk

parallel oder rechteckig zu den Lagerfugen wird die Mauerwerkfestigkeit maßgeblich durch die Zug- bzw. Biegezugfestigkeit der Steine in Richtung Steinlänge oder Steinhöhe – abhängig von der Richtung des Lastabtrags – beeinflusst. In einer Mauerwerkswand unter Scheibenschubbeanspruchung entstehen diagonale Zugkräfte in der Wandebene, sodass eine kombinierte Zugbeanspruchung in Richtung Steinlänge und Steinhöhe vorliegt.

In DIN EN 1996-1-1/NA [27] wird die rechnerische Steinzugfestigkeit in Abhängigkeit von der Steinart aus der umgerechneten mittleren Steindruckfestigkeit ermittelt (siehe Spalte 2 in Tabelle 2). Bei diesen Werten handelt es sich um charakteristische Werte. Mithilfe der angegebenen Verhältniswerte  $f_{bt,cal}/f_{st}$  kann die rechnerische Steinzugfestigkeit für die Ermittlung der charakteristischen Biegezug- und Schubfestigkeit bei Steinzugversagen abgeschätzt werden (vgl. Abschnitte 5.4 und 5.5). Die Rechenwerte wurden unter Berücksichtigung der Bemessungsansätze festgelegt und an Bauteilversuchen kalibriert. Es handelt sich nicht um versuchstechnisch nachzuweisende Anforderungswerte.

Für genauere Nachweise, u. a. in der Forschung und Entwicklung, ist es hilfreich, detailliertere Angaben im Vergleich zu den Normkennwerten zu erhalten. Die Prüfung der zentrischen Zugfestigkeit ist nicht normativ geregelt und prüftechnisch relativ aufwendig. Je nach Anisotropie, Form und Lochung unterscheiden sich i. d. R. auch die Zugfestigkeitswerte richtungsabhängig.

Tabelle 2 gibt den Stand der Auswertung nach [2] wieder. Die in Richtung Steinlänge bestimmten Zugfestigkeitswerte  $\beta_{z,l}$  sind als Verhältniswerte bezogen auf die in Richtung Steinhöhe geprüften Druckfestigkeitswerte  $\beta_{D,st,prüf}$  (ohne Formfaktor) angegeben. Zu beachten ist, dass die Werte nicht direkt mit den angegebenen Verhältniswerten aus [27] vergleichbar sind, da die Prüfwerte noch mit entsprechenden Formfaktoren zu versehen sind und es sich um mittlere Festigkeitswerte handelt. Bei rechnerischen Nachweisen sollten diese in charakteristische Werte umgerechnet werden.

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

Eine Auswertung von Prüfergebnissen zur Biegezugfestigkeit von Mauersteinen erfolgte in diesem Beitrag bislang nicht. Aktuell liegen vergleichsweise wenige deutsche Versuchsergebnisse vor. Diese zeigen jedoch (siehe [3]), dass insbesondere bei Lochsteinen – aufgrund der äußeren Stege – die Biegezugfestigkeit teilweise deutlich größer ist als die zentrische Zugfestigkeit. Durch Berücksichtigung der Mauersteinbiegezugfestigkeit beim rechnerischen Nachweis der Mauerwerk-Biegezugfestigkeit (siehe Abschnitt 5.4.3)

**Tabelle 2.** Mauersteine; Verhältnismerte Steinzug-/Steindruckfestigkeit (nach [27] bzw. [2])

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

a) Gleichung gilt für Porenbetonplansteine der Länge  $\geq 498$  mm und der Höhe  $\geq 248$  mm

$f_{bt,cal}$  rechnerische Steinzugfestigkeit nach [27] in N/mm<sup>2</sup>

$f_{st}$  umgerechnete mittlere Steindruckfestigkeit (mit Formfaktor) nach [27] in N/mm<sup>2</sup>

$\beta_{z,l}$  Prüfwert der Steinlängszugfestigkeit in N/mm<sup>2</sup>

$\beta_{D,st,prüf}$  Prüfwert der Steindruckfestigkeit in Richtung Steinhöhe (ohne Formfaktor) in N/mm<sup>2</sup>

$n$  Anzahl der Versuchswerte

sind realistischere und höhere Traglasten zu erwarten. Eine Auswertung ist in den folgenden Ausgaben vorgesehen.

## 2.2 Verformungseigenschaften

### 2.2.1 Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul gibt das Verhältnis der einwirkenden Spannung zur resultierenden elastischen Dehnung an und ist allgemein bei Mauerwerk als Sekantenmodul bei einem Drittel der Höchstspannung unter einmaliger Belastung definiert. Der Druck-E-Modul von Mauersteinen wird im Druckversuch in Richtung Steinhöhe ermittelt. Der Zug-E-Modul von Mauersteinen wird in einaxialen Zugversuchen, meist in Richtung Steinlänge, bestimmt.

Der Elastizitätsmodul von Mauersteinen beeinflusst die Steifigkeit von Mauerwerk maßgeblich. Für eine erste Abschätzung des Druck-E-Moduls von Kalksand- und Porenbetonsteinen können nach [1] die in Tabelle 3 angegebenen Regressionsgleichungen angesetzt werden. Zusammenhänge zwischen dem Zug-E-Modul und der Steinzugfestigkeit bei einer Zugbeanspruchung in Steinlänge bzw. zwischen dem Zug-E-Modul und dem Druck-E-Modul werden

in [1] angegeben. Diese sind ebenfalls in Tabelle 3 zusammengestellt.

### 2.2.2 Querdehnungsmodul, Querdehnhzahl

Zur Bestimmung des Querdehnungsmoduls von Mauersteinen unter einer Druckbeanspruchung in Richtung Steinhöhe wird die Spannung auf die zugehörige, quer zur Belastungsrichtung, d. h. in Richtung Steinlänge bzw. -breite, gemessene Dehnung bezogen. Diese Kenngröße ist von maßgebender Bedeutung für die Drucktragfähigkeit von Mauerwerk. Bei einem ungünstigen Verhältnis der Querdehnungsmoduln von Mauermörtel und Mauerstein wird Letzterer stärker auf Zug beansprucht, was die Druckfestigkeit des Mauerwerks reduziert. Werte für den Querdehnungsmodul von Mauersteinen sind in Tabelle 4 angegeben (vgl. [1]).

Neben dem E-Modul spielt auch die Querdehnhzahl  $\mu$  der Mauersteine in Bezug auf die Mauerwerkdruckfestigkeit eine wesentliche Rolle. Die Querdehnhzahl ergibt sich im Druckspannungszustand als Absolutwert aus dem Verhältnis von Querdehnung zu Längsdehnung bei einem Drittel der Höchstspannung. Wertebereiche für die Querdehnhzahl verschiedener Mauersteine sind ebenfalls in Tabelle 4 aufgeführt (vgl. auch [4]).

**Tabelle 3.** Mauersteine; Regressionsgleichungen zur Bestimmung der Elastizitätsmoduln unter Druck- sowie Zugbeanspruchung in Abhängigkeit von der Steindruck- bzw. -zugfestigkeit bzw. des Druck-E-Moduls für die jeweilige Belastungsrichtung (aus [1])

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

$E_D$  Druck-E-Modul in Richtung Steinhöhe in N/mm<sup>2</sup>  
 $E_{Z,i}$  Zug-E-Modul in Richtung Steinlänge in N/mm<sup>2</sup>  
 $\beta_{D,st}$  Mauersteindruckfestigkeit in Richtung Steinhöhe in N/mm<sup>2</sup>  
 $\beta_{Z,i}$  Mauersteinzugfestigkeit in Richtung Steinlänge in N/mm<sup>2</sup>  
 $n$  Anzahl der Mittelwerte  
 $(n_i)$  Anzahl der Einzelwerte  
 Best. Bestimmtheitsmaß der gewählten Regression

**Tabelle 4.** Mauersteine; Querdehnungsmodul und Querdehnzahl (Wertebereiche aus [1] und [4])

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

Werte in Klammern: Anzahl der Versuchswerte

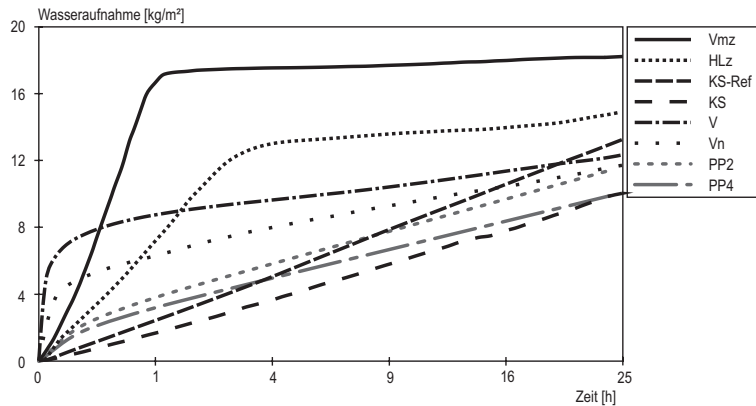
**2.3 Kapillare Wasseraufnahme**

Die Wasseraufnahmefähigkeit von Mauersteinen kann durch die kapillare Wasseraufnahme bzw. den Wasseraufnahmekoeffizienten  $\omega$  gekennzeichnet werden. Diese sind wichtige Kenngrößen für die Beurteilung des Wasserabsaugens aus dem Fugenmörtel durch den Mauerstein, für die Wasseraufnahme von Sichtflächen bei Beregnung, vor allem bei Schlagregen, sowie für die Beurteilung des Austrocknungsverhaltens. Werden Mauersteine mit schneller Saugcharakteristik – gekennzeichnet durch hohe Wasseraufnahmekoeffizienten  $\omega$  – vor dem Vermörteln nicht vorgehäst, so kann dem Mörtel nach dem Vermauern zu viel Wasser entzogen werden. Mögliche Folgen sind eine zu geringe Verbundfestigkeit zwischen Mauermörtel und Mauerstein (Haftscher- und Haftzugfestigkeit) und/oder eine zu geringe Mörteldruckfestigkeit in der Fuge. Dies trifft stets für Mauersteine mit einem hohen Anteil an kleinen Kapillarporen und geringem Feuchtegehalt vor dem Vermörteln zu. Die kapillare Wasseraufnahme wird i. d. R. nach DIN EN ISO 15148 [28] geprüft. Ausgehend vom

**Tabelle 5.** Mauersteine; Wasseraufnahmekoeffizient (Werte bzw. Wertebereiche aus [5] und [6])

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

$n$  Anzahl der Einzelwerte



**Bild 1.** Zeitlicher Verlauf der Wasseraufnahme unterschiedlicher Mauersteine (Werte nach [5] ergänzt, aus [6])

getrockneten Zustand wird bei ständigem Wasserkontakt der Saugfläche der zeitliche Verlauf der Wasseraufnahme ermittelt. Dieser ist bei reinen kapillaren Saugvorgängen im Wurzelmaßstab annähernd linear. Die Steigung entspricht dem Wasseraufnahmekoeffizienten  $\omega$  in  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ .

Tabelle 5 enthält  $\omega$ -Werte von Mauersteinen nach [5] und [6]. In Bild 1 wird der an verschiedenen Mauersteinen bestimmte zeitliche Verlauf der kapillaren Wasseraufnahme dargestellt. Es wird ersichtlich, dass Mauerziegel in kürzester Zeit Wasser aufnehmen, während Kalksandsteine über einen langen Zeitraum kontinuierlich saugen.

