



MauerWerk™
Das Lehrportal

MauerWerk – Das Lehrportal

Festigkeits- und Verformungseigenschaften

Script II

2 Festigkeits- und Verformungseigenschaften

2.1 Grundlagen der Spannungsverteilung im Mauerwerk

Der Werkstoff Mauerwerk eignet sich in hervorragender Weise zur Abtragung von Vertikalkräften, da diese in der Wand überwiegend Druckspannungen hervorrufen. Sie werden im Allgemeinen zunächst zentrisch eingeleitet und erzeugen so eine konstante Spannungsverteilung im Querschnitt (s. Bild 2-1 (a)). Infolge einer exzentrischen Lasteinleitung am Wandkopf bzw. Wandfuß, aber auch infolge von Imperfektionen bei der Herstellung, tritt im Querschnitt zusätzlich eine Momentenbeanspruchung auf, die einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Spannungsverteilung hat. Je nach Größe der Lastexzentrizität ergeben sich unterschiedliche Spannungsverläufe.

Ist bei Annahme linear-elastischen Materialverhaltens die Ausmitte kleiner als ein Sechstel der Wanddicke, resultiert eine annähernd lineare Spannungsverteilung mit überdrücktem Querschnitt (s. Bild 2-1 (b)). Bei größerer Ausmitte ($e/t > 1/6$) bildet sich eine klaffende Fuge, da im Mauerwerksbau keine nennenswerten Zugspannungen senkrecht zur Lagerfuge aufgenommen werden können. Die Spannungsverteilung ist im überdrückten Bereich dann dreiecksförmig, wie in Bild 2-1 (c) dargestellt. Bei realistischer Berücksichtigung des nichtlinearen Werkstoffverhaltens von Mauerwerk nehmen die Druckspannungen bei größeren Ausmitten jedoch überproportional zu, woraus sich eine völligere Druckspannungsverteilung ergibt (s. Bild 2-1 (d)).

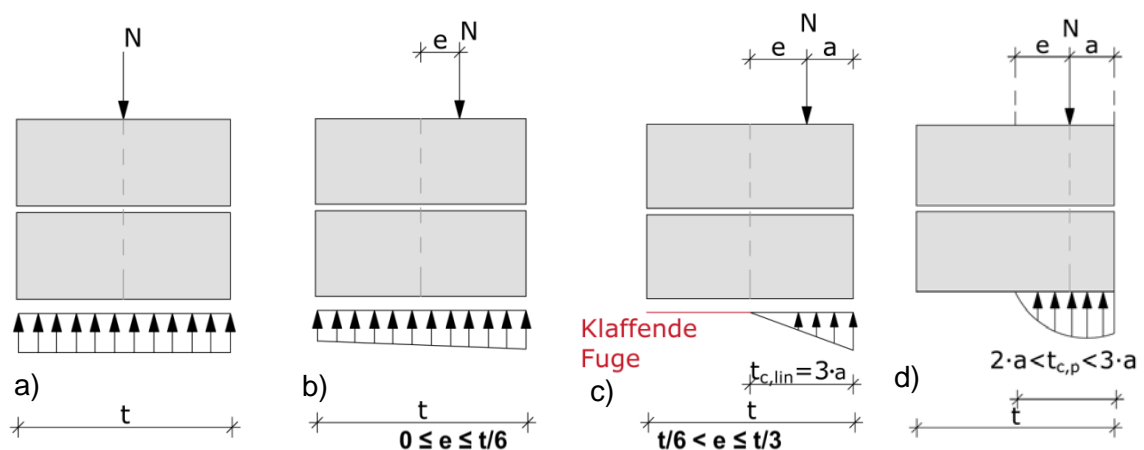


Bild 2-1: mögliche Spannungsverläufe infolge zentrischer und exzentrischer Normalkraftbeanspruchung

Für den Fall einer linearen Spannungsverteilung kann die aufnehmbare Normalkraft in Abhängigkeit der vorhandenen Lastexzentrizität nach den Gleichungen (2.1) und (2.2) berechnet werden.

$$N = l \cdot t \cdot f_M \left/ \left(1 + 6 \cdot \frac{e}{t} \right) \right. \quad \text{für } 0 \leq \frac{e}{t} \leq \frac{1}{6} \quad (2.1)$$

$$N = \frac{3}{4} \cdot l \cdot t \cdot f_M \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{e}{t} \right) \quad \text{für } \frac{1}{6} \leq \frac{e}{t} \leq \frac{1}{3} \quad (2.2)$$

Nach DIN EN 1996-1-1/NA darf für Mauerwerk aus künstlichen Steinen für alle Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit vereinfachend von starr-plastischem Werkstoffverhalten und gerissenem Querschnitt ausgegangen werden. Damit vereinfacht sich die Spannungsverteilung zu einem konstanten Spannungsblock, der nur über eine begrenzte Breite des Querschnitts wirkt (s. Bild 2-2). Die aufnehmbare Normalkraft berechnet sich hierfür in Abhängigkeit der Exzentrizität wie folgt:

$$N = l \cdot t \cdot f_M \cdot \left(1 - 2 \frac{e}{t}\right) \quad \text{für } \frac{e}{t} \leq 0,5 \quad (2.3)$$

mit

e/t	Verhältnis Lastexzentrizität zu Wanddicke ($e/t = M/(N \cdot t)$)
M	Biegemoment
N	Normalkraft
l	Wandlänge
f_M	Mauerwerksdruckfestigkeit

