

**Hintergründe zur  
Bemessung von Mauerwerk  
unter Brandeinwirkung**

**T 3138**

T 3138

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2007

ISBN 978-3-8167-7365-8

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

Forschungsbericht des  
Instituts für Massivbau der  
Technischen Universität Darmstadt

## Hintergründe zur Bemessung von Mauerwerk unter Brandeinwirkung

- ABSCHLUSSBERICHT -

Im Auftrag des  
Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner  
Dipl.-Ing. Guido Hausmann

Darmstadt, im Oktober 2006

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Notwendigkeit des Forschungsvorhabens .....	1
1.2	Vorgehensweise und Ziel des Forschungsvorhabens .....	2
<b>2</b>	<b>Normative Entwicklung von DIN 1053 und DIN 4102 .....</b>	<b>3</b>
2.1	DIN 1053 – Mauerwerk: Berechnung und Ausführung .....	3
2.1.1	Allgemeines .....	3
2.1.2	DIN 1053: 1937 [7] .....	3
2.1.3	DIN 1053: 1952 [8] .....	3
2.1.4	DIN 1053: 1962 [9] .....	4
2.1.5	DIN 1053: 1974 [10] .....	4
2.1.6	DIN 1053: 1984 [6] .....	5
2.1.7	DIN 1053-1: 1990 [2] .....	8
2.1.8	DIN 1053-1: 1996 [3] .....	9
2.1.9	DIN 1053-100: 2004 [4] .....	10
2.2	DIN 4102: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen .....	11
2.2.1	Allgemeines .....	11
2.2.2	DIN 4102: 1940 [16] .....	11
2.2.3	DIN 4102:1965 [17] .....	13
2.2.4	DIN 4102: 1970 [19] .....	14
2.2.5	DIN 4102-2: 1977 [20] .....	15
2.2.6	DIN 4102: 1981 [21] [22] .....	15
2.2.7	DIN 4102-4: 1994 [1] .....	16
2.2.8	DIN 4102-22: 2004 [5] .....	17
2.3	Durchführung von Brandversuchen nach DIN 4102-2 [20] .....	18
2.3.1	Allgemeines .....	18
2.3.2	Anforderungen .....	19

2.3.3	Versuchsdurchführung .....	19
2.3.4	Festlegung der Prüflasten .....	21
2.3.5	Tragreserven durch realitätsnahen Ansatz der Knicklänge.....	21
2.4	Beurteilung der derzeitigen Auslegung der Normen.....	26
<b>3</b>	<b>Vergleich der Kaltbemessung im Mauerwerksbau nach verschiedenen Berechnungsverfahren .....</b>	<b>29</b>
3.1	Allgemeines.....	29
3.2	Einfluss der Wandschlankheit.....	30
3.3	Einfluss von Lastexzentrizitäten .....	37
3.4	Einfluss des Sicherheitskonzeptes.....	44
3.5	Einfluss der Mauerwerksart .....	48
<b>4</b>	<b>Klassifizierung von Mauerwerkswänden nach DIN 4102-4 .....</b>	<b>52</b>
4.1	Allgemeines.....	52
4.2	Definition des Ausnutzungsgrades $\alpha_2$ nach DIN 4102: 1994 .....	59
4.2.1	Grundlagen .....	59
4.2.2	Beschränkung der Lastexzentrizität .....	60
4.3	Ermittlung des Ausnutzungsgrades $\alpha_2$ auf Basis des Teilsicherheitskonzeptes nach [25].....	62
4.3.1	Herleitung der Bestimmungsgleichung.....	62
4.3.2	Anwendungsbeispiel .....	63
4.3.3	Kritische Analyse der Anwendungsgrenzen .....	65
<b>5</b>	<b>Möglichkeit einer Modifizierung des Ausnutzungsgrades <math>\alpha_2</math>.....</b>	<b>68</b>
5.1	Allgemeines.....	68
5.2	Quantifizierung von Tragreserven durch realitätsnahen Ansatz der Knicklänge ....	68
5.3	Modifizierung des Ausnutzungsgrades .....	70
<b>6</b>	<b>Ausblick auf zukünftigen Forschungsbedarf.....</b>	<b>73</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Fazit.....</b>	<b>75</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>78</b>

## Kurzzusammenfassung

Der vorliegende Bericht dient zunächst der Darstellung der Hintergründe zur Bemessung von Mauerwerk unter Brandeinwirkung nach DIN 4102-4 in Verbindung mit DIN 1053. Dazu wurde zunächst eine Analyse der historischen Entwicklung von DIN 4102 und DIN 1053 durchgeführt, um herauszuarbeiten auf welche Fassung der Bemessungsnorm sich die aktuelle Version von DIN 4102 bezieht. Als Grundlage für die Entwicklung eines Vorschlages zur Ermittlung des Ausnutzungsfaktors  $\alpha_2$  wurde eine eingehende Analyse der verschiedenen normativen Bemessungsverfahren von schlanken Mauerwerkswänden durchgeführt. Dabei konnten z.T. erhebliche Unterschiede in der Berücksichtigung des Schlankheitseinflusses festgestellt werden, die zu stark differierenden rechnerischen Tragfähigkeiten führen. Schließlich wurde ein Vorschlag zur Bestimmung des Ausnutzungsfaktors  $\alpha_2$  entwickelt, der unabhängig vom Konzept der Kaltbemessung eine Klassifizierung von Mauerwerkswänden in eine bestimmte Feuerwiderstandsklasse auf Grundlage der Tabellenwerke von DIN 4102-4 ermöglicht. Mit Vorliegen eines solchen Ausnutzungsfaktors kann eine sinnvolle Anwendung von DIN 1053-100 in Verbindung mit DIN 4102-22 und DIN 4102-4 gewährleistet werden.

Dieser Vorschlag basiert auf dem charakteristischen Wert der Einwirkung  $N_{Ek}$  und der Mauerwerksfestigkeit  $f_k$ . Als Bezugswert für den Tragfähigkeitsabminderungsfaktor infolge Knicken wurde der Faktor  $k_2$  aus dem vereinfachten Bemessungsverfahren der DIN 1053-1: 1996 verwendet. Der Teilsicherheitsbeiwert für die Materialeigenschaften im Brandfall  $\gamma_M$  wurde am bestehenden Sicherheitsniveau kalibriert.

Die vorgestellten Bestimmungsgleichungen sind als Übergangslösung zu betrachten, die momentan nur gewährleisten, dass formal eine Anwendung der Mauerwerksnorm auf dem semi-probabilistischen Sicherheitskonzept ermöglicht wird. Insgesamt gesehen können die Tragfähigkeitspotenziale, die in DIN 1053-100 enthalten sind, bei Brandschutzanforderungen derzeit nur bedingt realisiert werden.

Für Wände mit Wanddicken  $d \leq 17,5$  cm wurde als Grundlage für weitere Diskussionen eine Modifizierung des Ausnutzungsfaktor vorgestellt. Dies liegt in der wirklichkeitsnahen Berücksichtigung der realen Lagerungsbedingungen im Brandversuch begründet, die dazu führt, dass der zulässige Ausnutzungsfaktor erhöht werden kann. Die Nutzung dieser Tragreserve sollte jedoch durch weitere Forschungstätigkeit noch abgesichert werden und ist somit für die Bemessungspraxis noch nicht nutzbar.

## Summary of the research project

The available report serves the background for the calculation and design of masonry under fire exposure according to DIN 4102-4 combined with DIN 1053. Firstly an analysis of the historical development of DIN 4102 and DIN 1053 was accomplished, to work out on which version of the calculation standard the current version of DIN 4102 refers.

On the basis of the reconstruction of historical evolution combined with a detailed analysis of different normative design concepts of slender masonry walls a suggestion for the determination of the utilization factor  $\alpha_2$  was developed, which permits the classification of masonry walls into a specified fire resistance class based on the tables in DIN 4102-4 independent of the design concept under normal conditions. Such a utilization factor guarantees a reasonable combined usage of DIN 1053-100, DIN 4102-22 and DIN 4102-4.

The determination applies the characteristic value of action  $N_{Ek}$  and the characteristic compression strength  $f_k$ . As a reference value for the reduction factor due to buckling, the factor  $k_2$  of the simplified design procedure of DIN 1053-1: 1996 is used.

The partial safety factor for material properties in case of fire  $\gamma_M$  was calibrated on existing safety level. Therefore the full load bearing capacity according to DIN 1053-100 cannot be used at present, if requirements due to structural fire design are to be satisfied.

For masonry walls with thickness  $d \leq 17.5$  cm as a basis for further discussions a modified utilization factor is presented. This can be justified by the realistic consideration of the bearing conditions during fire tests, which leads to the fact that the permissible utilization factor can be increased. The use of this reserve of carrying capacity should be still secured by further research work and is not yet usable for calculation and design practice.

## Résumé bref du rapport final

Dans le cadre du projet de recherche présent, une proposition pour la détermination du facteur d'utilisation  $\alpha_2$  a été développée. Celle-ci permet, indépendamment du concept de dimensionnement à température normale, une classification des parois de maçonnerie selon leur catégorie de résistance au feu sur la base des tableaux de la DIN 4102-4. L'existence de ce facteur d'utilisation peut garantir une utilisation raisonnable de la DIN 1053-100 en relation avec les DIN 4102-22 et DIN 4102-4. La proposition a été réalisée sur la base d'une reconstruction de l'évolution historique de la DIN 4102 et d'une analyse détaillée des différentes méthodes normatives de dimensionnement des parois de maçonnerie élancées.