### 3 Mauermörtel

#### 3.1 Allgemeines

Die Eigenschaften von Mauermörteln werden in der Regel durch den Kontakt mit den Mauersteinen beeinflusst. Abhängig von der Mauersteinart und dem Feuchtegehalt des Mauersteins beim Vermauern wird dem Mauermörtel mehr oder weniger Wasser über einen kurzen oder langen Zeitraum entzogen (vgl. Abschnitt 2.3). Dieser Effekt kann sich auf die Mörtel-eigenschaften, insbesondere die Festigkeitseigenschaften, auswirken (siehe Abschnitt 3.2.2).

#### 3.2 Festigkeitseigenschaften

##### 3.2.1 Prismendruckfestigkeit

Die Druckfestigkeit von Mauermörteln wird an Normprismen nach DIN EN 1015-11 [29] bestimmt. Auf Grundlage der Prismenfestigkeit erfolgt eine Zuordnung zu den Mörtelklassen nach DIN EN 998-2 [30] (siehe Tabelle 6).

Für die Verwendung von Mörteln nach DIN EN 998-2 für Mauerwerk nach DIN EN 1996-1-1/NA [27] sind in DIN EN 20000-412 [31] Anforderungen an weitere Eigenschaftswerte festgelegt. Für alle Mörtelarten muss

**Tabelle 6.** Mauermörtel; Mörtelklassen nach DIN EN 998-2 [30] und Anforderungswerte an die Prismendruckfestigkeit

Mörtelart	Mörtelklasse nach DIN EN 998-2	Druckfestigkeit $f_m$ in $\text{N}/\text{mm}^2$
Normalmauermörtel	M2,5	2,5
	M5	5
	M10	10,0
	M20	20,0
Leichtmauermörtel	M5 (M10) <sup>a)</sup>	5,0 (10,0) <sup>a)</sup>
Dünnbettmörtel	M10	10,0

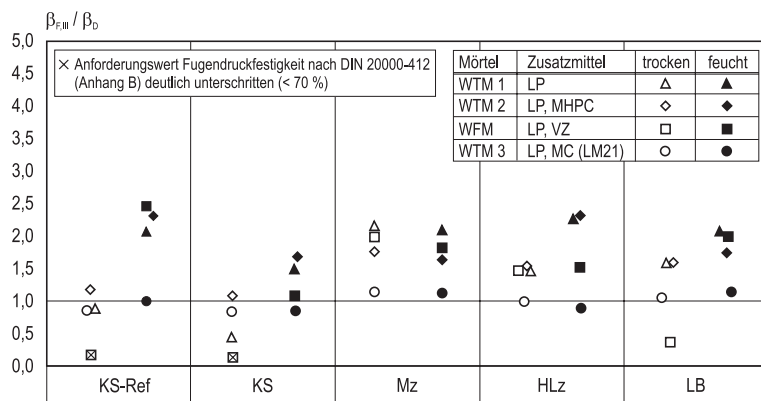
a) Die Mörtelgruppe M10 gilt für Leichtmörtel ohne Nachweis der Längs- und Querverformbarkeit.

der Nachweis der charakteristischen Anfangsscherfestigkeit (siehe Abschnitt 4.2) und für Normal- und Leichtmörtel der Nachweis der Fugendruckfestigkeit (siehe Abschnitt 3.2.2) erfolgen. Für Leichtmörtel bestehen zusätzliche Anforderungen an den Längs- und Querdehnungsmodul (siehe Abschnitte 3.3.1 und 3.3.2) sowie die Trockenrohdichte bzw. die Wärmeleitfähigkeit.

##### 3.2.2 Fugendruckfestigkeit

Die Wasseraufnahme der Mauersteine aus dem Mauermörtel kann sich festigkeitsmindernd oder -steigernd auf die Mörteldruckfestigkeit auswirken. Festigkeitssteigerungen ergeben sich nach [7] dann, wenn abgesaugtes Wasser zu einer wirkungsvollen Senkung des  $w/z$ -Werts und damit zu einer Verdichtung des Gefüges führt. Dagegen ergeben sich Festigkeitsminderungen, wenn in der Fuge infolge eines zu hohen Wasserentzugs die für eine vollständige Hydratation erforderliche Wassermenge nicht mehr zur Verfügung steht.

Die Bestimmung der Fugendruckfestigkeit kann nach DIN 18555-9 [32] mit drei unterschiedlichen Verfahren erfolgen. In Bild 2 ist die auf die Prismen-



**Bild 2.** Fugendruckfestigkeit  $\beta_{F,III}$  bezogen auf die Prismen-Druckfestigkeit  $\beta_D$ ; Prüfalter: 28 Tage (Werte aus [8], aus [6])

Druckfestigkeit  $\beta_D$  bezogene Fugendruckfestigkeit  $\beta_{F,III}$  (Verfahren III der DIN 18555-9) verschiedener Mauerstein-Mauermörtel-Kombinationen dargestellt (Werte aus [8]).

Die Mauersteine wurden in unterschiedlichen Feuchtezuständen vermauert: trocken, d. h. mit Ausgleichsfeuchte bei Lagerung in 20/65, sowie feucht, d. h. mit einem Feuchtegehalt von rd. 10 M.-%. Als Mauermörtel wurden Werk trocken- (WTM) und Werkfrischmörtel (WFM) mit folgenden Zusatzmitteln verwendet: Luftporenbildner (LP), Verzögerer (VZ), Methylcellulose (MC) und Methylhydroxypropylcellulose (MHPC). Vor allem bei trocken vermauerten Kalksandsteinen können sich je nach Feuchtezustand bezogene Druckfestigkeiten in der Fuge  $\leq 1,0$  ergeben. Bei Verwendung von Werkfrischmörtel mit einem geringen Wasserrückhaltevermögen können sich Festigkeitseinbußen in Kombination mit Kalksand-Referenzsteinen (KS-Ref), KS und Leichtbetonsteinen (jeweils trocken vermauert) ergeben. Um bei der Entwicklung neuer Mörtelrezepturen auch kritische Fälle identifizieren zu können, müssen Mauermörtel nach DIN EN 998-2 [30] die Mindestanforderungswerte an die Fugendruckfestigkeit nach DIN 20000-412 [31] erfüllen. Der Nachweis erfolgt in der Regel mit dem in Bezug auf das Saugverhalten als ungünstig eingestuftem Kalksand-Referenzstein.

In der Regel führt der Wasserentzug jedoch zu einer Festigkeitssteigerung des Mauermörtels. Bei den untersuchten Mauerziegeln (schnelle Wasseraufnahme in kurzem Zeitraum) ist die Fugendruckfestigkeit, unabhängig vom Feuchtezustand der Mauersteine und der Mörtelart, größer als die Prismenfestigkeit (vgl. [8]).

Die Fugendruckfestigkeit von Mörtel, der in Kontakt zum Mauerstein erhärtet, sollte insbesondere bei weiterführenden Analysen, z. B. in der Forschung und Entwicklung, und besonderen Nachweisen verwendet werden. So kann die Fugendruckfestigkeit auch bei neuen Ansätzen für die rechnerische Bestimmung der Mauerwerkdruckfestigkeit berücksichtigt werden.

### 3.2.3 Zugfestigkeit

Die Prüfung der Zugfestigkeit von Mauermörtel ist nicht normativ geregelt. Für Normalmauermörtel ergab sich nach [1] der folgende Zusammenhang zwischen Zug- und Druckfestigkeit:

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

### 3.3 Verformungseigenschaften

#### 3.3.1 Längsdehnungsmodul (E-Modul)

Der Längsdehnungsmodul von Mauermörtel wird im statischen Druckversuch an Mörtelgroßprismen nach DIN 18555-4 [33] ermittelt. In Tabelle 7 sind Beziehungen zwischen dem Längsdehnungsmodul (E-Modul) und der Normdruckfestigkeit  $\beta_D$  nach [9] angegeben (siehe auch Bild 3).

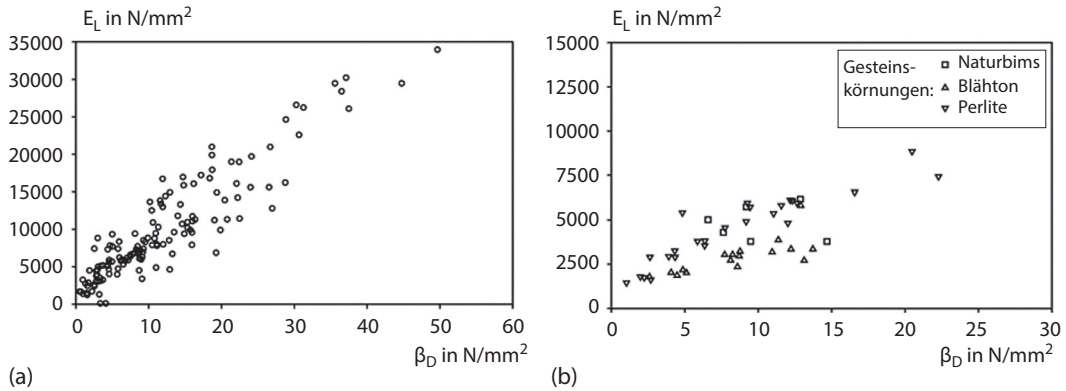
#### 3.3.2 Querdehnungsmodul

Ist der Querdehnungsmodul des Mauermörtels deutlich kleiner als der des Mauersteins, so entstehen durch die größere Querverformbarkeit des Lagerfugenmörtels zusätzliche Querkzugspannungen im Stein, wodurch die Mauerwerkdruckfestigkeit verringert werden kann. Dies ist besonders bei leichten Leichtmauermörteln mit sehr verformbaren Gesteinskörnungen, z. B. mineralischen Perliten, der Fall.