} am betrachteten Wandquerschnitt

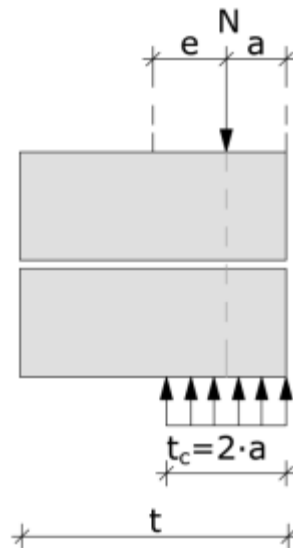


Bild 2-2: Ansatz eines Spannungsblocks nach [8]

2.2 Festigkeit von Mauerwerk

2.2.1 Allgemeines

Mauerwerk ist ein Verbundbaustoff bestehend aus Mauersteinen und Mörtel mit entsprechenden mechanischen Stoffeigenschaften. Die Eigenschaften eines Mauerwerksbauteils (z.B. Wand) ergeben sich aus den Stoffeigenschaften, der Geometrie des Bauteils und dem Zusammenwirken mit anderen Bauteilen. Des Weiteren werden zur Beurteilung der Mauerwerkstragfähigkeit die Verformungseigenschaften (z.B. Spannungs-Dehnungs-Linie, Elastizitätsmodul) benötigt.

Für die Bemessung von Mauerwerk ist die Kenntnis folgender mechanischer Stoffeigenschaften erforderlich, die nach genormten Prüfverfahren bestimmt werden:

- Steindruck- und -zugfestigkeit
- Mörteldruckfestigkeit
- Druckfestigkeit des Mauerwerks

- Haftscherfestigkeit des Mauerwerks
- Biegefestigkeit parallel und senkrecht zur Lagerfuge des Mauerwerks
- Verformungseigenschaften des Mauerwerks

Obwohl Mauerwerk auch eine gewisse Zugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge besitzt, wird diese in der Regel bei der Bemessung nicht in Rechnung gestellt.

Das allgemeine Tragverhalten des Mauerwerks unter Druckbeanspruchung ist in Bild 2-3 dargestellt. Hierbei ist entscheidend, dass im Allgemeinen die größere Querverformung des Mörtels zu Querspannungen im Stein führt. Das Druckversagen von Mauerwerk wird daher neben der Druckfestigkeit des Mörtels auch von der Steinzugfestigkeit beeinflusst, welche mit steigender Steindruckfestigkeit ebenfalls zunimmt.

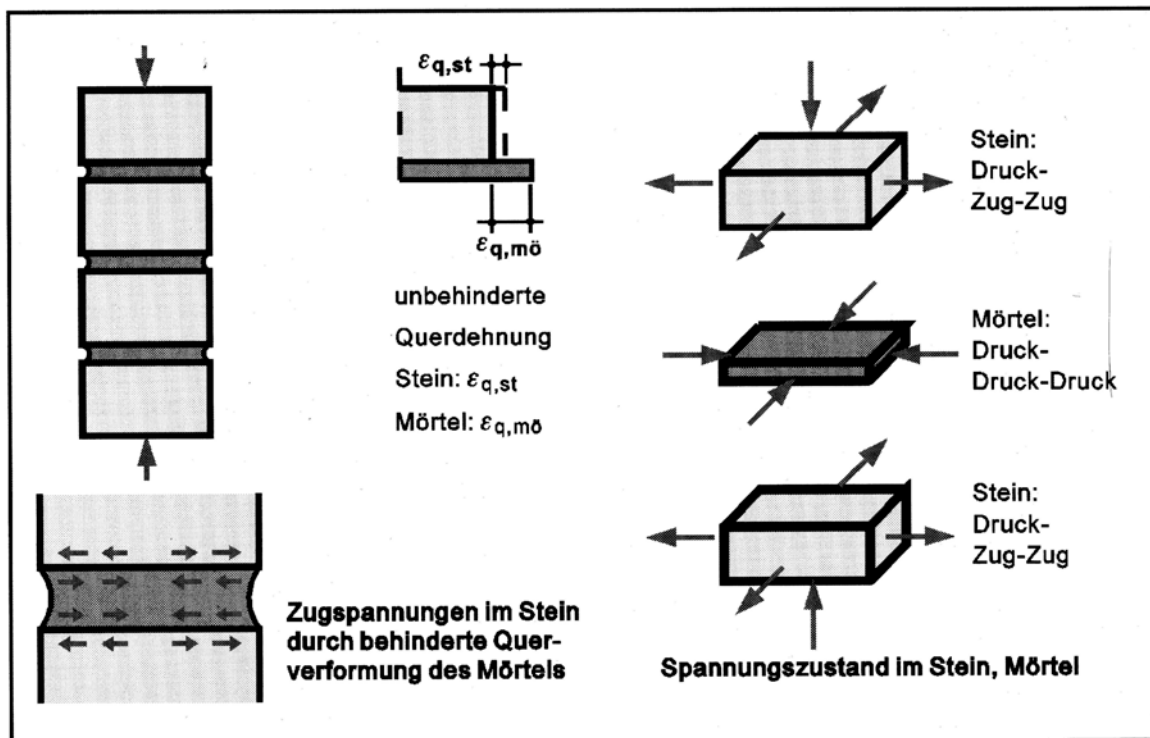


Bild 2-3: Mauerwerk unter Druckbeanspruchung [20]