Cette proposition repose sur la valeur caractéristique de l'action  $N_{Ek}$  et de la résistance de maçonnerie  $f_k$ . Le facteur  $k_2$ , issu de la méthode de dimensionnement simplifiée, a été utilisé comme valeur de référence pour le facteur de réduction de la résistance de calcul en cas de flambement. Le coefficient partiel de sécurité pour les propriétés du matériau dans le cas d'embrassement  $\gamma_M$  a été calibré au niveau de sécurité existant. Actuellement, les potentiels relatifs à la résistance de calcul, qui sont inclus dans la DIN 1053-100, ne peuvent être utilisés dans le cas d'ignifugation que sous condition.

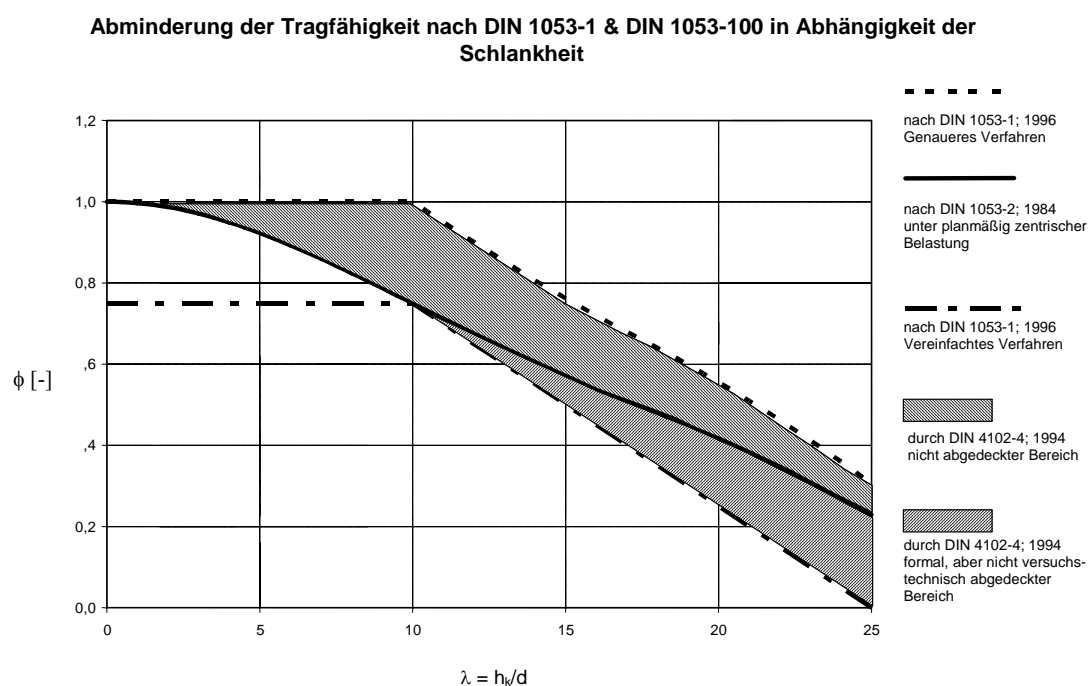
Pour les murs d'épaisseur  $d \leq 17,5$  cm, le coefficient d'utilisation peut être déterminé par une prise en compte modifiée de l'influence de l'élancement. Ceci est justifié par la considération des conditions réelles des supports lors d'un essai d'incendie. L'utilisation de cette réserve de charge admissible devrait toutefois être assurée par une autre activité de recherche et n'est pas encore utilisable pour la pratique de calcul.



## Zusammenfassung und Wertung für die praktische Umsetzung

Das Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens war die Darstellung der Hintergründe zur Bemessung von Mauerwerk unter Brandeinwirkung sowie die Entwicklung eines Vorschlages zur Ermittlung des Ausnutzungsfaktors  $\alpha_{B_2}$ , der unabhängig vom Konzept der Kaltbemessung eine Klassifizierung von Mauerwerkswänden in eine bestimmte Feuerwiderstandsklasse auf Grundlage der Tabellenwerke von DIN 4102-4: 1994 ermöglicht. Mit Vorliegen eines solchen Ausnutzungsfaktors kann eine sinnvolle Anwendung von DIN 1053-100: 2004 in Verbindung mit DIN 4102-22: 2004 und DIN 4102-4: 1994 gewährleistet werden.

Dazu wurde zunächst eine Analyse der historischen Entwicklung von DIN 4102 und DIN 1053 durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass die derzeit für Brandschutznachweise im Mauerwerksbau verwendeten Tabellenwerke der DIN 4102-4: 1994 und der darin enthaltene Ausnutzungsfaktor sich auf die Mauerwerksnormen DIN 1053-1: 1990 und DIN 1053-2: 1984 beziehen. Das in DIN 1053-1: 1990 verankerte vereinfachte Nachweisverfahren und das in DIN 1053-2: 1984 verankerte genauere Verfahren wurden 1996 in DIN 1053-1: 1996 zusammengeführt. Demnach hat man in der Bemessungspraxis alle Hinweise in DIN 4102-4: 1994 auf DIN 1053-2: 1984 durch DIN 1053-1: 1996 ersetzt.



**Abbildung 1:** Abminderung der Traglast infolge des Schlankheitseinflusses nach dem „vereinfachten“ sowie dem „genaueren“ Verfahren nach DIN 1053, 1996 sowie DIN 1053-2: 1984

Diese Vorgehensweise birgt jedoch brandschutztechnische Sicherheitsrisiken, da dem Rechenverfahren nach Anhang B aus DIN 1053-2: 1984 bzw. dem „genaueren“ Verfahren nach DIN 1053-1: 1990 nicht die identischen Bemessungsansätze zu Grunde liegen wie dem „genaueren“ Verfahren nach DIN 1053-1: 1996. Im Unterschied zur älteren Ausgabe DIN 1053-2: 1984 setzt DIN 1053-1: 1996 im „genaueren“ Verfahren durch die Erhöhung des Rechenwertes der Druckspannung  $\beta_R$  um den Faktor  $4/3$  bei ausmittiger Belastung plastisches Verformungsverhalten an, wodurch höhere zulässige Traglasten erreicht werden. Der daraus resultierende Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2$  wird demnach kleiner, was zu günstigeren brandschutztechnischen Anforderungen führt, da die nach DIN 4102 – 4: 1994 geforderte Mindestwanddicke vom Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2$  abhängt. Des Weiteren ist zu beachten, dass sämtlichen Brandversuchen unter Verwendung einer Prüflast durchgeführt wurden, die auf dem vereinfachten Nachweisverfahren von DIN 1053-1 beruhen. Die sich nach DIN 1053-2: 1984 ergebenden höheren Traglasten sind daher im Brandfall versuchtechnisch nicht abgesichert.

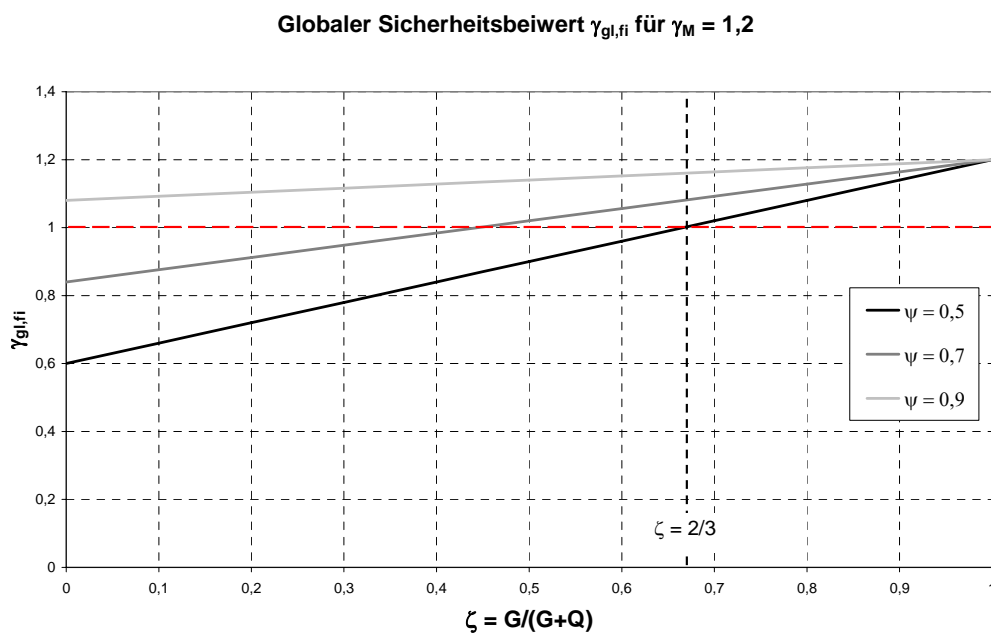
Als Grundlage für die Entwicklung eines Vorschlages zur Ermittlung des Ausnutzungsfaktors  $\alpha_2$  wurde eine eingehende Analyse der verschiedenen normativen Bemessungsverfahren von schlanken Mauerwerkswänden durchgeführt. Die Bemessung unterscheidet sich durch drei Einflussgrößen: das Sicherheitskonzept, der unterschiedliche Traglastabminderungsfaktor zur Berücksichtigung des Knickens und die Definition der Festigkeiten. Die unterschiedliche Definition der Mauerwerksfestigkeit verursacht jedoch keine Differenzen in der Bestimmung der Tragfähigkeit. Die Unterschiede liegen im Wesentlichen in der unterschiedlichen Berücksichtigung der Traglastabminderung infolge Knicken. Die Unterschiede im Sicherheitskonzept sind für den Nachweis schlanker Wände unter Längsdruckbeanspruchung vornehmlich formaler Natur, je nach Verhältnis von Eigengewicht und Verkehrslast sind Abweichungen von maximal 11% zu beobachten.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen konnte ein Vorschlag zur Ermittlung des Ausnutzungsfaktors  $\alpha_2$  entwickelt werden, der eine sinnvolle Anwendung von DIN 1053-100: 2004 in Verbindung mit DIN 4102-22: 2004 und DIN 4102-4: 1994 gewährleistet. Dieser Vorschlag basiert auf dem charakteristischen Wert der Einwirkung  $N_{Ek}$  und der Mauerwerksfestigkeit  $f_k$ . Da die Brandversuche in der Vergangenheit mit Belastungen gefahren wurden, die auf der rechnerischen Tragfähigkeit nach dem vereinfachten Bemessungsverfahren nach DIN 1053-1: 1990 bzw. 1996 ermittelt wurden, wurde als Bezugswert für den Tragfähigkeitsabminderungsfaktor infolge Knicken der Faktor  $k_2$  aus den genannten Bemessungsverfahren verwendet. Die nach dem Teilsicherheitskonzept bei einer außergewöhnlichen Bemessungssituation,