**Tabelle 7.** Mauermörtel; Längsdehnungsmodul  $E_L$  (aus [1])

Mörtelart	$E_L$
	N/mm <sup>2</sup>
Normalmauermörtel	$2100 \cdot \beta_D^{0,7}$ bzw. $\leq 700 \cdot \beta$
Leichtmauermörtel mit Blähton	$1200 \cdot \beta_D^{0,6}$
Leichtmauermörtel mit Perliten	$1200 \cdot \beta_D^{0,4}$

$\beta_D$  Druckfestigkeit in N/mm<sup>2</sup>

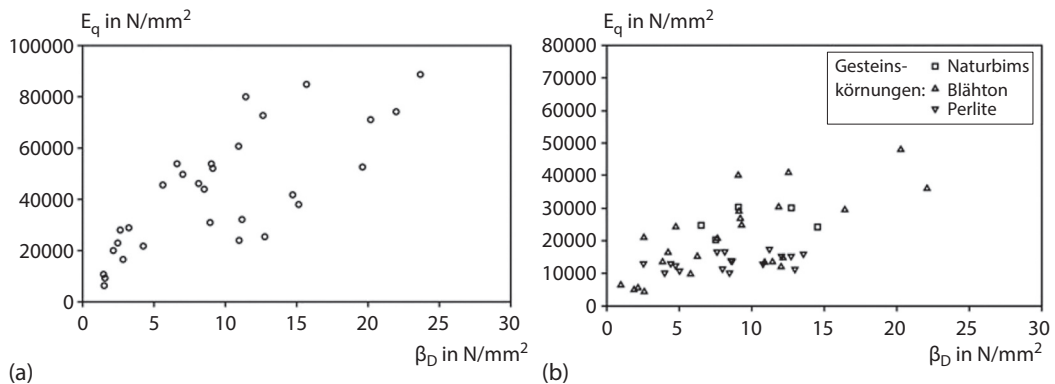


**Bild 3.** Mauermörtel; Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Normdruckfestigkeit  $\beta_D$  [1]; (a) Normalmörtel, (b) Leichtmörtel

**Tabelle 8.** Mauermörtel; Querdehnungsmodul  $E_q$  nach [10] (aus [1])

Mörtelart	$n$	$\rho_d$	$\beta_D$	$E_q$
	–	kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup>
Normalmauermörtel	49	1,1 ... 1,9	1,5 ... 24	1,2 ... 116
Dünnbettmörtel	5	1,4 ... 1,6	14 ... 21	36 ... 49
Leichtmauermörtel LM 21 (Polystyrol, Perlite, Naturbims)	23	0,6 ... 0,8	8,4 ... 11,6	6,7 ... 15
Leichtmauermörtel LM 36 (Blähton, Naturbims, Blähschiefer)	36	0,8 ... 1,2	4,0 ... 21	16 ... 48

$n$  Anzahl der Versuchswerte  
 $\rho_d$  Trockenrohddichte in kg/dm<sup>3</sup>  
 $\beta_D$  Druckfestigkeit in N/mm<sup>2</sup>



**Bild 4.** Mauermörtel; Querdehnungsmodul in Abhängigkeit von der Normdruckfestigkeit  $\beta_D$  [1]; (a) Normalmörtel, (b) Leichtmörtel

Der Querdehnungsmodul von Mauermörtel wird im Allgemeinen gemeinsam mit dem Längsdehnungsmodul bestimmt. Dabei wird die Druckspannung auf die zugehörige gemessene Querdehnung bezogen. In Tabelle 8 sind Wertebereiche für Querdehnungsmoduln von Mauermörteln zusammengestellt. Ein

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

**Tabelle 9.** Mauermörtel; Endschwindwerte  $\varepsilon_s$  nach [11], Normalmörtel – Anhaltswerte (aus [2])

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

### 3.3.3 Feuchtedehnung (Schwinden)

Das Schwinden des Mörtels kann insbesondere bei einem hohen Mörtelanteil und kleinformatigen Mauersteinen die Rissicherheit des Mauerwerks beeinflussen. Schnelles und starkes Schwinden führt gelegentlich im oberflächennahen Bereich zum Ablösen des Fugenmörtels vom Mauerstein. Das Schwinden kann nach DIN 52450 [34] an gesondert in Stahlprismen hergestellten Mörtelprismen ermittelt werden. Schwindendwerte für Normalmauermörtel sind in Tabelle 9 in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte des Schwindklimas angegeben. Endschwindwerte von Leichtmörteln können je nach verwendetem Leichtzuschlag bis etwa doppelt so groß sein. 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.

## 4 Verbund zwischen Mauerstein und Mauermörtel

### 4.1 Allgemeines

Der Verbund zwischen Mauerstein und Mauermörtel beeinflusst maßgeblich die Tragfähigkeit und Rissicherheit von Mauerwerk. In Mauerwerkbauteilen, die durch horizontale Lasten auf Schub oder Biegezug oder auch infolge Zwangsspannungen auf Zug beansprucht werden, müssen Zug- und Schub- bzw. Scherkräfte in den Verbundfugen zwischen den einzelnen Mauersteinen übertragen werden.

Bei der Verbundfestigkeit wird zwischen der (Haft-) Scherfestigkeit und der Haftzugfestigkeit unterschieden. Die Haftzugfestigkeit ist die wesentliche Verbundeigenschaft bei einer Zugbeanspruchung rechtwinklig zur Fuge. Die Haftscherfestigkeit beschreibt die entlang der Grenzfläche Mauerstein/Mauermörtel aufnehmbaren Scherkräfte parallel zur Fuge. Bei gleichzeitiger Wirkung einer Auflast/Normalkraft zur Grenzfläche erhöht sich die übertragbare Scherkraft um den auflastabhängigen Reibungsanteil. Die Scherfestigkeit  $\beta_S$  setzt sich somit aus der Haftscherfestigkeit  $\beta_{HS}$  – der

Verbundfestigkeit infolge Adhäsion und mechanischer Verzahnung zwischen Mauerstein und Mauermörtel – und einem auflastabhängigen Reibungsanteil zusammen und kann durch die Mohr-Coulombsche Bruchbedingung beschrieben werden. Es gilt:

$$\beta_S = \beta_{HS} + \mu_H \cdot \sigma_D \quad (1)$$

mit

$\beta_S$  Scherfestigkeit

$\beta_{HS}$  Haftscherfestigkeit

$\mu_H$  Haftreibungsbeiwert

$\sigma_D$  Druckspannung rechtwinklig zur Lagerfuge

Die Steigung der Geraden der Mohr-Coulombschen Bruchbedingung wird als Haftreibungsbeiwert  $\mu_H$  bezeichnet. Nach Überschreiten der Scherfestigkeit nehmen die übertragbaren Scherspannungen mit zunehmender Verschiebung ab und konvergieren gegen einen auflastabhängigen Endwert. Die übertragbaren Schubspannungen sind abhängig von der Gleitreibung und können mit  $\sigma_D \cdot \mu_G$  berechnet werden. Analog zum Haftreibungsbeiwert  $\mu_H$  kann  $\mu_G$  als Gleitreibungsbeiwert bezeichnet werden. Die Gleitreibungs- und Haftreibungsbeiwerte müssen nicht identisch sein. Weiterführende Grundlagen zum Verbundverhalten können u. a. [3] und [12] entnommen werden.

### 4.2 Haftscherfestigkeit

Die Haftscherfestigkeit wird normativ nach DIN EN 1052-3 [35] geprüft. Die Prüfung kann mit einer zusätzlichen Normalkraftbeanspruchung (mit drei unterschiedlichen Auflaststufen, Verfahren A) oder ohne zusätzliche Normalkraftbeanspruchung (Verfahren B) geprüft werden. Bei der Prüfung ohne zusätzliche Normalkraftbeanspruchung wird die Anfangsscherfestigkeit (Haftscherfestigkeit) direkt ermittelt. Bei der Prüfung mit drei unterschiedlichen Auflaststufen wird die Anfangsscherfestigkeit durch Extrapolation der auflastabhängigen Scherfestigkeit ermittelt. Der Vorteil der Prüfung mit Auflast besteht u. a. darin, dass zugleich der Haftreibungskoeffizient ermittelt werden kann. Die charakteristische Anfangsscherfestigkeit wird nach DIN 1052-3 entweder aufgrund einer statistischen Auswertung oder durch Multiplikation des Mittelwerts mit dem Faktor 0,8 ermittelt.

Bei Mauermörteln nach Eignungsprüfung erfolgt der Nachweis der Haftscherfestigkeit in der Regel mit dem in Bezug auf das Saugverhalten ungünstig eingestuftes Kalksand-Referenzstein. In DIN 20000-412 sind Mindestwerte der nachzuweisenden Anfangsscherfestigkeit festgelegt (siehe Tabelle 10).

Für die Ermittlung der charakteristischen Biegezugfestigkeit und der charakteristischen Schubfestigkeit sind für den Fall Fugenversagen in DIN EN 1996-1-1/NA [27] Rechenwerte für die Haftscherfestigkeit  $f_{vk0}$  in Abhängigkeit von der Mauermörtelart, jedoch nicht differenziert nach der Mauersteinart, angegeben. Die Rechenwerte wurden unter Berücksichtigung

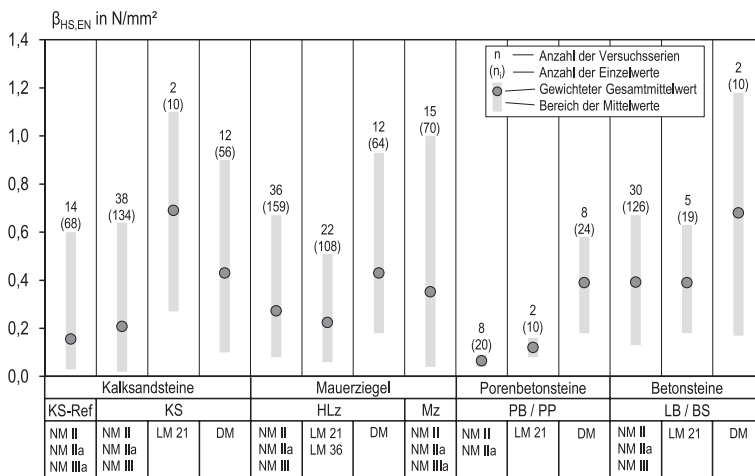
**Tabelle 10.** Stein/Mörtel; Mindestanforderungen an die Haftscherfestigkeit  $\beta_{HS}$  (Werte aus [12])

Mörtelart	Mörtelklasse nach DIN EN 998-2	Mindestanforderungen nach DIN 20000-412 an die charakteristische Anfangsscherfestigkeit (Haftscherfestigkeit) geprüft nach DIN EN 1052-3, Verfahren B	Werte für $f_{vk0}$ nach DIN EN 1996-1-1/NA
	–	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
Normalmörtel	M 2,5	≥ 0,04	0,08
	M 5	≥ 0,08	0,18
	M 10	≥ 0,10	0,22
	M 20	≥ 0,12	0,26
Leichtmörtel (LM21/LM36)	M 5 (M 10) <sup>a)</sup>	≥ 0,08 (0,10) <sup>a)</sup>	0,18
Dünnbettmörtel	M 10	≥ 0,20	0,22

a) Die Mörtelgruppe M10 gilt für Leichtmörtel ohne Nachweis der Längs- und Querverformbarkeit.

der Bemessungsansätze festgelegt und an Bauteilversuchen kalibriert. Für Mauerwerk mit unvermörtelten Stoßfugen werden die Werte ggf. abgemindert. Bereits in [13] wird ausgeführt, dass die normativen Rechenwerte der Haftscherfestigkeit nicht direkt mit den nachzuweisenden Prüfwerten mit dem Kalksand-Referenzstein vergleichbar und deshalb prüftechnisch bedingt meist deutlich kleiner sind. Die zurückgezogene DIN 18555-5 [36] regelte ebenfalls ein Prüfverfahren zur Bestimmung der Haftscherfestigkeit. Vergleichsuntersuchungen zwischen den Prüfverfahren nach DIN EN 1052-3 und DIN 18555-5 haben gezeigt, dass die Prüfwerte der Haftscherfestigkeit nach dem EN-Verfahren je nach Prüfrandbedingungen etwa halb so groß wie die nach dem DIN-Verfahren sein können (vgl. [12]). Der Prüffaktor resultiert aus einer unterschiedlichen Normal- und Schubspannungsverteilung in den Fugen, wie nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen gezeigt haben (s. [12]).