2.2.2 Druckfestigkeit von Mauerwerk

Die charakteristische Druckfestigkeit von Mauerwerk aus künstlichen Steinen kann im allgemeinen Berechnungsverfahren nach DIN EN 1996-1-1/NA mit Hilfe der Gleichungen (2.4) und (2.5) in Abhängigkeit des Mindestwertes der mittleren Steindruckfestigkeit f_{st} und der Druckfestigkeit des Mörtels f_m ermittelt werden. Dieser Wert kann in Abhängigkeit der bisher üblichen Druckfestigkeitsklasse entnommen werden. Unter Verwendung der in DIN EN 1996-1-1/NA angegebenen Parameter K , α und β ist dort eine Annäherung der rechnerischen Druckfestigkeit an die in den letzten Jahren im Rahmen von Materialprüfungen und Zulassungsverfahren gewonnenen Erkenntnisse möglich.

Gleichzeitig gestattet DIN EN 1996-1-1/NA nunmehr eine Differenzierung der Mauerwerksdruckfestigkeit nach verschiedenen Steinsorten, Lochbildern sowie Steinabmessungen (normalformatige Steine, Plansteine oder Planelemente). Die Werte für K ,

α und β wurden für sämtliche gebräuchlichen Mauerwerksarten durch umfangreiche Auswertung der nationalen Datenbank bestimmt und sind in DIN EN 1996-1-1/NA enthalten.

Exemplarisch werden in Tabelle 2-1 die Werte für eine bestimmte Stein-Mörtel-Kombination ausgegeben. Zu beachten ist, dass es sich bei der charakteristischen Druckfestigkeit um einen Rechenwert als 5%-Quantilwert bezogen auf eine rechnerische Mauerwerksschlankheit von $\lambda = h_{ef} / t = 0$ handelt.

Für Mauerwerk mit Normalmauermörtel gilt:

$$f_k = K \cdot f_{st}^\alpha \cdot f_m^\beta \quad (2.4)$$

Für Mauerwerk mit Leichtmauermörtel bzw. Dünnbettmörtel ist die Mauerwerksdruckfestigkeit unabhängig von der Mörtelfestigkeit und ergibt sich daher zu:

$$f_k = K \cdot f_{st}^\alpha \quad (2.5)$$

Tabelle 2-1 zeigt beispielhaft die Werte K , α und β für Kalksandstein Loch- und Hohlblocksteine sowie für Hochlochziegel mit Lochung A, B und E.

Die Eingangsparameter K , α und β sind normativ in Abhängigkeit der Steinart, der Steindruckfestigkeit und der Mörtelart festgelegt. Die Steindruckfestigkeit kann in Abhängigkeit der gewählten Druckfestigkeitsklasse und die Mörteldruckfestigkeit in Abhängigkeit der Mörtelart der Norm entnommen werden.

Tabelle 2-1: Parameter zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Einsteinmauerwerk aus Hochlochziegeln mit Lochung A (HLzA), Lochung B (HLzB), Lochung E (HLzE)^a, Mauertafelziegeln T1, sowie Kalksand-Loch- und Hohlblocksteinen mit Normalmauermörtel nach [A]

Mittlere Steindruckfestigkeit f_{st} [N/mm ²]	Mörtelart	Parameter		
		K	α	β
$5,0 \leq f_{st} < 10,0$	M 2,5	0,68	0,605	0,189
	M 5			
	M 10	0,70		
	M 20			
$10,0 \leq f_{st} \leq 75,0$	M 2,5 ^b	0,69	0,585	0,162
	M 5 ^b	0,79		
	M 10			
	M 20			

^a Zur Ermittlung der f_k -Werte von Hochlochziegeln mit Lochung E (HLzE) nach DIN 20000-401 sind die zugehörigen Parameter entsprechend der Mörtelklassen M 5 und M 10 nach Tabelle NA.2 und der Druckfestigkeitsklassen 8 und 20 nach Tabelle NA.3 anzusetzen.

^b Die Druckfestigkeit des Mauerwerks darf nicht größer angenommen werden als für Steinfestigkeiten $f_{st} = 25$ N/mm².

DIN EN 1996-3/NA gibt in Anhang D für das vereinfachte Berechnungsverfahren den charakteristischen 5%-Quantilwert der Mauerwerksdruckfestigkeit direkt für verschiedene Stein-Mörtel-Kombinationen in Tabellenform an. Diese Werte sind nach Steinmaterial und Mörtelart aufgeschlüsselt.