wie sie der Brandfall darstellt, eigentlich zulässige Reduzierung der Einwirkung gegenüber dem charakteristischen Wert wird durch Ansatz eines gegenüber der Bemessung unter Normaltemperaturen reduzierten Teilsicherheitsbeiwertes auf der Materialseite  $\gamma_M$  wieder kompensiert. Dieser Teilsicherheitsbeiwert wurde am bestehenden Sicherheitsniveau kalibriert. Bei Bedarf können die Einflüsse aus den Lastverhältnissen und der Lastursache aber durch den globalen Sicherheitsbeiwert im Brandfall durch Ansatz von  $\gamma_{gl,fi}$  berücksichtigt werden:

$$\gamma_{gl,fi} = (\zeta + \psi_{1,1} \cdot (1 - \zeta)) \cdot \gamma_{M,fi} \quad \text{mit} \quad \zeta = \frac{N_{G,k}}{N_{G,k} + N_{Q,k}}$$

Für einen Teilsicherheitsbeiwert auf der Materialseite von  $\gamma_M = 1,2$  ist der globale Sicherheitsbeiwert für den Brandfall nach dem Teilsicherheitskonzept in Abhängigkeit des Lastverhältnisses und des Kombinationsbeiwertes  $\psi$  in Abbildung 2 angegeben.



**Abbildung 2:** Globaler Sicherheitsbeiwert für den Brandfall nach dem Teilsicherheitskonzept in Abhängigkeit des Lastverhältnisses und des Kombinationsbeiwertes  $\psi$  für einen Teilsicherheitsbeiwert auf der Materialseite von  $\gamma_M = 1,2$

Im Einzelnen ergibt sich unter Berücksichtigung von  $\gamma_M = 1,2$  und  $\psi = 0,5$  folgender Vorschlag zur Bestimmung des Ausnutzungsfaktors.

für  $\lambda \leq 10$ :

$$\alpha_2 = 3,14 \cdot \frac{N_{Ek}}{b \cdot d \cdot f_k} \cdot k_0$$

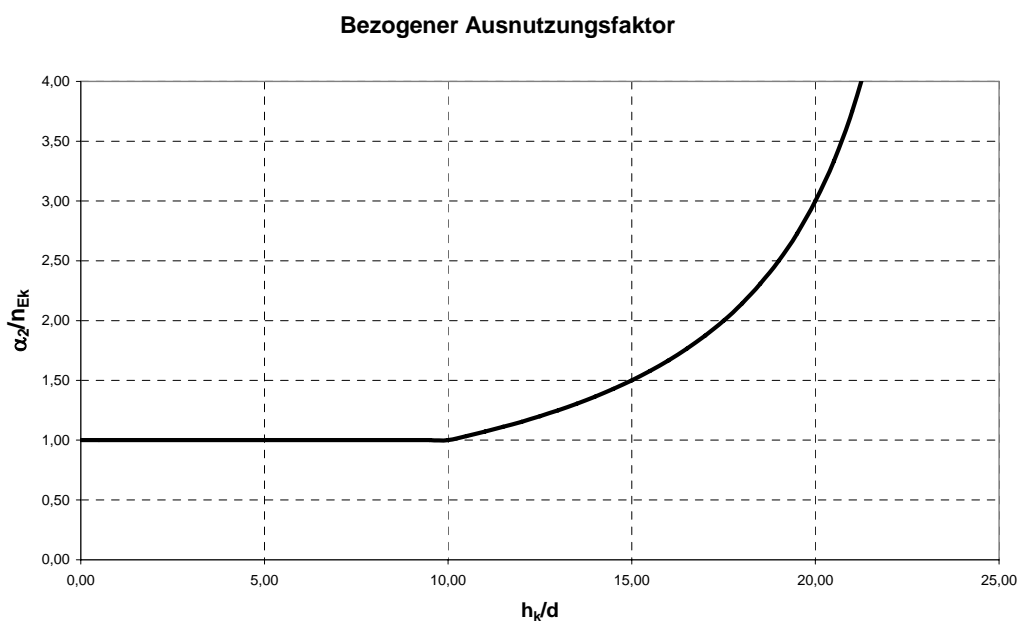
$$\text{für } 10 < \lambda \leq 25 \quad \alpha_2 = 3,14 \cdot \frac{15}{25 - \lambda} \cdot \frac{N_{Ek}}{b \cdot d \cdot f_k} \cdot k_0$$

$k_0$  stellt darin einen Faktor zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M$  für Wände und kurze Wände dar.

Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass in die Berechnung von  $\alpha_2$  der charakteristische Wert der einwirkenden Normalkraft  $N_{Ek}$  in die Berechnung eingeht. Dieser ist nicht mit dem Bemessungswert zu verwechseln, der für die außergewöhnliche Einwirkungskombination Brand unter Berücksichtigung der Kombinationsbeiwerte  $\psi$  kleinere Werte als  $N_{Ek}$  liefert

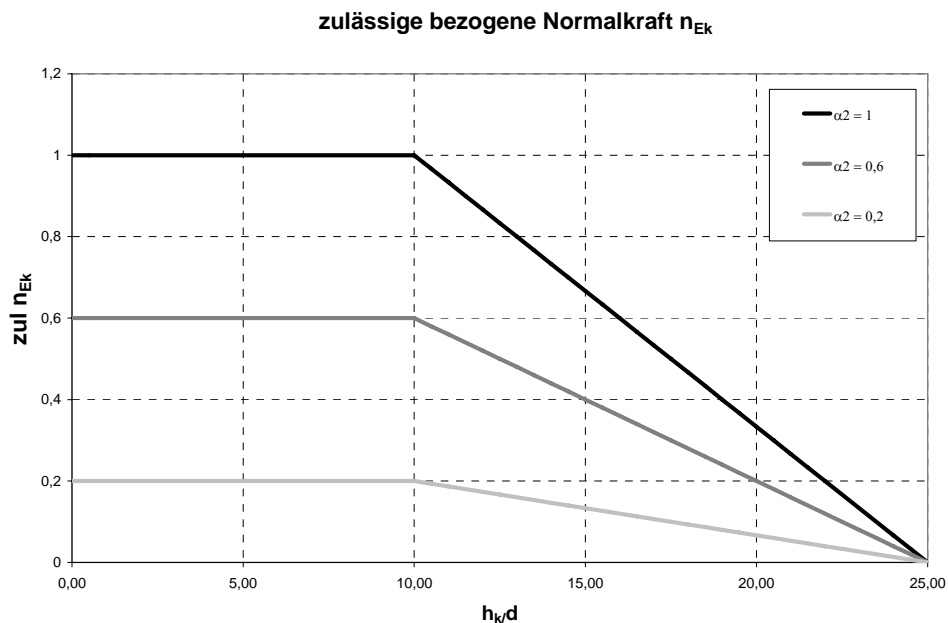
Mit  $n_{Ek} = 3,14 \cdot \frac{N_{Ek}}{b \cdot d \cdot f_k} \cdot k_0$  kann ein bezogener Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2/n_{Ek}$  definiert werden, der

in Abbildung 3 dargestellt ist.



**Abbildung 3: Bezogener Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2/n_{Ek}$  in Abhängigkeit der Schlankheit  $\lambda = h_k/d$**

Der bezogene Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2/n_{Ek}$  ist eigentlich nichts anderes als der Kehrwert des Traglastabminderungsfaktors  $k_2$  des vereinfachten Verfahrens nach DIN 1053-1: 1996. Man kann die bezogene Normalkraft in Abhängigkeit der Schlankheit auch als zulässige bezogene Normalkraft angeben. In Abbildung 4 ist für die drei verschiedenen Ausnutzungsgrade  $\alpha_2$ , die in den Tabellen der DIN 4102-4 verwendet werden, jeweils die bezogene zulässige Normalkraft dargestellt.