Es sollte das Ziel sein, zukünftig charakteristische Haftscherfestigkeitswerte als reine Baustoffkenngrößen (ohne z. B. den Einfluss der Stoßfugenvermörtelung) festzulegen, die auf Daten des genormten Haftscherprüfverfahrens nach DIN EN 1052-3 basieren und entsprechend in zukünftigen Bemessungsmodellen berücksichtigt werden. Daher wird dringend empfohlen, insbesondere im Rahmen von Forschungsarbeiten zum Tragverhalten von Mauerwerk auch die (Haft)Scherfestigkeit nach der DIN EN 1052-3 in Kombination mit dem jeweiligen Stein und zum Vergleich mit den Anforderungen der DIN 200000-412 mit dem Kalksand-Referenzstein zu prüfen. Das Institut für Bauforschung der RWTH Aachen hat im Rahmen eines Forschungsprojekts [14] eine sehr umfassende Auswertung von Haftscherfestigkeitsuntersuchungen durchgeführt. In Bild 5 sind Haftscherfestigkeitswerte nach dem EN-Verfahren nach [12] dargestellt. Auf eine Darstel-



**Bild 5.** Stein/Mörtel; Bandbreite der Haftscherfestigkeitswerte nach dem EN-Verfahren, Werte aus [12]

lung der Ergebnisse nach dem DIN-Verfahren wird bewusst verzichtet.

Die große Bandbreite der Werte resultiert aus z. T. sehr unterschiedlichen Prüfbedingungen (Prüfalter, Lagerungsklima etc.). Vor allem der Feuchtegehalt der Mauersteine beim Vermauern kann aufgrund des dadurch beeinflussten Wasserabsaugens durch die Mauersteine und die dadurch veränderten Eigenschaften des

Mauermörtels zu sehr unterschiedlichen Haftscherfestigkeitswerten führen (vgl. auch Abschnitt 3.2.2).

In Tabelle 11 sind die Werte aus [12] nach Mörtelgruppen und mit einer Differenzierung nach Steinarten zusammengefasst. Es wird deutlich, dass eine Differenzierung auch nach unterschiedlichen Steinarten grundsätzlich sinnvoll sein kann und hierdurch Tragfähigkeitsreserven genutzt werden könnten. In Tabelle 11 ist

**Tabelle 11.** Stein/Mörtel; Haftscherfestigkeit  $\beta_{HS}$  (Werte aus [12])

Mauermörtel	Mauerstein	$n$ ( $n_i$ )	$h_m$	min $x$	max $x$	MW	Vorschlag $f_{vko}$
			M.-%				
NM II (M 2,5)	KS-Referenz	2 (9)	3,0 ... 12,1	0,10	0,24	0,17	0,06
	KS	4 (40)	14,4	0,16	0,64	0,37	
	HLz	4 (32)	0,1 ... 10,9 <sup>a)</sup>	0,23	0,35	0,30	
	Mz	2 (10)	0,2 ... 7,7	0,37	0,57	0,47	
	PB, PP	2 (10)	11,3 ... 54,2	0,05	0,09	0,07	
	LB / BS	4 (21)	–	0,30	0,39	0,35	
NM IIa (M 5)	KS-Referenz	10 (49)	5,5 ... 11,3 <sup>a)</sup>	0,03	0,27	0,10	0,14
	KS	21 (>67)	1,8 ... 10,5 <sup>a)</sup>	0,02	0,31	0,13	
	HLz	27 (>111)	0 ... 21,0 <sup>a)</sup>	0,08	0,67	0,25	
	Mz	11 (50)	0,1 ... 8,0 <sup>a)</sup>	0,04	0,73	0,20	
	PB, PP	6 (>10)	4,7 ... 54,7	0,04	0,07	0,06	
	LB / BS	21 (>89)	0 ... 7,9 <sup>a)</sup>	0,13	0,64	0,25	
LM 21 (M 5)	KS	2 (10)	3,2 ... 12,1	0,27	1,10	0,69	
	HLz	7 (35)	0 ... 19,0 <sup>a)</sup>	0,06	0,38	0,17	
	PB, PP	2 (10)	3,2 ... 52,9	0,08	0,16	0,12	
	LB / BS	5 (>19)	2,8 ... 16,8 <sup>a)</sup>	0,18	0,63	0,39	
LM 36 (M 5)	HLz	15 (73)	0 ... 21,0	0,12	0,51	0,25	
NM III (M 10)	KS	13 (>27)	1,5 ... 13,2 <sup>a)</sup>	0,03	0,35	0,16	0,18
	HLz	5 (>16)	0, ... 0,1 <sup>a)</sup>	0,12	0,64	0,37	
	LB / BS	5 (>16)	3,1 <sup>a)</sup>	0,31	0,67	0,51	
NM IIIa (M 20)	KS-Referenz	2 (10)	2,3 ... 11,5	0,21	0,60	0,41	0,21
	Mz	2 (10)	0,1 ... 6,9	0,97	1,00	0,99	
DM (M 10)	KS	12 (56)	2,7 ... 6,8 <sup>a)</sup>	0,10	0,90	0,43	0,35 (0,18) <sup>b)</sup>
	HLz	12 (64)	0 <sup>a)</sup>	0,18	0,93	0,43	
	PB, PP	8 (>24)	4,9 ... 29,0 <sup>a)</sup>	0,18	0,58	0,39	
	LB / BS	2 (10)	5,1 <sup>a)</sup>	0,17	1,18	0,68	

a) Feuchtegehalte liegen nicht bei allen Versuchsserien vor

b) Für Mauerwerk aus Mauersteinen mit einem Lochanteil größer 15 % ist der Wert auf 0,18 zu reduzieren.

PV Prüfverfahren

$n$  Anzahl der Versuchsserien, ( $n_i$ ): Anzahl der Einzelwerte

$h_m$  Feuchtegehalt der Mauersteine

min  $x$  Kleinster Mittelwert

max  $x$  Größter Mittelwert

MW Mittelwert

weiterhin – zunächst steinunabhängig – ein Vorschlag für die charakteristische Anfangsscherfestigkeit  $f_{vk0}$  als Grundlage für die Normungsarbeit aufgeführt. Diese Werte fanden in vergleichbarer Form bereits Eingang in die Entwurfsfassung der DIN 1053-13 [37] (vgl. auch [15]).

Bei einer Biegezugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen wird zur Berechnung der Biegezugfestigkeit bei Fugenversagen ersatzweise die Haftscherfestigkeit angesetzt (s. Abschnitt 5.4.3). Zutreffender wäre stattdessen, die Torsionsscherfestigkeit zugrunde zu legen. In [3], [12] und [16] wird darauf speziell eingegangen.

### 4.3 Haftzug- und Biegehaftzugfestigkeit

Die Haftzugfestigkeit beschreibt die Verbundfestigkeit in der Grenzfläche zwischen Mauerstein und Mauermörtel bei einer zentrischen Zugbeanspruchung. Das Vorhandensein eines Biegemoments, das nur in einem Teilbereich (Zugzone) eine Zugspannung hervorruft, erfordert die Definition einer weiteren Kenngröße, genannt Biegehaftzugfestigkeit. Dieser Kennwert ist u. a. für die Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen von Relevanz.

Eine Norm bzw. Richtlinie für die Prüfung der zentrischen Haftzugfestigkeit existiert nicht.

Die Prüfung der Biegehaftzugfestigkeit mit dem Bondwrench-Verfahren ist in DIN EN 1052-5 [38] geregelt. In Tabelle 12 sind Versuchsdaten aus [1] zusammengefasst.

## 5 Mauerwerk

### 5.1 Allgemeines

Die Eigenschaftswerte von Mauerwerk können aufgrund seiner ausgeprägten Anisotropie und Heterogenität in Abhängigkeit von den zahlreichen in der Praxis vorkommenden Mauerstein-Mauermörtel-Kombinationen sehr unterschiedlich sein und weichen zudem teilweise deutlich von denen anderer Baustoffe ab. Mauerwerk ist 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. Die nachfolgenden Abschnitte enthalten eine Übersicht über die für die unterschiedlichen Beanspruchungen maßgebenden Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Mauerwerk.

### 5.2 Druckbeanspruchung senkrecht zur Lagerfuge

#### 5.2.1 Druckfestigkeit

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

Die Prüfung der Mauerwerkdruckfestigkeit ist in DIN EN 1052-1 [39] geregelt. Nach DIN EN 1052-1 erfolgt die Prüfung an kleinen, sogenannten RILEM-Mauerwerkswänden. Alternativ kann die Druckprü-

**Tabelle 12.** Stein/Mörtel; Haftzugfestigkeit  $\beta_{HZ}$ ; Prüfalter im Allgemeinen mind. 14 Tage (aus [1])

Mauerstein		Mauermörtel	Prüfverfahren <sup>b)</sup>	Haftzugfestigkeit $\beta_{HZ}$			
Art, Sorte	Feuchtezustand <sup>a)</sup>			MW	min $x$	max $x$	$n$ ( $n_i$ )
				N/mm <sup>2</sup>			–
HLz	l	NM IIa	Z	0,48	c)	c)	16
	l, f	NM IIa	BW	0,44	0,23	0,58	5
	l	LM 21	BW	0,07	c)	c)	2
	f	LM 21	BW	0,17	c)	c)	2
	l	DM	BW	0,19	0,10	0,32	3 (15)
KS	l	NM IIa	BW	0,14	c)	c)	2
	f	NM IIa	BW	0,42	c)	c)	1
	l, f	DM	BW	0,61	0,43	c)	20
	l	DM	Z	0,42	0,24	0,82	6 (30)
KS-PE	l	DM	Z	0,67	0,49	0,82	5
	l	DM	Z	0,29 <sup>d)</sup>	0,26 <sup>d)</sup>	0,36 <sup>d)</sup>	5 <sup>d)</sup>
PP	l, f	DM	Z	0,37	0,25	0,50	14

- a) l, f: lufttrocken, feucht  
 b) Z: zentrisch; BW: Bondwrench  
 c) keine Angabe von Einzelwerten  
 d) Prüfalter unter 14 Tage

- MW Mittelwert  
 min  $x$  Kleinstwert  
 max  $x$  Größtwert  
 $n$  Anzahl der Versuchsreihen  
 $(n_i)$  Anzahl der Einzelwerte

fung auch an geschosshohen Wänden erfolgen. Bei der Bewertung der Prüfergebnisse ist der Einfluss der Schlankheit (Verhältnis Wandhöhe/Wanddicke) zu berücksichtigen (siehe u. a. [17]).

Die Druckfestigkeit von Mauerwerk hängt nicht nur von den Festigkeitseigenschaften seiner Ausgangsstoffe ab, sondern von einer Vielzahl weiterer Parameter. In [4] wird auf zwei wesentliche Parameter näher eingegangen: die horizontalen Verformungsunterschiede von Mauerstein und Mauermörtel unter vertikaler Druckbeanspruchung sowie die hygri-sche Wechselwirkung zwischen dem Wasserabsaugverhalten des Mauersteins und dem Wasserrückhaltevermögen des Mörtels.

Ein theoretisch begründetes und abgesichertes Ingenieurmodell zur rechnerischen Bestimmung der Mauerwerkdruckfestigkeit unter Berücksichtigung der wesentlichen Einflussparameter liegt trotz zahlreicher Untersuchungen zu dieser Thematik bislang nicht vor. Aus diesem Grund wird die Druckfestigkeit von Mauerwerk in DIN EN 1996-1-1/NA [27] weiterhin nur in grober Näherung auf Grundlage von Versuchsergebnissen mittels eines empirischen Modells aus den einaxialen Druckfestigkeitswerten der Einzelkomponenten Mauerstein und Mauermörtel abgeleitet.