Die tabellarisch angegebenen Druckfestigkeiten sind die auf der sicheren Seite liegend ausgewerteten Gleichungen aus DIN EN 1996-1-1/NA. Beispielhaft wird dies für die Kombination eines Mauersteins (Druckfestigkeitsklasse 12) mit der Mörtelklasse M 5 gezeigt.

$$f_k = K \cdot f_{st}^\alpha \cdot f_m^\beta = 0,79 \cdot 15^{0,585} \cdot 5,0^{0,162} = 4,999 \cong f_k = 5,0 \quad (2.6)$$

Exemplarisch wird an dieser Stelle Tabelle NA.D.1 aus Anhang D der DIN EN 1996-3/NA angegeben. Alle weiteren Tabellen für die verschiedenen Stein- und Mörtelkombinationen sind dem Anhang dieses Dokuments zu entnehmen.

Tabelle 2-2: Charakteristische Druckfestigkeit f_k in N/mm² von Einsteinmauerwerk aus Hochlochziegeln mit Lochung A (HLzA), Lochung B (HLzB), Lochung E (HLzE)^a, Mauertafelziegeln T1 sowie Kalksand-Loch- und Hohlblocksteinen mit Normalmauermörtel

Steindruckfestigkeitsklasse	f_k [N/mm ²]			
	M 2,5	M 5	M 10	M 20
4	2,1	2,4	2,9	-
6	2,7	3,1	3,7	-
8	3,1	3,9 ^a	4,4 ^a	-
10	3,5	4,5 ^a	5,0 ^a	5,6
12	3,9	5,0 ^a	5,6 ^a	6,3
16	4,6	5,9 ^a	6,6 ^a	7,4
20	5,3	6,7 ^a	7,5 ^a	8,4
28	5,3	6,7	9,2	10,3
36	5,3	6,7	10,6	11,9
48	5,3	6,7	12,5	14,1
60	5,3	6,7	14,3	16,0

^a Hochlochziegel mit Lochung E (HLzE) nur bei Druckfestigkeitsklassen 8 bis 20 und Mörtelklasse M 5 und M 10.

Um den Bemessungswert der Mauerwerksdruckfestigkeit f_d zu erhalten, muss nach DIN EN 1996/NA der charakteristische Wert nach Gleichung (2.7) modifiziert werden.

$$f_d = \zeta \cdot \frac{f_k}{\gamma_M} \quad (2.7)$$

mit

ζ Beiwert zur Berücksichtigung festigkeitsmindernder Langzeiteinflüsse auf das Mauerwerk

- im Allgemeinen $\zeta = 0,85$

- bei außergewöhnlichen (kurzzeitigen) Einwirkungen $\zeta = 1,0$

f_k Charakteristischer Wert der Mauerwerksdruckfestigkeit

γ_M Teilsicherheitsbeiwert für Baustoffeigenschaften

Der Bemessungswert der Druckfestigkeit muss darüber hinaus zusätzlich abgemindert werden, wenn die betrachtete Wandquerschnittsfläche kleiner als 1000 cm² ist.

Um die Druckfestigkeit von Verbandsmauerwerk - Verbandsmauerwerk ist Mauerwerk mit mehr als einem Stein in Richtung der Wanddicke (vgl. Kap. 1.3.2) - mit Normalmauermörtel zu erhalten, ist die Druckfestigkeit von Einsteinmauerwerk mit dem Faktor 0,80 zu multiplizieren.

2.2.3 Zugfestigkeit von Mauerwerk parallel zur Lagerfuge

Die Zugfestigkeit der Steine und der geregelte Verband des Mauerwerks ermöglichen die Aufnahme von Zugspannungen parallel zur Lagerfuge. Die Zugfestigkeit des Mörtels in der Stoßfuge wird dabei vernachlässigt. Für die Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit wird die Zugfestigkeit von Mauerwerk parallel zur Lagerfuge nicht angesetzt. Bei Versagen auf Zug sind zwei Versagensmechanismen möglich (siehe dazu Bild 2-4). Es können entweder die Steine aufreißen oder die Haftreibung zwischen Mörtel und Stein wird überschritten.

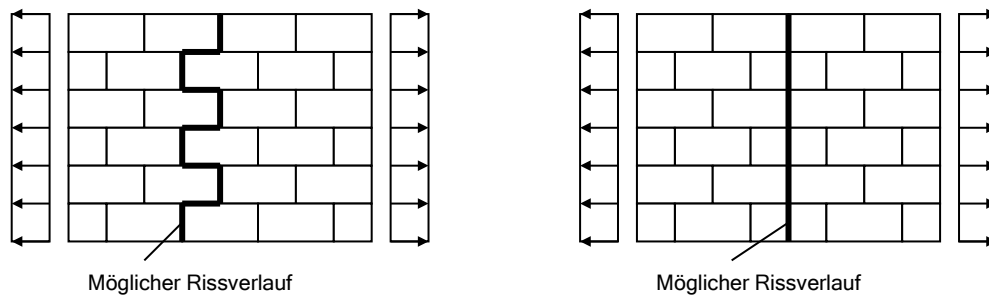


Bild 2-4: Zugbeanspruchung von Mauerwerk parallel zur Lagerfuge: links: Versagen infolge Überschreitung der Reibungskraft; rechts: Steinzugversagen

Im Fall des Steinzugversagens beträgt die aufnehmbare Zugspannung die halbe Steinzugfestigkeit, da nur in jeder zweiten Steinreihe ein Stein vorhanden ist, während in den anderen der Riss durch die Stoßfuge verläuft. Im Fall des Reibungsversagens kann die aufnehmbare Zugspannung nach Gleichung (2.8) bestimmt werden (vgl. [14]).