**Abbildung 4:** Zulässige bezogene Normalkraft für verschiedene Ausnutzungsgrade  $\alpha_2$  in Abhängigkeit der Schlankheit  $\lambda = h_k/d$

Es bleibt festzuhalten, dass diese Bestimmungsgleichungen als Übergangslösung zu betrachten sind, die momentan nur gewährleisten, dass formal eine Anwendung der Mauerwerksnorm auf dem semi-probabilistischen Sicherheitskonzept ermöglicht wird. Insgesamt gesehen können die Tragfähigkeitspotenziale, die in DIN 1053-100 enthalten sind, bei Brandschutzanforderungen derzeit nur bedingt realisiert werden.

Für Wände mit Wanddicken  $d \leq 17,5$  cm wurde als Grundlage für weitere Diskussionen eine weitere Modifizierung des Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2$  vorgestellt. Begründung ist, dass bei der Bestimmung der zulässigen Beanspruchungen, die der aufgetragenen Last in den Brandversuchen entspricht, von einer Abminderung der Knicklänge mit  $\beta = 0,75$  Gebrauch gemacht wurde. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens konnte jedoch festgestellt werden, dass unter einer wirklichkeitsnahen Berücksichtigung der realen Lagerungsbedingungen im Brandversuch ein Knicklängenbeiwert von  $\beta = 0,85$  vorhanden ist und somit die Wand mit einer zu hoch gewählten Last geprüft wurde, wodurch sich der zulässige Ausnutzungsfaktor erhöht. Die Nutzung dieser Tragreserve muss jedoch noch durch weitere Forschungsarbeiten abgesichert werden.

Weitere Forschungsaktivitäten sind zudem notwendig, bei denen Ausnutzungsfaktoren  $\alpha_2$  bezogen auf die Tragfähigkeiten nach DIN 1053-100 definiert werden, die das Potenzial der größeren Tragfähigkeiten nach DIN 1053-100 auch unter Brandeinwirkung ausschöpfen. Dazu sollten z.B. die umfangreich vorliegenden Ergebnisse von Brandversuchen gezielt auf mögliche Reserven hin analysiert und hieraus verbesserte Ausnutzungsfaktoren  $\alpha_2$  entwickelt werden. Gleichzeitig kann so zielgerichtet festgestellt werden, bei welchen Stein-Mörtel Kombinationen zusätzliche Brandversuche notwendig sind.

Weiterhin werden bisher im Brandversuch keine Lastexzentrizitäten aufgebracht und sind damit versuchstechnisch bisher eigentlich nicht abgedeckt. Für Bauteile, die einer horizontalen Belastung ausgesetzt sind (z.B. Kellerwand, Außenwand) sind damit die momentan vorliegenden Regelungen nicht ausreichend und sollten daher dringend überprüft werden.

# 1 Einleitung

## 1.1 Notwendigkeit des Forschungsvorhabens

Die derzeit gültige normative Grundlage zur Bemessung einer Mauerwerkswand unter Brandbeanspruchung enthält DIN 4102-4: 1994 [1]. Im Allgemeinen kann der Nachweis einer Mauerwerkswand mit den dort angegebenen Tabellenwerken in Abhängigkeit des Ausnutzungsfaktors  $\alpha_2$  erfolgen. Dabei sieht DIN 4102-4: 1994 eine Bestimmung des Ausnutzungsfaktors  $\alpha_2$  nach DIN 1053-1 vor (vgl. DIN 4102: 1994 Abschnitt 4.5.2.2), wobei jedoch nicht explizit auf die der Ermittlung der zulässigen Druckspannungen zu Grunde liegende Ausgabe von DIN 1053-1 verwiesen wird.

Weiterhin stellt sich für den Anwender der Norm die Frage, wie bei Anwendung des „genaueren“ Verfahrens bei der „Kaltbemessung“ nach DIN 1053-1 [2][3], Abschnitt 7, der Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2$  zu ermitteln ist. Werden die zulässigen Druckspannung zur Berechnung des Ausnutzungsfaktors  $\alpha_2$  nach dem „vereinfachten“ Verfahren nach DIN 1053-1, Abschnitt 6 berechnet, so können die bei der „Kaltbemessung“ nach dem „genaueren“ Verfahren erzielten höheren zulässigen Traglasten bei größeren Wandschlankheiten nicht ausgenutzt werden. Wird der Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2$  dagegen mit den nach dem „genaueren“ Verfahren berechneten zulässigen Spannungen ermittelt, so sind mögliche Sicherheitslücken nicht auszuschließen, da die in Versuchen bestimmten Ausnutzungsfaktoren zur Erstellung der Tabellen in DIN 4102-4 auf Basis der zulässigen Druckspannungen nach dem „vereinfachten“ Verfahren berechnet wurden.

Mit der bevorstehenden Einführung der DIN 1053-100 [4], die die Berechnung von Mauerwerk auf Grundlage des semi-probabilistischen Sicherheitskonzeptes regelt, kommt eine weitere Problemstellung hinzu: Mit der Umstellung des Sicherheitskonzeptes auf Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungs- und Widerstandsseite entfällt der Begriff der zulässigen Beanspruchung, die von einem Bauteil im rechnerischen Bruchzustand, dividiert durch einen globalen Sicherheitsbeiwert, aufgenommen werden kann. Dieser Begriff bildete jedoch den Bezugswert für die Bestimmung des Ausnutzungsfaktors  $\alpha_2$ .

Diese Problematik tritt ebenfalls bei der brandschutztechnischen Bemessung anderer Baustoffe auf (z.B. Betonbau). Deshalb wurde als Übergangslösung DIN 4102-22 [5] eingeführt, die eine kombinierte Anwendung der Bemessungsnormen nach dem Teilsicherheitskonzept mit

DIN 4102-4 [1] ermöglicht. Dies gilt jedoch nicht für den Mauerwerksbau. In Abschnitt 7 von DIN 4102-22 [2] wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass eine brandschutztechnische Klassifizierung bisher nur auf Grundlage von DIN 1053-1: 1996 [3] möglich ist. Die Tragfähigkeitspotenziale der neuen Verfahren für die kalte Bemessung, die in DIN 1053-100 [4] verankert sind, können danach noch nicht ausgeschöpft werden, wenn eine Bemessung für den Brandfall erforderlich ist.

## 1.2 Vorgehensweise und Ziel des Forschungsvorhabens

Zu Beginn des Forschungsvorhabens wird ein Überblick über die historische Entwicklung von DIN 1053 sowie DIN 4102 gegeben. Der für die Bemessung von tragenden Mauerwerkswänden wesentliche Inhalt der Normen wird kurz dargestellt bzw. auf Veränderungen und Neuerungen der Normentexte bezüglich der vorigen Ausgabe hingewiesen. Dabei wird herausgearbeitet, auf welche Fassung der DIN 1053 sich die jeweilige Ausgabe der DIN 4102 inhaltlich bezieht, und an welchen Schnittstellen möglicherweise Ungereimtheiten auftreten.

Diese Untersuchungen dienen als Grundlage für die Analyse, in wieweit bei Anwendung des genaueren Berechnungsverfahrens nach DIN 1053-Teil 1, Abschnitt 7, abweichende Ausnutzungsgrade  $\alpha_2$  durch die vorhandenen Tabellen zur Klassifizierung von tragenden Mauerwerkswänden nach DIN 4102-4: 1994 [1] abgedeckt sind. Dazu werden die Differenzen einer „kalten“ Bemessung bei Anwendung des „vereinfachten“ und des „genaueren“ Verfahrens nach DIN 1053-1, 1996 [3], DIN 1053-2: 1984 [6] sowie DIN 1053-100: 2004 [4] herausgearbeitet. Dabei werden die einzelnen Verfahren hinsichtlich verschiedener Eingangsparameter wie beispielsweise der Mauerwerksart, der Schlankheit und der Lastexzentrizität untersucht. Zur Vergleichbarkeit werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Verfahren in bezogenen Größen dargestellt.

Um eine sinnvolle Anwendung von DIN 1053-100 [4] in Verbindung mit DIN 4102-22 [5] und DIN 4102-4 [1] zu ermöglichen, wird abschließend ein Vorschlag zur Ermittlung des Ausnutzungsfaktors  $\alpha_2$  entwickelt, der unabhängig vom Konzept der Kaltbemessung eine Klassifizierung von Mauerwerkswänden in eine bestimmte Feuerwiderstandsklasse auf Grundlage der Tabellenwerke von DIN 4102-4 [1] ermöglicht.



## 2 Normative Entwicklung von DIN 1053 und DIN 4102

### 2.1 DIN 1053 – Mauerwerk: Berechnung und Ausführung

#### 2.1.1 Allgemeines

In den nachfolgenden Ausführungen wird ein Einblick in die historische Entwicklung von DIN 1053 gegeben. Die für die Bemessung von druckbeanspruchten Mauerwerkswänden relevanten Inhalte der jeweiligen Normenausgabe werden kurz wiedergeben.