Zur Ermittlung eines charakteristischen Werts  $f_k$  der Mauerwerkdruckfestigkeit, bezogen auf eine theoretische Schlankheit  $\lambda = 0$ , wird nach [27] folgende Gl. (2) angewendet:

$$f_k = K \cdot f_{st}^\alpha \cdot f_m^\beta \quad (2)$$

mit

$f_k$  charakteristische Druckfestigkeit von Mauerwerk in  $\text{N/mm}^2$

$K, \alpha, \beta$  Faktor und Exponenten, ermittelt über Regressionen ( $\beta = 0$  für LM und DM)

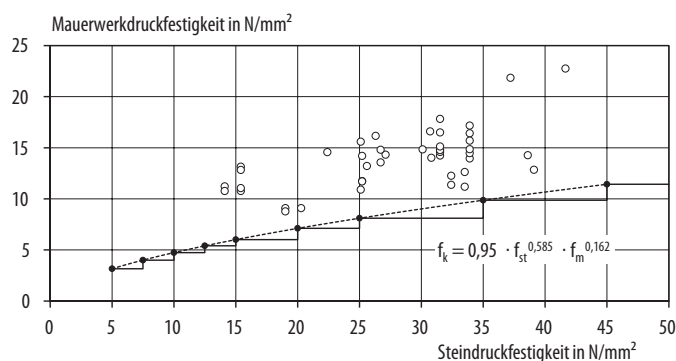
$f_{st}$  umgerechnete mittlere Mindeststeindruckfestigkeit in  $\text{N/mm}^2$

$f_m$  die der Mörtelklasse zugeordnete Festigkeit des Mauermörtels in  $\text{N/mm}^2$

Für die Ermittlung der Parameter  $K$ ,  $\alpha$  und  $\beta$  in DIN EN 1996-1/NA wurden alle wesentlichen Eigenschaftswerte von Mauerwerkdruckversuchen in Datenbanken erfasst und diese unterschieden nach Mauerstein- und Mauermörtelarten ausgewertet. Hinweise zur Auswertung derartiger Versuche und Hintergründe sind u. a. in [17] und [18] beschrieben. In [18] sind darüber hinaus die Auswerteergebnisse von Versuchen an Leichbeton-Mauerwerk umfassend dargestellt.

Die in DIN EN 1996-1/NA festgelegten charakteristischen Werte orientieren sich natürlich auf der sicheren Seite liegend an den unteren Grenzwerten der Versuchswerte. Bild 6 zeigt beispielhaft anhand der Auswertung von Druckversuchen an Mauerwerk aus Kalksand-Vollsteinen und Kalksand-Blocksteinen in Kombination mit Normalmauermörtel der Mörtelklasse M5, wie unterschiedlich hoch die Druckfestigkeit von Mauerwerk im Versuch bei annähernd gleichen Steindruckfestigkeitswerten ausfallen kann. Dargestellt sind zum einen die auf eine theoretische Schlankheit der Mauerwerkswände  $\lambda = 0$  umgerechneten Versuchswerte der Mauerwerkdruckfestigkeit  $\beta_{D,mw}$  in Abhängigkeit von der geprüften Steindruckfestigkeit  $\beta_{D,st}$  einschließlich Formfaktor. Ein Umrechnungsfaktor von der Schlankheit  $\lambda = 5$  auf die Schlankheit  $\lambda = 0$  wird in der Regel nicht mehr angesetzt (siehe u. a. [18]).

Zusätzlich enthält das Diagramm die gemäß [27] ansetzbaren  $f_k$ -Werte in Abhängigkeit von der aus der jeweiligen Steinfestigkeitsklasse umgerechneten mittleren Mindeststeindruckfestigkeit  $f_{st}$ . Diese Gegenüberstellung von reinen Versuchsdaten und normativ geregelten, charakteristischen Festigkeitswerten verdeutlicht, dass es sich bei der Ableitung der Mauerwerkdruckfestigkeit aus den einaxialen Druckfestigkeitswerten der Einzelkomponenten Mauerstein und Mauermörtel in den meisten Fällen nur um eine sehr grobe Näherungslösung handeln kann. Die Mauerwerkdruckfestigkeit einiger Mauerstein-Mauermörtel-Kombinationen kann deutlich über den gemäß der europäischen Norm ansetzbaren Druckfestigkeitswerten liegen.



**Bild 6.** Druckfestigkeit von Mauerwerk aus Kalksand-Vollsteinen und Kalksand-Blocksteinen mit Normalmauermörtel der Mörtelklasse M5 in Abhängigkeit von der Steindruckfestigkeit

**Tabelle 13.** Mauerwerk; Regressionsgleichungen zur Bestimmung der Elastizitätsmoduln unter Druck (aus [1])

Mauersteinart	Mauermörtel	Druck-E-Modul (senkrecht)	
		$E_{D,s}$	Wertebereich Einzelwerte
Kalksandsteine	NM	$500 \cdot \beta_D$	$\pm 50\%$
	DM	$500 \cdot \beta_D$	$\pm 50\%$
Leichtbetonsteine	LM	$1240 \cdot \beta_D^{0,77}$	$\pm 20\%$
	NM	$1040 \cdot \beta_D$	$\pm 20\%$
	DM	$930 \cdot \beta_D (0,95)$ $600 \cdot \beta_{D,st} (0,96)$	–
Porenbetonsteine	NM	$520 \cdot \beta_D$ $570 \cdot \beta_{D,st}^{0,69}$	$\pm 50\%$
	DM	$700 \cdot \beta_D^{0,85} (0,93)$ bzw. $560 \cdot \beta_D (0,91)$ $470 \cdot \beta_{D,st}^{0,86}$ bzw. $350 \cdot \beta_{D,st}$	$\pm 20\%$
Leichtlochziegel	LM	$1480 \cdot \beta_D$	$\pm 50\%$
	NM	$1170 \cdot \beta_D$	$\pm 50\%$
	DM	$1190 \cdot \beta_D$ $460 \cdot \beta_{D,st}$	$\pm 50\%$

$\beta_D$  Mauerwerkdruckfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge in N/mm<sup>2</sup>

$\beta_{D,st}$  Mauersteindruckfestigkeit in N/mm<sup>2</sup>

Werte in Klammern: Bestimmtheitsmaß der Regression

### 5.2.2 Verformungseigenschaften

Der Elastizitätsmodul von Mauerwerk ist eine wichtige Eigenschaftskenngroße, die das Verformungsverhalten von Mauerwerk bei kurzzeitiger Lasteinwirkung in dem Last- bzw. Spannungsbereich von einem Drittel der Höchstspannung kennzeichnet. In diesem Bereich kann der Zusammenhang zwischen Belastung bzw. Spannung und der daraus resultierenden Verformung (Dehnung) näherungsweise als linear angesehen werden.

Der Druck-E-Modul wird für bestimmte Bemessungsfälle und für die Beurteilung der Rissicherheit benötigt. Er kann bei Mauerwerkversuchen mitbestimmt werden, wenn die Verformungen erfasst werden.

Rechnerisch kann der E-Modul in Abhängigkeit von der Mauerwerkdruckfestigkeit beschrieben werden. Da die Mauerwerkdruckfestigkeit nicht immer bekannt ist, kann es hilfreich sein, Werte für den Druck-E-Modul (senkrecht) in Abhängigkeit von der Steindruckfestigkeit anzugeben. In Tabelle 13 werden Gleichungen für die Berechnung des Druck-E-Moduls angegeben. Die Gleichungen entsprechen dem Stand in [1]; sofern nachvollziehbar, wurden in [6] Bestimmtheitsmaße (Best.) ergänzt.

Wie aus Tabelle 13 ersichtlich, ergeben sich für eine Druckbeanspruchung senkrecht zur Lagerfuge Ver-

hältniszerte Druck-E-Modul/Mauerwerkdruckfestigkeit in etwa zwischen 500 und 1500. Dieser Verhältniszwert, bezogen auf den charakteristischen Wert der Mauerwerkdruckfestigkeit  $f_k$ , wird in [27] als Kennzahl  $K_E$  differenziert nach Mauersteinart angegeben (siehe Tabelle 14).

Werte für den Druck-E-Modul (senkrecht) in Abhängigkeit von der Mauersteinsorte, der Steinfestigkeitsklasse sowie der Mauermörtelart sind in [1] tabelliert.

Neben dem E-Modul kann für bestimmte Bemessungsfälle auch der Völligkeitsgrad der Spannungs-

**Tabelle 14.** Mauerwerk; Druck-E-Modul gerundet in N/mm<sup>2</sup> in Abhängigkeit vom charakteristischen Wert  $f_k$  der Druckfestigkeit von Mauerwerk nach DIN EN 1996-1-1/NA [27]

Mauersteinart	Kennzahl $K_E$	
	Rechenwert	Wertebereich
Mauerziegel	1100	950 ... 1250
Kalksandsteine	950	800 ... 1250
Leichtbetonsteine	950	800 ... 1100
Betonsteine	2400	2050 ... 2700
Porenbetonsteine	550	500 ... 650

**Tabelle 15.** Mauerwerk mit Normalmauermörtel; Längsdehnung bei Höchstspannung  $\varepsilon_{u,D}$ , Völligkeitsgrad  $\alpha_0$  und Querdehnzahl  $\mu_D$  bei einer Druckbeanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen (aus [1])

Mauersteinsorte	$\varepsilon_{u,D}$		$\alpha_0$		$\mu_D$	
	Rechenwert	Wertebereich	Rechenwert	Wertebereich	Rechenwert	Wertebereich
	mm/m		–		–	
HLz	1,8	1,0 ... 2,6	0,55	0,51 ... 0,65	0,1	0,05 ... 0,23
KS, KS L	2,5	1,3 ... 3,9	0,65	0,57 ... 0,75	0,1	0,07 ... 0,12
Hbl	1,6	0,9 ... 2,5	0,60	0,57 ... 0,68	0,2	0,11 ... 0,34
V,Vbl	1,7	0,6 ... 4,0				
Hbn	1,0	0,5 ... 2,5	0,65	0,63 ... 0,70	0,2	–
PB, PP	1,8 ... 2,0	1,4 ... 3,7	0,55	0,53 ... 0,60	0,25	0,17 ... 0,32

Dehnungs-Linie bis zum Erreichen der Mauerwerkdruckfestigkeit  $\beta_{D,mw}$  bzw. zur Dehnung bei Höchstspannung  $\varepsilon_{u,D}$  (Bruchdehnung) relevant sein. Der Völligkeitsgrad ist ein Maß für die Nichtlinearität der Spannungs-Dehnungs-Linie im ansteigenden Ast und kann aus

$$\alpha_0 = 1 / (\varepsilon_{u,D} \cdot \beta_{D,mw}) \cdot \int_0^{\varepsilon_{u,D}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (3)$$

berechnet werden. Bei ideal-linearem Verhalten entspricht  $\alpha_0 = 0,5$  und bei ideal-plastischem Verhalten  $\alpha_0 = 1,0$ . Wird bei Mauerwerk-Druckversuchen zusätzlich die Verformung quer zur Belastungsrichtung ermittelt, kann zudem der Querdehnungsmodul bzw. die Querdehnzahl  $\mu_D$  ermittelt werden.

In Tabelle 15 sind vorliegende Zahlenwerte für die Querdehnzahl, für den Dehnungswert bei Höchstspannung und für den Völligkeitsgrad bei einer Druckbeanspruchung senkrecht zur Lagerfuge angegeben. Die Werte gelten für Mauerwerk mit Normalmauermörtel.