$$f_x^b = (c + \mu \cdot \sigma_y) \cdot \frac{\ddot{u}}{h} \quad (2.8)$$

mit

- $c + \mu \cdot \sigma_y$ Schubfestigkeit in der Mörtelfuge
 \ddot{u}/h Verhältnis Überbindemaß zu Steinhöhe

2.2.4 Charakteristische Biegezugfestigkeit

Unter bestimmten Umständen - z. B. bei Plattenbiegung - erfährt Mauerwerk Biegezugbeanspruchungen senkrecht oder parallel zur Lagerfuge. Bei Plattenbiegung darf die charakteristische Biegezugfestigkeit f_{xk1} mit einer Bruchebene parallel zu den Lagerfugen (Plattenbiegung) in tragenden Wänden nicht in Rechnung gestellt werden, da die Haftzugfestigkeit des Mauermörtels sehr großen Streuungen unterworfen ist. Eine Ausnahme gilt nur, wenn Wände aus Planelementen bestehen und lediglich durch zeitweise einwirkende Lasten rechtwinklig zur Oberfläche beansprucht werden (z. B. Wind auf Ausfachungsmauerwerk). In diesem Fall darf der Bemessung eine charakteristische Biegezugfestigkeit in Höhe von $f_{xk1} = 0,2 \text{ N/mm}^2$ zugrunde gelegt werden. Bei einem Versagen der Wand darf es jedoch nicht zu einem größeren Einsturz oder zum Stabilitätsverlust des ganzen Tragwerkes kommen.

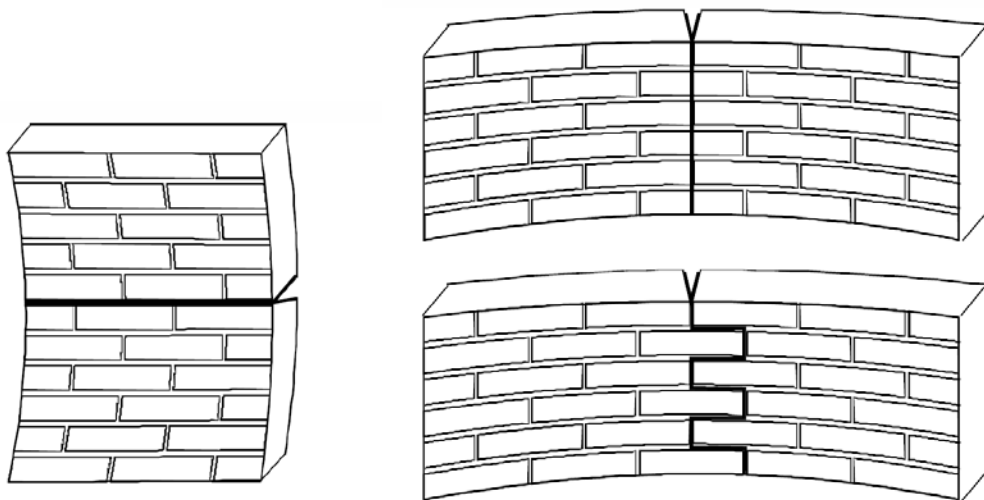


Bild 2-5: links: Bruchebene parallel zu den Lagerfugen, f_{xk1} ; rechts: Bruchebene senkrecht zu den Lagerfugen, f_{xk2} ; nach [8], Kap. 3.6.4, Bild 3.1

Bei der Bestimmung des charakteristischen Wertes der Biegezugfestigkeit parallel zur Lagerfuge f_{xk2} wird nach DIN EN 1996-1-1/NA nicht nach vermörtelten und unvermörtelten Stoßfugen unterschieden. In die Bestimmung der Materialkenngröße gehen die Haftscherfestigkeit f_{vk0} (auch als Anfangsscherfestigkeit bezeichnet), der Reibungsbeiwert $\mu = 0,6$, die Normalspannung σ_d senkrecht zur Lagerfuge für den untersuchten Lastfall (im Regelfall mit der geringste zugehörige Wert) sowie das Verhältnis Überbindemaß/Steinhöhe l_{ol}/h_u ein.

Die charakteristische Biegezugfestigkeit f_{xk2} von Mauerwerk mit der Bruchebene senkrecht zu den Lagerfugen (s. Bild 2-5, rechts) ergibt sich zu:

$$f_{xk2} = (\alpha \cdot f_{vk0} + 0,6 \cdot \sigma_d) \cdot \frac{l_{ol}}{h_u} \leq f_{xk2,max} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,5 \cdot f_{bt,cal} \\ 0,7 \text{ N/mm}^2 \end{array} \right. \quad (2.9)$$

Der Korrekturbeiwert α ist für vermörtelte Stoßfugen mit 1,0 und für unvermörtelte Stoßfugen mit 0,5 anzunehmen, d.h. Mauerwerk mit unvermörtelten Stoßfugen weist normativ nur die halbe Biegezugfestigkeit von Mauerwerk mit vermörtelten Stoßfugen auf.