#### 2.1.2 DIN 1053: 1937 [7]

DIN 1053: 1937 [7] enthielt für Mauerwerk aus natürlichen Steinen Tabellen, denen zulässige Druckspannungen in Abhängigkeit der Steinart und der Mörtelgruppe (Kalkmörtel, Kalkzementmörtel, Zementmörtel) entnommen werden konnten. Bei Pfeilern (Schlankheit  $h/d$  in jeder Richtung größer als 4) hatte außerdem die Schlankheit Einfluss auf die zulässige Druckspannung, wobei eine Schlankheit größer 12 nicht ausgeführt werden durfte.

Weiterhin konnten die angegebenen Werte beim Nachweis unter Belastungsfall 2 um 10% erhöht werden. Gegenüber Belastungsfall 1, der die ungünstigste Wirkung von ständiger Last überlagert mit der Verkehrslast einschließlich Schneelast umfasste, waren im Belastungsfall 2 zusätzlich die Windbelastung, Temperatureinwirkungen sowie Bremskräfte von Kränen zu berücksichtigen.

Die in den Tabellen angegebenen Druckspannungen durften bei Wänden mit Wandstärken von  $\frac{1}{2}$  und 1 Steindicke nicht ausgenutzt werden. Die maximale Druckbeanspruchung dieser Wände betrug 11 oder 15  $\text{kg/cm}^2$  unter Beachtung besonderer örtlicher Bestimmungen der Baupolizei.

#### 2.1.3 DIN 1053: 1952 [8]

Die zulässigen Druckspannungen waren in dieser Normenversion in Abhängigkeit der Steinart, der Mörtelgruppe und der Schlankheit in unterschiedlichen Tabellen definiert. Dabei differenzierte die Norm bei Mauerwerk aus künstlichen Steinen zwischen ausgesteiften Wänden mit Dicken größer 24 cm sowie Pfeilern und Wänden mit einer Schlankheit kleiner 10, Pfeilern mit einer Schlankheit größer 10 sowie nicht ausgesteiften Wänden, Wänden mit Dicken kleiner 24 cm und Innenschalen von Wänden mit durchgehenden Luftschichten. Die Schlankheit beschrieb das Verhältnis  $h/d$ , wobei  $h$  die Höhe zwischen den in gleicher Richtung wirk-

samen waagerechten Versteifungen und  $d$  die dieser Höhe zugeordnete Wanddicke bzw. – breite bedeutete.

Bei exzentrischer Belastung war bei Bestimmung der Druckspannungen die Berücksichtigung der Zugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge unzulässig. Außerdem war eine rechnerisch klaffende Fuge nur bis zur Querschnittsachse zulässig, d.h. die Ausmitte der resultierenden Kraft durfte bei Rechteckquerschnitten nicht mehr als  $1/3 d$  betragen.

#### **2.1.4 DIN 1053: 1962 [9]**

In die folgende Fassung von DIN 1053 aus dem Jahr 1962 wurden keine signifikanten Änderungen eingearbeitet. Sie stellte gemäß dem Beiblatt „Mauerwerk – Berechnung und Ausführung – Erläuterungen“ lediglich einen Neudruck der Ausgabe DIN 1053: 1952 dar. Zum einen waren die Kalksandsteine in die Bemessungstabellen detaillierter aufgenommen worden. Zum anderen enthielt die Neuausgabe gemäß dem Beiblatt keine Bindung von Wanddicken an Geschosszahlen mehr. Vorgaben für Mindestabmessungen lagen weiterhin vor.

#### **2.1.5 DIN 1053: 1974 [10]**

Zur Ermittlung der zulässigen Druckspannungen war zunächst in Abhängigkeit der Steifigkeitsklasse und der Mörtelgruppe der Grundwert der zulässigen Druckspannung Tabelle 10 von DIN 1053: 1974 zu entnehmen. Dieser Grundwert musste anschließend je nach Schlankheit bzw. Ersatzschlankheit gemäß Tabelle 11 von DIN 1053: 1974 (siehe Tabelle 2.2) korrigiert werden, wobei die Schlankheit bei rechteckigem oder quadratischem Querschnitt definiert war zu

$$\lambda = \frac{h}{d} \qquad \text{Gl. 2-1}$$

mit

$\lambda$  die Schlankheit

$h$  der Abstand der waagerechten Halterungen

$d$  die Mauerwerksdicke

Außerdem war für Schlankheiten  $> 14$  nur eine zentrische Belastung zulässig. Die in der DIN angegebenen Ersatzschlankheiten ersetzen eine genaue Bestimmung der Bauteilschlankheit nach Gl. 2-1 (siehe Tabelle 2.1)

**Tabelle 2.1: Ersatzschlankheiten nach DIN 1053: 1974 [10]**

Bauteil	Ersatzschlankheit
Wände mit einer Dicke $\geq 24$ cm	10
Innenwände mit einer Dicke von 17,5 cm ohne Öffnung, Geschosshöhe $\leq 2,75$ m	10
Innenwände mit einer Dicke von 17,5 cm mit Öffnung	12
Innenwände mit einer Dicke von 11,5 cm	12
Innenschalen zweischaliger Außenwände mit Dicken von 17,5 cm, Geschosshöhe $\leq 2,75$ m	12
Innenschalen zweischaliger Außenwände mit Dicken von 17,5 cm, Geschosshöhe $\geq 2,75$ m	14
Innenschalen zweischaliger Außenwände mit Dicken von 11,5 cm	14
Zweischalige Trennwände	12

**Tabelle 2.2: Zulässige Druckspannungen von Mauerwerk aus künstlichen Steinen in MN/m<sup>2</sup> gemäß DIN 1053: 1974 [10]**

Schlankheit bzw. Ersatz- schlankheit	Grundwerte der zulässigen Druckspannungen in MN/m <sup>2</sup>														
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,9	2,2	2,5	3,0
10	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,9	2,2	2,5	3,0
12			0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1	1,3	1,5	1,7	2,0
14				0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,4
16						0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,9
18									0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,7
20													0,3	0,3	0,5

Aufgenommen wurden auch Angaben über die Verformungseigenschaften des Mauerwerks wie Elastizitätsmodul, Endkriechzahl, Endschwindmaß und Temperaturdehnzahl.

### 2.1.6 DIN 1053: 1984 [6]

Die in DIN 1053-2: 1984 [6], Abschnitt 6 und 7 enthaltenen Angaben zur Berechnung und Bemessung von Mauerwerk beinhalten gegenüber DIN 1053: 1974 [10] erweiterte Berechnungsverfahren. Neben dem in DIN 1053: 1984-2 [6] definierten Mauerwerk nach Eignungsprüfung konnte dieses „genauere“ Verfahren auch zur Berechnung und Bemessung von Rezeptmauerwerk RM nach Anhang B von DIN 1053: 1984-2 [6] angewendet werden. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um das genauere Verfahren, welches derzeit noch in DIN 1053-1: 1996 [3] seine Gültigkeit hat. Allerdings war eine Erhöhung der Randspannung nach DIN 1053: 1984-2 [6] im Gegensatz zur DIN 1053-1: 1996 [3] nicht zugelassen.

Mauerwerk nach Eignungsprüfung bezeichnet Mauerwerk, das auf Grund von Eignungsprüfungen an Mauerwerkskörpern anhand vorhandener Druckfestigkeiten in Mauerwerksfestigkeitsklassen eingeteilt wird. In Abhängigkeit der Mindestdruckfestigkeit wird neben der Mauerwerksfestigkeitsklasse der Wert der Nennfestigkeit des Mauerwerks  $\beta_M$  angegeben. Zusätzlich sind die Baustoffe besonders zu überwachen. Die Durchführung von Eignungsprüfungen war notwendig

- bei der Einstufungsprüfung in eine Mauerwerksfestigkeitsklasse
- bei Baustellenmörtel vor Beginn jeder Baustelle, sofern keine Ergebnisse von bereits durchgeführten Bauobjekten mit Mörtel gleicher Zusammensetzung vorlagen
- zur Feststellung der Eignung von Werkmörtel sowie bei Änderungen in seiner Zusammensetzung

Der Begriff Rezeptmauerwerk nach DIN 1053-2: 1984 [6], Anhang B definiert Mauerwerk, das nach Steinfestigkeitsklassen und Mörtelgruppen in Mauerwerksfestigkeitsklassen eingestuft werden kann. In Abhängigkeit der Mauerwerksfestigkeitsklasse gibt die im Anhang B der Norm enthaltene Tabelle Rechenwerte der Druckfestigkeitsklasse  $\beta_R$  vor. Die Umrechnung der Nennfestigkeit  $\beta_M$  in den Rechenwert der Druckfestigkeit  $\beta_R$  erfolgt dabei nach den nachstehend genannten Gleichungen (vgl. [11]). Abbildung 2.1 veranschaulicht den Zusammenhang. Der Faktor 0,85 berücksichtigt Langzeiteinflüsse. Nach Kirtschig [11] wurde ab Mauerwerksfestigkeitsklasse 9 ein zusätzliches Sicherheitselement für hochfeste Mauersteine eingeführt.