### 5.3 Druckbeanspruchung parallel zur Lagerfuge

#### 5.3.1 Längsdruckfestigkeit

Die Längsdruckfestigkeit von Mauerwerk wird u. a. für die Bemessung der Druckzone biegebeanspruchter Bauteile benötigt.

Diese kann in Anlehnung an DIN EN 1052-1 [39] geprüft werden. Gegenüber der Druckbeanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen wurde die Druckbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen jedoch bislang wenig experimentell untersucht.

Nach DIN EN 1996-1-1/NA [27] erfolgt die rechnerische Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zu den Lagerfugen von Mauerwerk mit vermörtelten Stoßfugen mit derselben Gleichung und denselben Gleichungsparametern, die für die Bestimmung der

Druckfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen ermittelt wurden. Statt der Steindruckfestigkeit in Richtung Steinhöhe wird diejenige in Richtung Steinlänge angesetzt. Zudem wird der jeweilige *K*-Faktor mit 0,5 abgemindert.

Diese Vorgehensweise berücksichtigt nicht das reale Tragverhalten von Mauerwerk unter einer Druckbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen. Bei Mauerwerk mit vermörtelten Stoßfugen spielt neben der Längsdruckfestigkeit der Mauersteine auch die Druckfestigkeit des Mauermörtels in der Stoßfuge eine wesentliche Rolle. Bei Mauerwerk mit unvermörtelten Stoßfugen müssen die im Stoßfugenbereich wirkenden Druckkräfte durch die Lagerfugen übertragen werden. Die maximal erreichbare Längsdruckfestigkeit von Mauerwerk wird deshalb maßgeblich durch die Haft-scherfestigkeit zwischen Mauerstein und Mauermörtel begrenzt. Um zutreffende Mindestdruckfestigkeitswerte von Mauerwerk parallel zu den Lagerfugen zu definieren und eine vereinfachte und auf der sicheren Seite liegende Bemessung zu ermöglichen, werden in [19] Grenzfälle – in Abhängigkeit von der Versagens- und Stoßfugenausbildungsart des Mauerwerks – betrachtet und fallweise Berechnungsgleichungen definiert.

Eine Auswertung von Versuchsergebnissen erfolgte in [20], siehe auch [1]. Tabelle 16 enthält die zusammengefassten Ergebnisse. Neben der Mauerwerk-Längsdruckfestigkeit ist auch der Verhältniswert der Druckfestigkeit parallel und senkrecht zu den Lagerfugen angegeben. Da die Druckfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen nicht in allen Fällen bestimmt wurde, ist auch der Verhältniswert bezogen auf die nach [1] rechnerisch ermittelte Druckfestigkeit angegeben.

#### 5.3.2 Druck-E-Modul (parallel zu den Lagerfugen)

Der Druck-E-Modul wird wie in Abschnitt 5.2.2 beschrieben ermittelt. Aus den wenigen vorliegenden

**Tabelle 16.** Mauerwerk; Druckfestigkeit parallel zu den Lagerfugen, Längsdruckfestigkeit (aus [1])

Mauerstein		Mauermörtel					Mauerwerk			
Art, Sorte	Festigkeitsklasse	Rohdichteklasse	Lochanteil (%)	$\frac{\beta_{DL}}{\beta_D}$	Art	Gruppe	Stoßfugen	$\beta_{DL}$	$\frac{\beta_{DL}}{\beta_D}$	$\frac{\beta_{DL}}{\text{cal } \beta_D}$
								MW	Einzelwerte	
HLZ	12	1,4	KA	–	NM	M5	vm	2,6	–	0,27
	20	1,0	53	0,184			vm	1,56	1,50; 1,56; 1,61	–
			53				uv	1,13	1,00; 1,09; 1,31	–
KS	28	1,0	41	–		M10	vm	3,5	–	0,37
	12	1,8	KA	–	NM	M2,5	vm	6,3	–	0,71
							5,5	5,4; 5,5; 5,6	0,52	
20	1,8	0		0,959	DM	M10	uv	0,62	–	
KSL	12	1,4	37	0,356	NM	M5	uv	1,42	1,28; 1,41; 1,56	–
									3,01	2,66; 2,69; 3,67
						DM	M10	uv	2,21	–
PP	12	1,6	20	–	NM	M10	uv	1,86	1,74; 1,75; 2,08	–
									7,5	–
	12(20)	1,6	23	0,393	NM	M5	vm	3,58	3,48; 3,55; 3,37	–
Vbl	2	0,5	–	0,647	DM	M10	vm	4,27	3,73; 4,81	–
									2,34	2,14; 2,43; 2,47
	4	0,8	–	–	–	DM	M10	vm	4,0	–
V (NB)	6	0,7	–	0,580	DM	M10	vm	3,57	3,52; 3,59; 3,60	–
									1,73	1,67; 1,73; 1,79
	8	1,6	–	–	–	NM	M2,5	vm	7,0	–
Hbl, 3 K	4	0,9	26	0,620	NM	M5	vm	1,79	1,61; 1,81; 1,96	–
Hbl, 2 K	4	0,9	32	0,772	NM	M5	uv	3,36	3,19; 3,43; 3,46	–

vm vermörtelt  
 uv unvermörtelt  
 NB Naturbims  
 MW Mittelwerte  
 KA keine Angabe

$\beta_{DL}$  Druckfestigkeit parallel zur Lagerfuge in N/mm<sup>2</sup>  
 $\beta_D$  Druckfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge in N/mm<sup>2</sup>  
 cal  $\beta_D$  rechnerische Druckfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge in N/mm<sup>2</sup>, siehe [1]

**Tabelle 17.** Mauerwerk; Regressionsgleichungen zur Bestimmung der Elastizitätsmoduln unter Druck- sowie Zugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen in Abhängigkeit von der Mauerwerkdruck- bzw. Mauerwerkzugfestigkeit nach [21] (aus [1])

Mauersteine		Mauermörtel	Druck-E-Modul (parallel)		Zug-E-Modul (parallel)
			$E_{D,p}$	Wertebereich Einzelwerte	$E_{Z,p}$
Kalksandsteine	KS	NM	$300 \cdot \beta_{D,p}$	$\pm 50 \%$	$24500 \cdot \beta_{Z,p}$ (0,77)
	KS L		$700 \cdot \beta_{D,p}$		
Leichtbetonsteine	LB	NM	–	–	$14800 \cdot \beta_{Z,p}$ (0,99)
Porenbetonsteine	PP	DM	$600 \cdot \beta_{D,p}$	$\pm 30 \%$	$13000 \cdot \beta_{Z,p}$ (sehr unsicher)
Mauerziegel	Mz, HLz	NM	–	–	$15300 \cdot \beta_{Z,p}$ (0,99)

$\beta_{D,p}$  Mauerwerkdruckfestigkeit parallel zur Lagerfuge in N/mm<sup>2</sup>

$\beta_{Z,p}$  Mauerwerkzugfestigkeit parallel zur Lagerfuge in N/mm<sup>2</sup>

$E_{D,p}$  Druck-E-Modul parallel zur Lagerfuge in N/mm<sup>2</sup>

$E_{Z,p}$  Zug-E-Modul parallel zur Lagerfuge in N/mm<sup>2</sup>

Werte in Klammern: Bestimmtheitsmaß der Regression

Versuchsergebnissen wurden die in Tabelle 17 angegebenen Zusammenhänge zwischen Druckfestigkeit parallel zu den Lagerfugen und dem E-Modul als Anhaltswerte hergeleitet. Der Zusammenhang entspricht etwa dem bei Druckbeanspruchung senkrecht zur Lagerfuge. Die Werte beziehen sich auf Mauerwerk mit vermörtelten Stoßfugen. Für Mauerwerk mit unvermörtelten Stoßfugen ergeben sich nach [1] etwa halb so hohe Druck-E-Modul-Werte wie bei Mauerwerk mit vermörtelten Stoßfugen.

## 5.4 Zug- und Biegezugbeanspruchung

### 5.4.1 Zugfestigkeit

Die zentrische einachsige Zugfestigkeit ist eine wesentliche Kenngröße bei Nachweisen der Gebrauchstauglichkeit, z. B. um die Rissicherheit infolge Formänderungen (Schwinden, Quelle, Temperaturänderungen) abschätzen zu können. Dabei sind zwei Belastungsrichtungen (parallel und senkrecht zu den Lagerfugen) sowie zwei Versagensarten (Stein- und Fugenversagen) zu unterscheiden.

Die Mauerwerkzugfestigkeit kann sowohl experimentell als auch rechnerisch ermittelt werden. Die Prüfung der Zugfestigkeit von Mauerwerk ist nicht normativ geregelt. In Tabelle 18 sind Werte für die Zugfestigkeit parallel zur Lagerfuge aus [21] bzw. [1] angegeben.

Bei der Herleitung von Berechnungsansätzen zur Bestimmung der Zugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen in [22] wurde davon ausgegangen, dass in den vertikalen Stoßfugen, auch wenn sie vermörtelt sind, keine Zugspannungen übertragen werden können. Der Grund hierfür ist, dass die Stoßfugen nicht überdrückt sind und die Haftzugfestigkeit zwischen Mauerstein und Mauermörtel in der Regel aufgrund des Mörtelschwindens und einer oftmals mangelhaften Ausführung vernachlässigbar klein ist.

Für den Fall Steinversagen bedeutet dies, dass die im Bereich einer Steinlage und Mörtelfuge auftretenden Zugspannungen parallel zu den Lagerfugen nur durch einen halben Mauerstein und die Mörtelfuge übertragen werden können. Da die Dicke der Mörtelfuge i. d. R. deutlich geringer ist als die Mauersteinhöhe, ist die Mauerwerkzugfestigkeit in diesem Fall näherungsweise halb so groß wie die Steinzugfestigkeit, vgl. Gl. (4). Wesentliche Einflussgröße auf die Mauerwerkzugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen bei Steinversagen ist daher die Steinzugfestigkeit in Richtung Steinlänge.

$$f_t \approx f_{t,u}/2 \quad (4)$$

mit

$f_t$  Mauerwerkzugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen bei Steinversagen

$f_{t,u}$  Zugfestigkeit des Steins in Längsrichtung

Bei Fugenversagen müssen die im Bereich einer Steinlage und Mörtelfuge auftretenden Zugspannungen parallel zu den Lagerfugen über Schubspannungen in der Lagerfuge auf der Überbindelänge ( $l_{oi}$ ) in die jeweilige nächste Steinlage übertragen werden. Die übertragbare Zugkraft in den Stoßfugen kann vernachlässigt werden, da die Haftzugfestigkeit zwischen Mauerstein und Mauermörtel i. d. R. gering ist (s. o.). Die Mauerwerkzugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen ist in diesem Fall erreicht, wenn die in der Lagerfuge auftretenden Schubspannungen die Scherfestigkeit überschreiten. Die wesentlichen Einflussgrößen auf die Mauerwerkzugfestigkeit bei diesem Belastungs- und Versagensfall sind daher die auf die Mauersteinhöhe bezogene Überbindelänge und die Scherfestigkeit, die sich aus der Haftscherfestigkeit und ggf. dem auflastabhängigen Reibungsanteil zwischen Mauerstein und Mauermörtel zusammensetzt, siehe Gln. (5a) bzw. (5b).

$$f_t \approx f_{v0} \cdot l_{oi}/h_u \quad (\text{ohne Auflast}) \quad (5a)$$

**Tabelle 18.** Mauerwerk; Zugfestigkeit bei einer Zugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen (aus [21] bzw. [1])