Der Maximalwert der charakteristischen Biegezugfestigkeit von Mauerwerk mit der Bruchebene senkrecht zu den Lagerfugen $f_{xk2,max}$ kann Tabelle 2-3 entnommen werden:

Tabelle 2-3: Maximalwert der charakteristischen Biegezugfestigkeit von Mauerwerk mit der Bruchebene senkrecht zu den Lagerfugen $f_{xk2,max}$ nach [8]

	Umgerechnete mittlere Mindestdruck- festigkeit f_{st} [N/mm ²]	2,5	5	7,5	10	12,5	15	20	25	35	45	60	75
Maximalwert der charakte- ristischen Biegezug- festigkeit von Mauerwerk mit der Bruchebene senkrecht zu den Lagerfugen $f_{xk2,max}$ [N/mm²]	Hohlblocksteine	0,03	0,05	0,08	0,10	0,13	0,15	0,20	0,25	0,35	0,45	0,60	0,70
	Hochlochsteine und Steine mit Grifföffnungen oder Griffaschen	0,03	0,07	0,10	0,13	0,17	0,20	0,26	0,33	0,46	0,59	0,70	0,70
	Vollsteine ohne Grifflöcher oder Griffaschen	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,32	0,40	0,56	0,70	0,70	0,70
	Porenbetonplanst eine der Länge ≥ 498 mm und der Höhe ≥ 248 mm	0,08	0,14	0,20	0,25	0,29	0,33	0,41	0,48	0,61	0,70	0,70	0,70

Die Bestimmung des Bemessungswertes der Biegezugfestigkeit erfolgt unter Berücksichtigung des Teilsicherheitsbeiwertes γ_M . Der Ansatz eines Dauerstandsfaktors ist in diesem Fall nicht erforderlich.

2.2.5 Haftscherfestigkeit

Die Anfangsscherfestigkeit, oft Haftscherfestigkeit genannt, beschreibt die vorhandene Klebewirkung zwischen Steinen und Mörtel, die zu einer Querkrafttragfähigkeit des Querschnitts auch ohne vorhandene vertikale Auflast führt. Für die Bemessung nach DIN 1053-1 wurde dieser Materialkennwert zur Erfassung in der Bemessung nicht explizit berücksichtigter Einflüsse (z.B. ungleichmäßige Normalspannungsverteilung bei Scheibenschubbeanspruchung) modifiziert und als sogenannter Rechenwert der Haftscherfestigkeit (β_{RHS} bzw. σ_{0HS}) angegeben. In DIN EN 1996-1-1/NA wird diese modifizierte Haftscherfestigkeit mit f_{vk0} bezeichnet. Dementsprechend stellen die Haftscherfestigkeiten f_{vk0} nach Tabelle 2-4 bereits modifizierte Rechenwerte der Anfangsscherfestigkeit dar und sind somit keine wirklichkeitsnahen Materialkenngrößen.

Das Nachweiskonzept des Eurocodes kennt keine derartig modifizierten Rechenwerte, sondern basiert auf „echten“ Materialkenngrößen als 5%-Quantilwerten. Die Berücksichtigung des genannten Effekts muss somit direkt im Bemessungsmodell erfolgen, was im Eurocode für die Bemessung durch eine Abminderung der experimentell bestimmten Anfangsscherfestigkeit mit dem Faktor $1/(1+\mu)$ geschieht, wobei μ der Reibungsbeiwert ist. Dieser wird für alle Mauerwerksarten in den verschiedenen Nachweisen einheitlich mit $\mu = 0,6$ angesetzt (vgl. V4 - Mauerwerk unter Querkraftbeanspruchung).

Tabelle 2-4: Rechenwerte der Haftscherfestigkeit f_{vk0} von Mauerwerk ohne Auflast nach [8]

f_{vk0} (N/mm ²)					
Normalmauermörtel mit einer Festigkeit f_m (N/mm ²)				Dünnbettmörtel (Lagerfugendicke 1 mm bis 3mm)	Leichtmauermörtel
NM II	NM IIa	NM III	NM IIIa		
2,5	5,0	10,0	20,0		
0,08	0,18	0,22	0,26	0,22	0,18

2.3 Formänderungen von Mauerwerk

2.3.1 Ursachen und Folgen

Mauerwerk ist häufig Einflüssen ausgesetzt, die Längenänderungen hervorrufen und zu großen Spannungen führen, welche ggf. bei der Bemessung zu berücksichtigen sind.

Formänderungen können entweder infolge einer Lastbeanspruchung oder aufgrund von Temperatur- oder Feuchteeinwirkungen - also lastunabhängig - auftreten. Die lastabhängigen Dehnungen können des Weiteren nach der Dauer der Lasteinwirkung differenziert werden. Nur kurzzeitig einwirkende Lasten verursachen i.A. nur eine elastische Längenänderung, die sich direkt nach dem Belastungsbeginn einstellt und die mit dem Ende der Belastung wieder in die Ausgangslage zurückgeht. Bei andauernder Belastung beginnt Mauerwerk zu kriechen und es stellen sich bleibende bzw. sich nur sehr verzögert zurückbildende Verformungen ein.