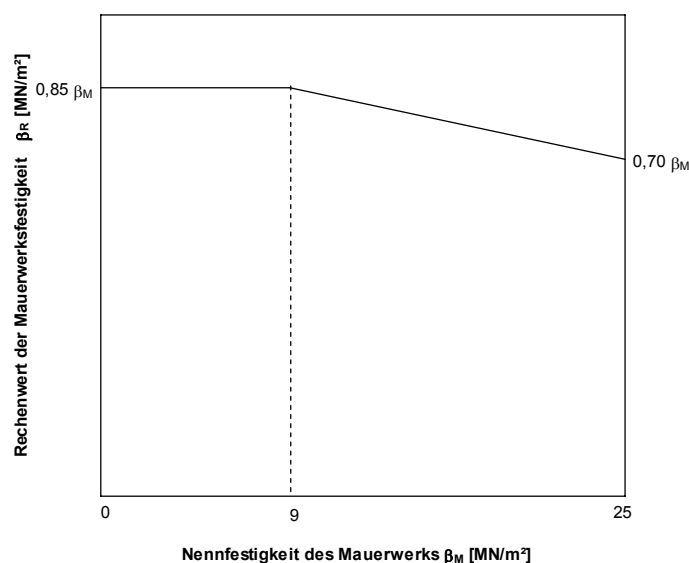


Abbildung 2.1: Beziehung zwischen Nennfestigkeit des Mauerwerks  $\beta_M$  und dem Rechenwert der Mauerwerksfestigkeit  $\beta_R$  nach DIN 1053 Teil 2 (aus [11])

$$\beta_R = 0,85 \cdot \beta_M \quad \text{für } \beta_M \leq 9 \text{ N/mm}^2 \quad \text{Gl. 2-2}$$

$$\beta_R = \left[ 0,85 - \frac{0,15}{16} (\beta_M - 9) \right] \cdot \beta_M \quad \text{für } 9 < \beta_M \leq 25 \text{ N/mm}^2 \quad \text{Gl. 2-3}$$

Im Vergleich zu DIN 1053: 1974 [10] wurde bei der Berechnung der Schlankheit die Geschosshöhe durch die Knicklänge ersetzt, um die aussteifende Wirkung von Decken und Querwänden zu nutzen. Die Knicklänge der Wand war nach DIN 1053-2: 1984 [6] je nach Lagerungsart der Wand in Abhängigkeit der vorhandenen aussteifenden Querwände sowie vorhandener Öffnungen zu bestimmen.

Unterschieden wurden frei stehende, zweiseitig, dreiseitig und vierseitig gehaltene Wände. Die untenstehende Tabelle enthält Annahmen zur Reduzierung der Knicklänge zweiseitig gehaltener Wände mit flächig aufgelagerten Massivdecken.

Bei Wanddicken  $\leq 17,5$  cm durfte ohne Nachweis der Abminderungsbeiwert zur Berechnung der Knicklänge mit  $\beta = 0,75$  angenommen werden.

**Tabelle 2.3: Reduzierung der Knicklänge zweiseitig gehaltener Wände mit flächig aufgelagerten Massivdecken (DIN 1053-2: 1984 [6], Tabelle 5)**

Wanddicke d cm	Erforderliche Auflagertiefe a der Decke auf der Wand
< 24	d
$\geq 24$ $\leq 30$	$\geq 3/4$ d
> 30	$\geq 2/4$ d
Planmäßige Ausmitte e <sup>1)</sup> der Last in halber Geschosshöhe (für alle Wanddicken)	Reduzierte Knicklänge h <sub>k</sub> <sup>2)</sup>
$\leq d/6$	$\beta \cdot h_s$
d/3	1,00 · h <sub>s</sub>
<sup>1)</sup> Das heißt Ausmitte ohne Berücksichtigung von f <sub>1</sub> und f <sub>2</sub> jedoch gegebenenfalls auch infolge Wind <sup>2)</sup> Zwischenwerte dürfen geradlinig eingeschaltet werden	

Der Spannungsnachweis war unter zentrischer und exzentrischer Druckbeanspruchung auf der Grundlage einer linearen Spannungsverteilung und ebenbleibender Querschnitte zu führen. Dabei durfte die aus den  $\gamma$ -fachen Lasten resultierende maximale Druckspannung den Re-

chenwert der Druckfestigkeit  $\beta_R$  nicht überschreiten. Nur im Fall der zweiachsigen Ausmitte durfte der Rechenwert  $\beta_R$  um 20% erhöht werden.

Beim Nachweis der Knicksicherheit waren neben der planmäßigen Ausmitte  $e$  noch die ungewollte Ausmitte  $f_I$ , der Einfluss des Kriechens sowie die Verformungen nach Theorie II. Ordnung zu berücksichtigen. Dazu konnte folgende Approximationsgleichung nach Mann [12] angewendet werden, die für Schlankheiten  $\lambda \leq 25$  gültig ist:

$$f = f_1 + f_2 = h_k \cdot \lambda \cdot \frac{1+m}{1800} \quad \text{Gl. 2-4}$$

darin ist

$\lambda$   $h_k/d$  die Schlankheit der Wand

$h_k$  die Knicklänge

$m$   $m = 6 \cdot e / d$

### 2.1.7 DIN 1053-1: 1990 [2]

Die Neufassung von DIN 1053-1: 1990 [2] wurde als Ersatz für DIN 1053: 1974 [10] eingeführt und enthält für Rezeptmauerwerk eine Berechnung nach dem „vereinfachten“ Verfahren sowie Vorgaben zur Ermittlung des Rechenwertes  $\beta_R$  zur Anwendung des „genaueren“ Verfahrens nach DIN 1053-2: 1984 [6].

Das „vereinfachte“ Bemessungsverfahren basiert auf der Abminderung eines Grundwertes der zulässigen Druckspannung  $\sigma_0$  und dem anschließenden Vergleich mit der einwirkenden Druckspannung. Der Grundwert der zulässigen Druckspannung  $\sigma_0$  kann Tabellen entnommen werden. Der mit dem Grundwert zu multiplizierende Abminderungsfaktor berücksichtigt in drei unterschiedlichen Faktoren den Einfluss von Pfeilern und kurzen Wänden ( $k_1$ ), die Traglastminderung infolge des Deckendrehwinkels bei Endauflagerung von Decken ( $k_3$ ) sowie die Traglastminderung resultierend aus einer Knickgefahr ( $k_2$ ). Ebenso sind Windlasten auf Außenwände und ungewollte Exzentrizitäten beim Knicknachweis im Sicherheitsabstand der zulässigen Druckspannungen inbegriffen.

War der Nachweis nach dem „genaueren“ Verfahren nach DIN 1053-2: 1984 [6] zu führen, so mussten die Rechenwerte  $\beta_R$  der Druckfestigkeit von Mauerwerk aus dem Grundwert der zulässigen Druckspannung berechnet werden.

$$\beta_R = 2,67 \cdot \sigma_0 \quad \text{Gl. 2-5}$$

Der Faktor von 2,67, mit dem der Grundwert der zulässigen Druckspannung  $\sigma_0$  zu multiplizieren war, ergab sich aus der Umrechnung von einer Schlankheit 10 auf die theoretische Schlankheit 0 mit dem Wert 1,33 sowie einem Sicherheitsfaktor von 2,0. Der Elastizitätsmodul konnte mit  $3000 \cdot \sigma_0$  ermittelt werden.

Unabhängig von der Bemessungsvariante war die Knicklänge der Wand wie nach DIN 1053-2: 1984 [6] je nach der Lagerungsart („zweiseitig gehalten“, „dreiseitig gehalten“ oder „vierseitig gehalten“) in Abhängigkeit der vorhandenen aussteifenden Querwände sowie vorhandener Öffnungen zu bestimmen. Vereinfacht durften die Abminderungsbeiwerte  $\beta$  zur Berücksichtigung einer Einspannwirkung der Wand in die Decke bei zweiseitig gehaltenen Wänden entsprechend der folgenden Tabelle angenommen werden.

**Tabelle 2.4: Abminderungsbeiwert  $\beta$  zur vereinfachten Bestimmung der Knicklänge bei zweiseitig gehaltenen Mauerwerkswänden nach DIN 1053-1: 1990 [2]**

Wanddicke d [mm]	$\beta$
$\leq 175$	0,75
$175 \leq d \leq 250$	0,9
$\geq 250$	1,00

### 2.1.8 DIN 1053-1: 1996 [3]

In der Neufassung von DIN 1053-1: 1996 [3] wurden sowohl die Berechnungsgrundlagen nach DIN 1053-1: 1990 [2] als auch das erweiterte Verfahren zur Bemessung von Rezeptmauerwerk nach DIN 1053-2: 1984 [6] aufgenommen.

Bei einem Nachweis nach dem „genaueren“ Verfahren wurde gegenüber DIN 1053-2: 1984 [6] bei exzentrischer Beanspruchung im Bruchzustand der Wert der zulässigen Randspannung  $\sigma_R$  auf  $4/3 \cdot \beta_R$  angehoben, um ein plastisches Verformungsverhalten zu berücksichtigen. Die mittlere Spannung  $\sigma_m$  durfte den Wert  $\beta_R$  nicht überschreiten. Weiterhin waren die vorhandenen Spannungen unter  $\gamma$ -fachen Lasten zu berechnen. Diese auf den ersten Blick kleine Ergänzung stellt allerdings eine signifikante Steigerung der Tragfähigkeit druckbelasteter Mauerwerkswände dar (siehe auch Kap. 3).