Mauerstein			Mauermörtel		SF	Zugfestigkeit $f_t$	
Art, Sorte	Format	Festigkeitsklasse	Art	Gruppe		N/mm <sup>2</sup>	$n$
Mz	NF	28	NM	Ila	vm	0,45	1
KMz	NF	60	NM	IIIa	vm	0,51	4
HLz	2DF	12	NM	II ... III	vm	0,12 ... 0,21	8
HLz	2DF	60	NM	III	vm	0,82	3
KS	2DF, 5DF	12, 20	NM	Ila	uv	0,24; 0,14	2
KS	2DF	12 ... 36	NM	II ... III	vm	0,10 ... 0,41	22
KS L	2DF	12	NM	II, III	vm	0,07 ... 0,09	6
KS	2DF	20	DM		vm	0,65	2
PB	2DF	2	NM	II	vm	0,09	3
PB	2DF	6	NM	III	vm	0,11	2
PP	2DF, 16DF	2	DM		uv	0,04 ... 0,14	4
PP	2DF	2	DM		vm	0,16	1
Vbl	10DF	2	LM21	Ila	uv	0,03	1
V, Vbl	2DF, 8DF	2	NM	II, Ila	vm	0,16 ... 0,26	6
V	2DF	12	NM	III	vm	0,58	3
V	2DF	2	DM		uv	0,21	1
V	2DF	2	DM		vm	0,25	1
Hbl	10DF	2	LM36	Ila	vm	0,17	1
Hbl	10DF	2	NM	Ila	vm	0,13	1

SF Stoßfugen  
 vm vermörtelt  
 uv unvermörtelt  
 $n$  Anzahl der Einzelwerte

bzw.

$$f_t \approx (f_{v0} + \mu \cdot \sigma_d) \cdot l_{ol}/h_u \quad (\text{mit Auflast}) \quad (5b)$$

mit

$f_t$  Mauerwerkzugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen bei Fugenversagen  
 $f_{v0}$  Haftscherfestigkeit  
 $l_{ol}$  Überbindelänge  
 $h_u$  Steinhöhe  
 $\mu$  Reibungsbeiwert  
 $\sigma_d$  Druckspannung senkrecht zur Lagerfuge

Untersuchungen zur Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen wurden bislang nur sehr wenige durchgeführt, sodass keine abgesicherten Werte genannt werden können. Die Mauerwerkzugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen kann näherungsweise für den Fall Steinversagen gleich der Steinzugfestigkeit in Richtung Steinhöhe oder für den Fall Fugenversagen gleich der Haftzugfestigkeit zwischen

Mauerstein und Lagerfugenmörtel angesetzt werden. Dabei ist die Steinzugfestigkeit in Richtung Steinhöhe eher selten geringer als die Haftzugfestigkeit zwischen Stein und Mörtel.

#### 5.4.2 Zug-E-Modul (Zugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen)

Der Zug-E-Modul wird analog zum Druck-E-Modul als Sekantenmodul bei 1/3 der Höchstspannung und der bei dieser Spannung auftretenden Dehnung definiert. Er wird vor allem für die Beurteilung der Riss-sicherheit benötigt. Nach Versuchsergebnissen kann der Zug-E-Modul für Mauerwerk aus Normalmauermörtel mit vermörtelten Stoßfugen näherungsweise aus den in Tabelle 17 angegebenen Regressionsgleichungen aus der Mauerwerkzugfestigkeit ermittelt werden [21], vgl. [2]. Der Druck- und Zugelastizitätsmodul weichen etwas voneinander ab, da die  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Linien bei Druck- und Zugbeanspruchung unterschiedlich nichtlinear sind.

### 5.4.3 Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit von Mauerwerk ist von großer Bedeutung bei Ausfachungsflächen und Verblendschalen von zweischaligem Mauerwerk bei Einwirkung von Windlasten (Sog und Druck), aber auch bei mit Erd-druck belasteten Kellerwänden. Bei dem anisotropen Baustoff Mauerwerk wird unterschieden zwischen den Beanspruchungen senkrecht zur Lagerfuge und parallel zur Lagerfuge. In einigen Fällen, z. B. bei Ausfachungsflächen oder bei Verblendschalen, treten meist zweiaxiale Beanspruchungen auf, d. h. eine Kombination der Beanspruchungen senkrecht und parallel.

Die Überschreitung der Biegezugfestigkeit einer Mauerwerkwand führt bei einer Biegebeanspruchung parallel zu den Lagerfugen zur Bildung einer Bruchebene senkrecht zu den Lagerfugen, während aus einer Biegebeanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen eine Bruchebene parallel zu den Lagerfugen resultiert. In beiden Fällen können, wie bei der Zugfestigkeit, die Versagensfälle Stein und Fuge unterschieden werden. Die Bestimmung der Biegezugfestigkeit von Mauerwerk kann getrennt nach der Beanspruchungsrichtung sowohl rechnerisch als auch experimentell erfolgen.

Experimentell wird die Biegezugfestigkeit im Vierpunkt-Biegeversuch nach DIN EN 1052-2 [40] ermittelt. In Bild 7 sind Ergebnisse zu Untersuchungen der Biegezugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge dargestellt, die in [23] ausgewertet wurden. Neuere Erkenntnisse sind in [3] enthalten (siehe auch [16]). Die Bandbreite der Werte in Bild 7 ist je nach Materialkombination verhältnismäßig groß. Die Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen  $f_{xk1}$  (mit einer Bruchebene parallel zu den Lagerfugen) darf in tragenden Wänden nach [27] nicht in Rechnung gestellt werden. Lediglich bei Wänden aus Planelementen und Dünnbettmörtel, die kurzzeitig rechtwinklig zur Wandebene beansprucht werden, darf normgemäß ein Wert  $f_{xk1} = 0,2 \text{ N/mm}^2$  zugrunde gelegt werden. In Abhängigkeit von der gewählten Materialkombination wäre

sowohl für Dünnbett- als auch Normalmörtel der Ansatz höherer Werte, als nach [27] zulässig, gerechtfertigt (siehe [2] und [6]).

Die charakteristische Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen  $f_{xk2}$  (mit einer Bruchebene senkrecht zu den Lagerfugen) wird nach [27] als Kleinstwert aus den Kriterien Fugen- und Steinversagen bestimmt. Die dort angegebenen Berechnungsgleichungen basieren auf den Berechnungsansätzen zur Bestimmung der Zugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen gemäß Abschnitt 5.4.1. Eine genauere Analyse geometrischer Einflussgrößen hat gezeigt, dass neben den mechanischen Eigenschaften und dem Überbindemaß auch die Wanddicke einen maßgeblichen Einfluss auf die Biegezugfestigkeit des Mauerwerks parallel zu den Lagerfugen ausübt (s. [3] und [16]). Durch den Ansatz baustoffspezifischer Werte für die Zugfestigkeit – besser die Biegezugfestigkeit – in Richtung Steinlänge und die Anfangsscherfestigkeit der gewählten Mauerstein-Mauermörtel-Kombination besteht die Möglichkeit, über die nach [27] anzusetzenden Werte hinaus höhere Biegezugfestigkeiten zu erzielen (vgl. Abschnitte 2.1.3 und 4.2).

### 5.5 Schubbeanspruchung

Durch horizontale Lasten wie Erddruck, Wind oder auch Erdbeben können Mauerwerkswände sowohl in Wandebene auf Scheibenschub als auch senkrecht zur Wandebene auf Plattenschub beansprucht werden. Die Scheibenschubbeanspruchung ist insbesondere bei aussteifenden Wänden von Bedeutung.

Für die Bestimmung der Schubfestigkeit von Mauerwerk existiert kein genormtes Prüfverfahren. Neben der experimentellen Bestimmung besteht die Möglichkeit, die Schubfestigkeit von Mauerwerk rechnerisch zu ermitteln. Der Nachweis des Tragwiderstands bei Querkraftbeanspruchung erfolgt in DIN EN 1996-1-1/NA [27] mit dem Grenzwert  $f_{vt}$  der charakteristischen

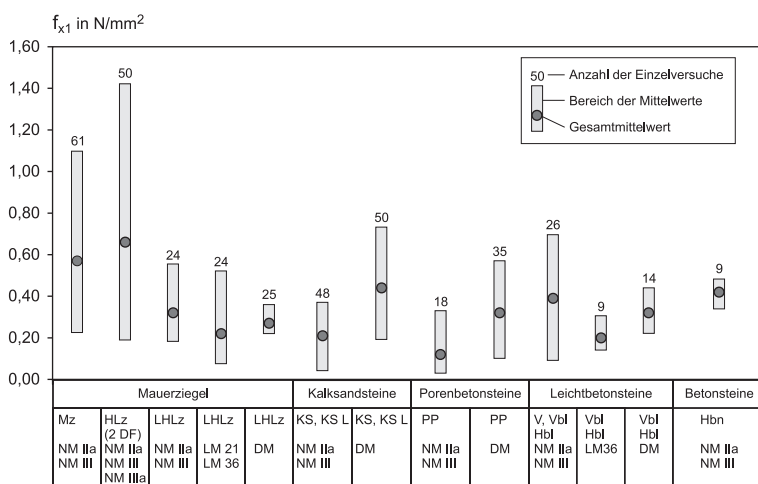


Bild 7. Bandbreite der Biegezugfestigkeitswerte senkrecht zur Lagerfuge (aus [23])

Schubfestigkeit. Grundsätzlich besteht in konkreten Anwendungsfällen – z. B. bei einer Zustimmung im Einzelfall – die Möglichkeit, bei der Berechnung der Schubfestigkeit baustoffspezifische Werte für die Steinlängzugfestigkeit (Scheibenschub) und die Anfangsscherfestigkeit (Scheiben- und Plattenschub) der gewählten Mauerstein-Mauermörtel-Kombination anzusetzen (vgl. Abschnitte 2.1.3 und 4.2).

## 5.6 Feuchtedehnung, Kriechen, Wärmedehnung

Die Verformungskennwerte werden vorwiegend für die Beurteilung der Rissicherheit, z. T. aber auch für Bemessungsfälle benötigt. Zur Ermittlung der Kennwerte existiert derzeit keine Prüfnorm bzw. Richtlinie. In [27] sind für die Mauerstein- und Mauermörtelarten Kennwerte für Feuchtedehnung, Kriechen und Wärmedehnung als Rechenwerte mit jeweiligen Wertebereichen angegeben. Zusammenhänge und Hinweise auf Prüfverfahren sind in [24] und [25] dargestellt.