Eine Dehnung infolge einer Veränderung des Feuchtegehaltes von Mauerwerk wird als Schwinden bzw. als Quellen bezeichnet. Dadurch können relativ große Volumenänderungen auftreten. Zu beachten ist, dass beim Quellvorgang auch irreversible Formänderungen entstehen können, sodass der Ursprungszustand trotz anschließenden Schwindens nicht wieder erreicht wird. Eine Übersicht über die verschiedenen Dehnungseinflüsse sowie Gleichungen zur Berechnung der auftretenden Dehnungen können Bild 2-6 entnommen werden.

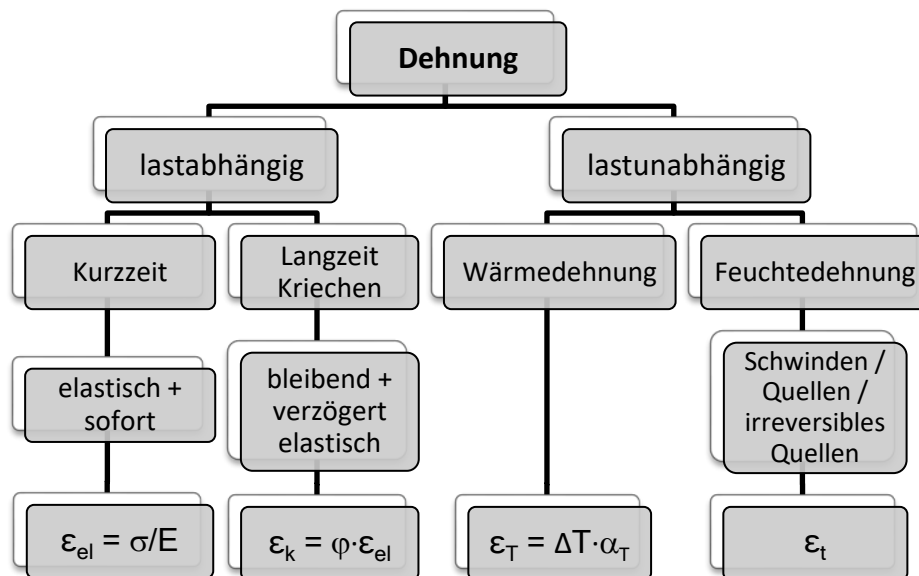


Bild 2-6: Ursachen für Formänderungen von Mauerwerk

Darüber hinaus kann Mauerwerk aber auch infolge Zwangsbeanspruchungen aufgrund von Verformungen anderer Bauteile derart beansprucht werden, dass Formänderungen auftreten. So kann beispielsweise eine infolge Kriechen, Schwinden oder Temperaturänderung entstehende Verkürzung oder Verlängerung der Decke dazu führen, dass sich Risse im Mauerwerk bilden, wenn Decke und Wand miteinander verbunden sind. Auch eine Durchbiegung der Decke kann in der darüber stehenden Wand eine Rissbildung verursachen.

2.3.2 Kennwerte

Bei Mauerwerk hängt das Last-Verformungs-Verhalten maßgeblich von der gewählten Mauerstein-Mörtel-Kombination ab. Trotz der großen Vielfalt möglicher Kombinationen und der zugehörigen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen kann bei der Bemessung nach DIN EN 1996/NA vereinfachend von einem starr-plastischen Materialverhalten für alle Stein- und Mörtelarten ausgegangen werden. Bei verformungsabhängigen Nachweisen wird der Elastizitätsmodul als bestimmende Materialkenngröße nachweisbezogen (Knicksicherheitsnachweis oder Gebrauchstauglichkeitsnachweis) abgeschätzt.

Das häufig nichtlineare Formänderungsverhalten von Mauerwerk war in den letzten Jahrzehnten Inhalt zahlreicher Forschungsvorhaben. Beispielhaft ist in Bild 2-7 ein Vorschlag für verschiedene Spannungs-Dehnungs-Beziehungen nach Schubert [18] dargestellt.