### 2.1.9 DIN 1053-100: 2004 [4]

Im Zuge der Normenreform vom globalen Sicherheitskonzept zum semi-probabilistischen Sicherheitskonzept im Bausektor erarbeitete der Normenausschuss Bauwesen (NABau), Fachbereich „Mauerwerksbau“, Arbeitsausschuss 06.30.00 „Rezept- und Ingenieurmauerwerk“ eine Mauerwerksnorm, die bezüglich der Bemessungsgrundlagen auf Basis des Teilsicherheitskonzeptes modifiziert wurde. Neben dieser grundlegenden Neuerung wurde anstelle einer linearen Spannungsverteilung der rechteckige Spannungsblock eingeführt. Außerdem enthält die Ausgabe DIN 1053-100: 2004 [4] analog zur vorigen Edition eine Bemessung nach dem „vereinfachten“ und dem „genaueren“ Verfahren. Die Voraussetzungen zur Anwendung des „vereinfachten“ Verfahrens gelten unverändert. Wesentliche Abweichungen zu den bisher gültigen Normen resultieren zudem aus der Tatsache, dass für die Abminderungsfaktoren zur Berücksichtigung des Knickens neue Beziehungen angegeben sind, die insbesondere für große Schlankheiten zu höheren Tragfähigkeiten führen als bei einer Bemessung nach den älteren Normen.

Im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist der Bemessungswert der Einwirkung  $E_d$  dem Bemessungswert des Tragwiderstandes  $R_d$  gegenüberzustellen. Dabei ergibt sich  $E_d$  aus der charakteristischen Einwirkung  $E_k$  multipliziert mit einem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_F$  und der Bemessungswert des Widerstandes  $R_d$  aus dem charakteristischen Festigkeitswert  $f_k$  dividiert durch den entsprechenden Teilsicherheitsfaktor  $\gamma_M$ . Zusätzlich vermindert sich der Festigkeitswert auf Grund des Einflusses der Lastdauer, da die charakteristische Druckfestigkeit im Kurzzeitversuch bestimmt wird. Außerdem ist sie auf die theoretische Schlankheit Null bezogen. Anstelle der zulässigen Grundwerte der Druckspannung sind in DIN 1053-100 [4] die charakteristischen Werte der Druckfestigkeit  $f_k$  in Abhängigkeit der Steinfestigkeitsklasse und der Mörtelgruppe angegeben.

Im „vereinfachten“ Verfahren setzt sich die aufnehmbare Normalkraft aus den Faktoren Querschnittsfläche, dem Bemessungswert der Druckfestigkeit und einem Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung des Knickens zusammen, der wie im globalen Nachweisverfahren die Einflüsse aus Schlankheit und Lastexzentrizitäten implizit berücksichtigt.

Im Gegensatz dazu sind im genaueren Verfahren die auftretenden Exzentrizitäten explizit zu berücksichtigen. Sie gehen dann in den Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung des Knickens ein und reduzieren damit den Bemessungswert der aufnehmbaren Normalkraft. Die Unterschiede zwischen den beiden Verfahren werden in Kapitel 3 noch umfassend dargestellt.



## 2.2 DIN 4102: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen

### 2.2.1 Allgemeines

In der vorliegenden Arbeit wird auf die historische Entwicklung der brandschutztechnischen Nachweise im Mauerwerksbau eingegangen. Ein Überblick über die Grundlagen des Brandschutzes sowie eine umfassende Beschreibung vorhandener Ausführungsdetails ist in [12][14][15] enthalten.

### 2.2.2 DIN 4102: 1940 [16]

Mit Einführung der DIN 4102 zur Beurteilung der Widerstandsfähigkeit von Bauteilen im Brandfall durch den Reichsarbeitsminister wurden die Baustoffe und Bauteile entsprechend ihrer Eigenschaften in Anforderungsklassen eingeordnet. Dabei gliederten sich die Baustoffe in die Kategorien A.I (brennbar), A.II (schwer entflammbar) und A.III (nicht brennbar). Bei der Klassifizierung der Bauteile unterschied die Norm zwischen den Begriffen B.IV (feuerhemmend), B.V (feuerbeständig) und B.VI (hochfeuerbeständig). Die Anforderungen der einzelnen Zuordnungsgruppen aus der Fassung von 1940 enthält untenstehende Tabelle.

**Tabelle 2.5: Anforderungen an Baustoffe und Bauteile nach DIN 4102: 1940 [16]**

Begriff	Anforderungen
<b>Baustoffe</b>	
A.I (brennbar)	- brennen nach der Entflammung ohne zusätzliche Wärmezufuhr
A.II (schwer entflammbar)	- nur schwer zur Entflammung zu bringen - zusätzliche Wärmezufuhr nötig - geringe Abbrenngeschwindigkeit - Stoffe, die ohne Flamme verkohlen
A.III (nicht brennbar)	- nicht entflammbar - kein Veraschen
<b>Bauteile</b>	
B.IV (feuerhemmend)	- bei einem Brandversuch während ½ Stunde nicht entflammbar - Durchgang des Feuers während ½ Stunde verhindert - tragende Bauteile dürfen während der Prüfzeit ihre Standfestigkeit und Tragfähigkeit unter der rechnerisch zulässigen Last nicht verlieren - bei einseitiger Brandbeanspruchung darf die dem Feuer abgewandte Seite nicht wärmer als 130° werden
B.V (feuerbeständig)	- müssen Brandversuchsdauer von 1 ½ Stunden und anschließendem Löschwasser standhalten - während dieser Zeit den Durchgang des Feuers verhindern - unter der rechnerisch zulässigen Last ihre Standfestigkeit und Tragfähigkeit behalten - bei einseitiger Brandbeanspruchung darf die dem Feuer abgewandte Seite keine höhere Temperatur als 130° erreichen
B.VI (hochfeuerbeständig)	- müssen den Anforderungen der feuerbeständigen Bauteile während einer Versuchsdauer von 3 Stunden genügen

Natürliche und künstliche Steine sowie Mörtel galten gemäß der Begriffsbestimmung nach Blatt 2 ohne einen zusätzlich zu erbringenden Nachweis als nicht brennbare Baustoffe.

Waren Bekleidungen der Steine mit einem mindestens 1,5 cm dicken Putz auf einem Putzträger vorgesehen, so wirkten diese feuerhemmend. Ebenso definierte die Norm Wände aus vollfugig gemauerten Steinen, auch mit Hohlräumen, sofern sie eine Dicke von mindestens 6 cm aufwiesen sowie Pfeiler aus Mauerwerk als feuerhemmend. Zu den feuerbeständigen Bauteilen zählten Wände mit einer Dicke von mindestens 12 cm aus genormten Steinen ohne Hohlräume oder aus Querlochziegeln, vollfugig in Kalkzementmörtel nach DIN 1053: 1937 gemauert. Bei einer Wanddicke von mindestens 12 cm waren vollfugig in Kalkzementmörtel gemauerte Langlochziegel oder zementgebundene Hohlsteine als feuerbeständiges Bauteil zugelassen. Falls Pfeiler aus Mauerwerk mindestens 38 cm stark ausgeführt waren, erfüllten sie gleichermaßen die Anforderungen an ein Bauteil, das dem Begriff feuerbeständig zuzuordnen war. Die Einordnung in die Gruppe der hochfeuerbeständigen Bauteile war mit einem Bauteil aus Mauerwerk nur durch einen Nachweis mittels Brandversuch möglich.

Blatt 3 der DIN 4102: 1940 beschrieb unter anderem die Prüfung zum Nachweis der Eigenschaften „feuerhemmend“, „feuerbeständig“ und „hochfeuerbeständig“, die es ermöglichte, Bauteile brandschutztechnisch zu beschreiben, die nicht in den Begriffsbestimmungen des zweiten Abschnitts der Norm aufgeführt waren. Zur Vereinheitlichung der Brandbeanspruchung während des Versuchs gab die Einheitstemperaturkurve (ETK) den Temperaturverlauf im Brandraum vor. Die Eigenschaft „feuerhemmend“ durfte z.B. einem Bauteil zugeschrieben werden, das unter Einhaltung der zulässigen Abweichungen der Normtemperatur nach 30 Minuten mit einer Brandtemperatur von 880 ° beansprucht wurde und dieser entsprechend den Forderungen Tabelle 2.4 standhielt. Für die Bezeichnungen „feuerbeständig“ und „hochfeuerbeständig“ galten entsprechende Parameter von 1025° nach 90 Minuten bzw. 1100° nach 180 Minuten. Die Versuchskörperabmessungen von tragenden Wänden und Zwischenwänden sollten etwa 2 m x 2 m betragen. Stützen und Pfeiler waren mindestens mit einer Höhe von 3 m für den Versuch vorzusehen. Die Beanspruchung durch den Einsatz von Löschwasser nach der Brandbelastung betrug 3 Minuten bei einem Druck von 2 kg/cm<sup>2</sup> aus einer Entfernung von ca. 3 m.

### 2.2.3 DIN 4102:1965 [17]

Mit Einführung der DIN 4102: 1965 wurde der Begriff der Feuerwiderstandsklassen in die Norm aufgenommen. Die Differenzierung der Klassen erfolgte gemäß der nachstehenden Tabelle.