## Literatur

### Monografien, Zeitschriftenartikel

- [1] Schubert, P. (2010). Eigenschaftswerte von Mauerwerk, Mauersteinen, Mauermörtel und Putzen. In: *Mauerwerk-Kalender 2010* (Hrsg. W. Jäger), 3–25. Berlin: Ernst & Sohn.
- [2] Brameshuber, W. (2019). Eigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen. In: *Mauerwerk-Kalender 2019* (Hrsg. W. Jäger), 3–29. Berlin: Ernst & Sohn.
- [3] Schmidt, U. (2015). Bruchmechanischer Beitrag zur Biegezugfestigkeit von Mauerwerk, Dissertation. *Aachener Beiträge zur Bauforschung des IBAC, Bd. 19* (Hrsg. Institut für Bauforschung der RWTH Aachen–IBAC, W. Brameshuber) Aachen: Mainz.
- [4] Graubohm, M. (2019). Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Drucktragverhalten von Mauerwerk. In: *Mauerwerk-Kalender 2019* (Hrsg. D. Schermer und E. Brehm), 265–292. Berlin: Ernst & Sohn.
- [5] Schubert, P. und Laurini, G. (1996). *Einfluß der Zusammensetzung von Mauermörtel auf die Eigenschaften im Mauerwerk–Wasserhaushalt in der Mörtelfuge, Haft-scherfestigkeit*. Aachen: Institut für Bauforschung, Forschungsbericht Nr. F 444.
- [6] Raupach, M., Sängler, D. und Winkels, B. (2024). Eigenschaften und Eigenschaftswerte von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk. In: *Mauerwerk-Kalender 2024* (Hrsg. W. Jäger), 1–16. Berlin: Ernst & Sohn.
- [7] Riechers, H.-J. (2000). Ein neues Modell zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung von Mauermörtel in der Fuge, Dissertation. *Aachener Beiträge zur Bauforschung des IBAC, Bd. 10* (Hrsg. Institut für Bauforschung der RWTH Aachen–IBAC, W. Brameshuber) Aachen: Mainz.
- [8] Schubert, P. und Heer, B. (2000). *Einfluß der Zusammensetzung von Mauermörtel auf seine Eigenschaften im Mauerwerk*. Aachen: Institut für Bauforschung, Forschungsbericht Nr. F 684.
- [9] Schubert, P. (1985). Einfluss von Leichtmörtel auf die Tragfähigkeit und Verformungseigenschaften von Mauerwerk. *Ziegelindustrie International* 38 (6): 327–335.
- [10] Kirtschig, K. und Metje, W.-R. (1984). Auswertung von Versuchsergebnissen zur Überprüfung der Vorstellungen über den Bruchmechanismus von Mauerwerk und zur Festlegung von zulässigen Spannungen bei Verwendung von Leichtmauermörtel. In: *Mitteilungen aus dem Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover, Nr. 53*. Hannover: Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung (Eigenverlag).
- [11] Schubert, P. (1982). Zur Feuchtedehnung von Mauerwerk. Dissertation. RWTH Aachen.
- [12] Brameshuber, W., Graubohm, M. und Schmidt, U. (2006). Festigkeitseigenschaften von Mauerwerk, Teil 4: Scherfestigkeit. In: *Mauerwerk-Kalender 2006* (Hrsg. W. Jäger), 193–225. Berlin: Ernst & Sohn.
- [13] Schubert, P. (1987). Zur Haft-scherfestigkeit zwischen Mörtel und Mauerstein. In: *Mauerwerk-Kalender 1987* (Hrsg. P. Funk), 497–506. Berlin: Ernst & Sohn.
- [14] Brameshuber, W., Schmidt, U. und Graubohm, M. (2005). Auswertung Haft-scherfestigkeit. Aachen: RWTH Aachen University, Institut für Bauforschung, Forschungsbericht Nr. F 7018.
- [15] Brameshuber, W. und Saenger, D. (2013). Erläuterungen zur Haft-scherfestigkeit. *Mauerwerk* 17 (1): 2–7.
- [16] Schmidt, U. und Brameshuber, W. (2013). Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Biegezugfestigkeit von Mauerwerk. In: *Mauerwerk-Kalender 2013* (Hrsg. W. Jäger), 655–687. Berlin: Ernst & Sohn.
- [17] Brameshuber, W. und Graubohm, M. (2010). Festigkeitseigenschaften von Mauerwerk, Teil 5: Druckfestigkeit–Regelungen nach DIN 1053. In: *Mauerwerk-Kalender 2010* (Hrsg. W. Jäger), 27–44. Berlin: Ernst & Sohn.
- [18] Graubohm, M. und Glitza, H. (2018). Charakteristische Druckfestigkeitswerte für Leichtbeton-Mauerwerk. In: *Mauerwerk-Kalender 2018* (Hrsg. W. Jäger), 55–73. Berlin: Ernst & Sohn.
- [19] Saenger, D. und Brameshuber, W. (2016). Längsdruckfestigkeit von Mauerwerk–Vereinfachter Berechnungsansatz. *Mauerwerk* 20 (5): 340–351.
- [20] Schubert, P. und Graubohm, M. (2004). Druckfestigkeit von Mauerwerk parallel zu den Lagerfugen. *Mauerwerk* 8 (5): 198–208.
- [21] Schubert, P. (2009). Festigkeit und Verformungseigenschaften von Mauerwerk unter Zugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen. *Mauerwerk* 13 (6): 364–370.

- [22] Mann, W. (1979). Grundlagen der Bemessung von Ingenieurmauerwerk. In: *Mauerwerk-Kalender 1979* (Hrsg. P. Funk), 35–67. Berlin: Ernst & Sohn.
- [23] Schmidt, U. und Schubert, P. (2004). Festigkeitseigenschaften von Mauerwerk; Teil 2: Biegezugfestigkeit. In: *Mauerwerk-Kalender 2004* (Hrsg. H.-J. Irmschler, W. Jäger und P. Schubert), 31–63. Berlin: Ernst & Sohn.
- [24] Schubert, P. (1992). Formänderungen von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk. In: *Mauerwerk-Kalender 1992* (Hrsg. P. Funk), 623–637. Berlin: Ernst & Sohn.
- [25] Schubert, P. (2002). Schadenfreies Konstruieren mit Mauerwerk; Teil 1: Formänderungen von Mauerwerk–Nachweisverfahren, Untersuchungsergebnisse, Rechenwerte. In: *Mauerwerk-Kalender 2002* (Hrsg. H.-J. Irmschler und P. Schubert), 313–331. Berlin: Ernst & Sohn.
- Normen**
- [26] DIN EN 772-1:2016-05 (2016). *Prüfverfahren für Mauersteine–Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit*. Berlin: DIN Media.
- [27] DIN EN 1996-1-1/NA:2019-12 (2019) *Nationaler Anhang–National festgelegte Parameter–Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten–Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk*. Berlin: DIN Media.
- [28] DIN EN ISO 15148:2018-12 (2018). *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten–Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen*. Berlin: DIN Media.
- [29] DIN EN 1015-11:2020-01 (2020). *Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk–Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel*. Berlin: DIN Media.
- [30] DIN EN 998-2:2017-02 (2017). *Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau–Teil 1: Mauermörtel*. Berlin: DIN Media.
- [31] DIN 20000-412:2019-06 (2019). *Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken–Teil 412: Regeln für die Verwendung von Mauermörtel nach DIN EN 998-2:2017-02*. Berlin: DIN Media.
- [32] DIN 18555-9:2019-04 (2019). *Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln–Teil 9: Bestimmung der Fugendruckfestigkeit von Festmörteln*. Berlin: DIN Media.
- [33] DIN 18555-4:2019-04 (2019). *Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln–Teil 4: Bestimmung der Längs- und Querdehnung sowie von Verformungskenngrößen von Mauermörteln (Festmörtel) im statischen Druckversuch*. Berlin: DIN Media.
- [34] DIN 52450:1985-08 (1985). *Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern; Prüfung anorganischer nichtmetallischer Baustoffe*. Berlin: DIN Media, (zurückgezogen).
- [35] DIN EN 1052-3:2007-06 (2007). *Prüfverfahren für Mauerwerk–Teil 3: Bestimmung der Anfangsscherfestigkeit (Haftscherfestigkeit)*. Berlin: DIN Media.
- [36] DIN 18555-5:1986-03 (1986). *Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln–Festmörtel–Bestimmung der Haftscherfestigkeit von Mauermörteln*. Berlin: DIN Media.
- [37] DIN 1053-13:2009-03 (2009). *Mauerwerk–Teil 13: Genaueres Nachweisverfahren für unbewehrtes Mauerwerk*. Berlin: NABau im DIN, (Entwurf).
- [38] DIN EN 1052-5:2005-06 (2005). *Prüfverfahren für Mauerwerk–Teil 5: Bestimmung der Biegehaftzugfestigkeit*. Berlin: DIN Media.
- [39] DIN EN 1052-1:1998-12 (1998). *Prüfverfahren für Mauerwerk–Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit*. Berlin: DIN Media.
- [40] DIN EN 1052-2:2018-12 (2018). *Prüfverfahren für Mauerwerk–Teil 2: Bestimmung der Biegezugfestigkeit*. Berlin: DIN Media.

Jürgen H. R. Küenzlen, Eckehard Scheller, Marc Klatecki

# Befestigung und Abdichtung von Fenstern und Türen

Regelwerke, Bauphysik, Baurecht, Praxisbeispiele

- von der Auswahl des richtigen Befestigers über die Tragfähigkeitsberechnung bis zur Montage – alle Schritte werden mit anschaulichen Praxisbeispielen sowie Hintergrundwissen zur Dübeltechnik und zu Versuchen erklärt
- Berücksichtigung aller Verankerungsgründe und Fensterarten – inklusive der neuen Themen Lehmmauerwerk, Holzbau, Metallbau und hochwasserdichte Fenster
- mit über 100 Detailzeichnungen und Berücksichtigungen aktueller Regelwerke hilft das Buch, Fehler in Planung und Ausführung zu vermeiden

Fenster sind ein wichtiger Bestandteil der Gebäudehülle. Sie müssen hohe Anforderungen an Montage, Tragfähigkeit, Bauphysik, Einbruchhemmung erfüllen. Das Buch enthält dazu umfassendes Hintergrundwissen, detaillierte Erläuterungen und Praxisbeispiele für alle Verankerungsgründe.

**Einzigartiges Kompendium für sichere und dauerhafte Montage von Fenstern und Türen in zweiter, erweiterter Auflage**



**JETZT BESTELLEN**  
[www.ernst-und-sohn.de/3486](http://www.ernst-und-sohn.de/3486)

\* Der €-Preis gilt ausschließlich für Deutschland, inkl. MwSt.



vorl. Abb.

2., erweiterte Auflage, 2 / 2026 ·  
ca. 1100 Seiten · ca. 600 Abbildungen ·  
ca. 130 Tabellen

**Hardcover**

**978-3-433-03486-6**

ca. € 99\*

**Bereits vorbestellbar.**

Ulf Nürnberger

# Korrosion und Korrosionsschutz der Verbindungsmitel und Anbauteile in der Befestigungstechnik

- **erstes und einziges Referenzwerk für alle Bauarten im konstruktiven Ingenieurbau**
- **mit Schadensbeispielen, Regelwerken und konkreten Handlungsempfehlungen**
- **Material- und Baustoffkunde kompakt und verständlich aufbereitet**

Dieses Buch liefert das entscheidende Know-how, um Korrosionsschäden zu vermeiden – von der Planung über die Ausführung bis zur Instandsetzung. Es deckt nicht nur die Korrosionsmechanismen und Schutzmaßnahmen für eine Vielzahl von Verbindungsmiteln und Materialien ab, sondern liefert auch konkrete Schadensbeispiele, Vergleichsstudien und aktuelle Regelwerke.

**Unverzichtbares Nachschlagewerk und einziges Referenzwerk für die Planung, Ausführung und Instandhaltung langlebiger Bauwerke**



**JETZT BESTELLEN**  
[www.ernst-und-sohn.de/3479](http://www.ernst-und-sohn.de/3479)



2025 · 544 Seiten ·  
190 Abbildungen · 38 Tabellen

**Hardcover**  
**978-3-433-03479-8**

€ 99\*