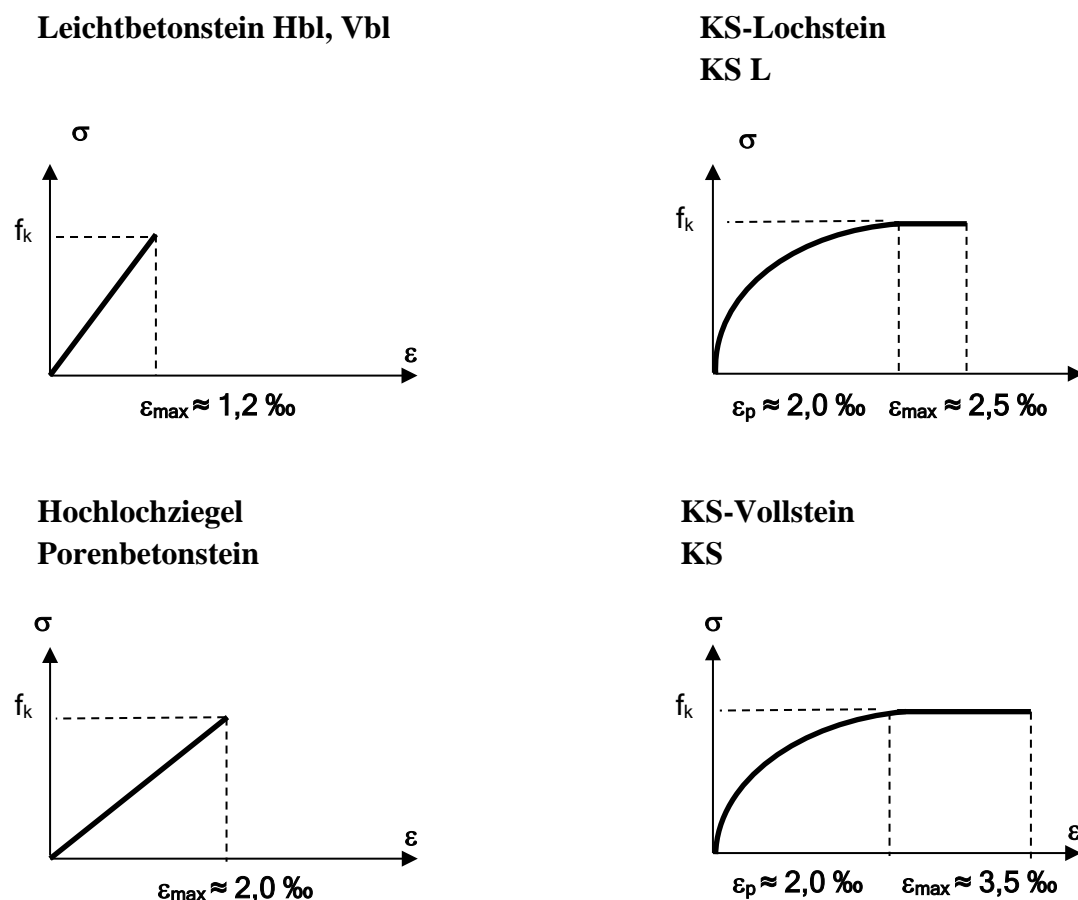


Bild 2-7: Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Mauerwerk nach [18]

In Anlehnung an [7] können nach [11] die verschiedenen Formen der Spannungs-Dehnungs-Beziehung sehr realitätsnah über eine normierte mathematische Beziehung beschrieben werden.

$$\frac{\sigma}{f} = \frac{k_0 \cdot \eta - \eta^2}{1 + (k_0 - 2) \cdot \eta} \quad (2.10)$$

Mit Hilfe dieser Formulierung kann eine beliebige nichtlineare Arbeitslinie zwischen den Grenzfällen linear-elastisch und starr-plastisch abgebildet werden. Dabei wird die Völligkeit der Spannungs-Dehnungs-Beziehung sowohl für $0 \leq \eta \leq 1$ als auch der Verlauf der abfallenden Spannungen $\eta > 1$ allein mit Hilfe des bezogenen Ursprungsmoduls $k_0 = E_p \cdot \varepsilon_0 / f_k$ festgelegt. Diese Kennzahl liegt bei Ziegel oder Porenbetonmauerwerk in der Größenordnung von 1,1 bis 1,5, während sie für KS-Mauerwerk etwa 1,8 bis 2,5 beträgt. Der Eurocode 6 enthält weitere in Tabelle 2-5 angegebene Verformungskennwerte für verschiedene Mauerwerksarten.

Tabelle 2-5: Verformungskennwerte von Mauerwerk nach [8]

Mauersteinart	Mauermörtelart	Endkriechzahl ^a φ_∞		Endwert der Feuchtedehnung ^b mm/m		Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha_t \cdot 10^{-6} / K$		E-Modul N/mm ²	
		Rechenwert	Wertebereich	Rechenwert	Wertebereich	Rechenwert	Wertebereich	Rechenwert	Wertebereich
Ziegel	Normalmauermörtel / Dünnbettmörtel	1,0	0,5 - 1,5	0	-0,1 ^c - +0,3	6	5 - 7	1100 · f _k	950 - 1250 · f _k
	Leichtmauermörtel	2,0	1,0 - 3,0						
Kalksandstein	Normalmauermörtel / Dünnbettmörtel	1,5	1,0 - 2,0	-0,2	-0,3 - -0,1	8	7 - 9	950 · f _k	800 - 1250 · f _k
Betonsteine	Normalmauermörtel	1,0	-	-0,2	-0,3 - -0,1	10	8 - 12	2400 · f _k	2050 - 2700 · f _k
Leichtbetonsteine	Normalmauermörtel	2,0	1,5 - 2,5	-0,4	-0,6 - -0,2	10; 8 ^d		950 · f _k	800 - 1100 · f _k
	Leichtmauermörtel			-0,5	-0,6 - -0,3				
Porenbetonsteine	Dünnbettmörtel	0,5	0,2 - 0,7	-0,1	-0,2 - +0,1	8	7 - 9	550 · f _k	500 - 650 · f _k
a	Endkriechzahl $\varphi_\infty = \varepsilon_\infty / \varepsilon_{el}$, mit ε_∞ als Endkriechmaß und $\varepsilon_{el} = \sigma / E$.								
b	Endwert der Feuchtedehnung ist bei Stauchung negativ und bei Dehnung positiv angegeben.								
c	Für Mauersteine < 2 DF gilt der Grenzwert - 0,2 mm/m.								
d	Für Leichtbeton mit überwiegend Blähton als Zuschlag.								