**Tabelle 2.6: Feuerwiderstandsklassen nach DIN 4102: 1965**

Feuerwiderstandsklasse	Feuerwiderstandsdauer [min]	Bauaufsichtliche Benennung
F 30	$\geq 30$	feuerhemmend
F 60	$\geq 60$	
F90	$\geq 90$	feuerbeständig
F120	$\geq 120$	
F180	$\geq 180$	hochfeuerbeständig

Die Feuerwiderstandsdauer in Minuten ist die Mindestdauer während der ein Bauteil nach der von der Norm geforderten Prüfung den vorgegebenen Anforderungen genügen muss. Weiterhin unterschied DIN 4102: 1965 zwischen raumabschließenden, tragenden und nicht tragenden Bauteilen.

Kriterien der raumabschließenden Wand waren unter anderem die Verhinderung des Feuerdurchtritts während 30 Minuten sowie das Durchdringen von entzündbaren Gasen, die ohne eine fremde Zündquelle allein weiter brennen. Außerdem durften sich raumabschließende Bauteile während des Brandversuches im Mittel um nicht mehr als  $140^\circ$  über die Anfangstemperatur des Probekörpers erwärmen und an keiner Messstelle um mehr als  $180^\circ$ . Tragende Bauteile zeichneten sich dadurch aus, dass sie unter ihrer zulässigen Gebrauchslast während des Brandversuchs nicht zusammenbrechen. Für nicht tragende Bauteile gilt dies für die Beanspruchung unter Eigenlast.

Neben der Einführung der genannten Begriffe, erfolgte eine Einteilung der Baustoffe in die nachstehend genannten Klassen:

- Klasse A: Nicht brennbare Baustoffe
- Klasse B: Brennbare Baustoffe
  - Klasse B1: Schwer entflammbare Baustoffe
  - Klasse B2: Normal entflammbare Baustoffe
  - Klasse B3: Leicht entflammbare Baustoffe

DIN 4102: 1965 sah den Nachweis der Feuerwiderstandsklasse ohne und mit Brandversuch vor, wobei der Nachweis ohne Brandversuch als erbracht galt, wenn das brandschutztechnisch zu bemessende Bauteil in Blatt 4 [18] („Einreihung in die Begriffe“) aufgeführt war.

Um die Bezeichnung „feuerbeständig“ (F90) tragen zu dürfen, mussten Wände nicht mehr 12 cm, sondern nur noch 11,5 cm dick aus Steinen ohne Hohlräume nach DIN 1053 oder aus Hochlochziegeln A nach DIN 105, vollfugig mit Mörtel nach DIN 1053 ausgeführt werden. Bei einer Wandstärke von 24,0 cm durften diese Wände auch aus Langlochziegeln oder Hochlochziegeln B nach DIN 105, Hohlblocksteinen nach DIN 18151, Kalksand-Lochsteinen oder –Hohlblocksteinen nach DIN 106 Blatt 1, vollfugig mit Mörtel nach DIN 1053 gemauert werden, um ohne weiteren Nachweis als feuerbeständig zu gelten. Der Begriff der Brandwand umfasste alle Wände aus nicht brennbaren Baustoffen nach DIN 1053, die mindestens eine Dicke von 24,0 cm aufwiesen.

War ein Nachweis mit Brandversuch zu erbringen, so wurden mindestens die normgerechte Durchführung von zwei Versuchen, aus denen das ungünstigere Ergebnis die Einordnung in eine Feuerwiderstandsklasse bestimmte. Im Gegensatz zur Fassung der Norm aus dem Jahre 1940, waren die tragenden Wände und Zwischenwände im Versuch mit den Abmessungen 2,0 m x 2,5 m (Breite x Höhe) herzustellen. Die Prüfkörperhöhe von Stützen und Pfeilern betrug weiterhin 3,0 m. Die Belastung tragender Bauteile war so zu bemessen, dass die gemäß anerkannten Bemessungsverfahren zulässigen Spannungen auftraten.

Außerdem musste bei raumabschließenden Wänden nach dem Brandversuch ein Festigkeitsversuch durchgeführt werden, bei dem das Bauteil dreimal an unterschiedlichen Stellen durch einen Kugelschlag beansprucht wurde. Dieser Versuch diente der Simulation von umfallenden Einrichtungsgegenständen und herabfallenden Bekleidungen auf die raumabschließende Wand.

#### **2.2.4 DIN 4102: 1970 [19]**

Gemäß der Klassifizierung der Bauteile nach Blatt 4 [19] der Norm Ausgabe 1970 galten Pfeiler aus Mauerwerk ohne gesonderten Nachweis zur Feuerwiderstandsklasse F 90, sofern ihre Dicke 36,5 cm anstatt 38,0 cm betrug. Des Weiteren wurden im Abschnitt „Sonderbauteile“ des Blattes 4 Ausführungen von Brandwänden ohne besonderen Nachweis genannt. Dazu zählten Mauerwerkswände aus Kalksandsteinen nach DIN 106, Hüttensteinen nach DIN 389, Voll- oder Hochlochziegeln nach DIN 105, Vollsteinen aus Leichtbeton nach DIN 18152 und Hohlblocksteinen aus Leichtbeton nach DIN 18151 mit Stein- oder Ziegel-Rohdichten von

mindestens  $1,21 \text{ kg/dm}^3$ , wenn sie mit einer Dicke von mindestens 24,0 cm nach DIN 1053 ausgeführt wurden und mit einem Mörtel der Mörtelgruppe II oder III vermauert waren. Zulässig waren ebenso vorgenannte Wände mit einer Stein- oder Ziegelrohddichte von mindestens  $0,7 \text{ kg/dm}^3$  mit einer Mindestdicke von 30,0 cm.

### **2.2.5 DIN 4102-2: 1977 [20]**

In DIN 4102-2: 1977 sind die Anforderungen und die Durchführung von Brandversuchen zur Klassifizierung von Bauteilen in eine bestimmte Feuerwiderstandsklasse geregelt, die heute noch Gültigkeit hat. Eine detailliertere Beschreibung der Durchführung von Brandversuchen ist in Kapitel 2.3 enthalten.

### **2.2.6 DIN 4102: 1981 [21] [22]**

DIN 4102: 1981 wurde gegenüber der Fassung DIN 4102: 1970 neu gegliedert und der Bereich der klassifizierten Bauteile und Baustoffe um viele Angaben erweitert.

Teil 4 [22] der Norm enthielt erstmals eine Zusammenstellung zur Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile in Tabellenform. Entsprechend der Zuordnung der Bauteile in die Kategorien „nicht tragende Wände“ und „tragende Wände“ sowie „Pfeiler“ waren für das brandschutztechnisch zu bemessende Bauteil Mindestwanddicken und Breiten je nach geforderter Feuerwiderstandsklasse den Tabellen der Norm zu entnehmen. Die erforderliche Mindestdicke ergab sich bei den nicht tragenden Wänden zudem aus der verwendeten Steinart, bei den tragenden Wänden und Pfeilern aus der vorhandenen Druckspannung. Mit Ausnahme von Wandbauplatten aus Gips und Pfeilern führte ein nach DIN 4102 ausgeführter Putz bei allen Bauteilen zur Verringerung der vorgeschriebenen Mindestwanddicken.

Zur Bemessung einer Brandwand enthielt DIN 4102-4 ebenfalls Vorgaben zur Ausführung als klassifiziertes Bauteil. Aufgenommen waren Wände aus Ziegelfertigbauteilen sowie Wände aus Mauerwerk. Untergliedert nach der Steinrohddichte war bei einer zulässigen Schlankheit nach DIN 1053 die erforderliche Mindestdicke von ein- und zweischaligem Mauerwerk angegeben.

Die Notwendigkeit der Durchführung von Versuchen zur Erfassung des Verhaltens der Baustoffe und Bauteile im Brandfall konnte durch die umfangreiche Erweiterung der Tabellen reduziert werden.

Ferner waren senkrecht zur Wandebene verlaufende Lochungen von Steinen oder Wandbauplatten nicht zulässig. Aussteifende Riegel und Stützen mussten mindestens derselben Feuer-

widerstandsklasse angehören wie die Wände, die sie aussteiften. Fugenanschlüsse waren normgerecht auszuführen.

In Abschnitt 4.4.1 der Norm wurde DIN 1053 Teil 1 als anzuwendende Mauerwerksnorm genannt. Dieser Normenverweis bezieht sich auf DIN 1053-1: 1974 (vgl. Abschnitt 2.1.5). In der Ausgabe von DIN 4102-4: 1981 sind lediglich Normen und Prüferfahrungen bis 1980 berücksichtigt und die Neuerungen der im Gelbdruck verabschiedeten Norm DIN 1053 Teil 1 (spätere Ausgabe DIN 1053-1: 1990, vgl. Abschnitt 2.1.7) wurden damals brandschutztechnisch noch nicht berücksichtigt. Für Ziegel und Kalksandsteine sowie Leichtbeton und Porenbeton wurden jeweils zulässige Spannungen als Bemessungswert bei tragenden Wänden und Pfeilern angegeben. Eine weitergehende Unterscheidung zwischen den einzelnen Baustoffarten wurde bewusst nicht vorgenommen. Des Weiteren lagen für folgende Typen von Mauerwerkswänden zum Zeitpunkt der Herausgabe von DIN 4102: 1981 keine bzw. zu wenige Erfahrungen vor:

- Wände mit exzentrischer Belastung mit ein- oder zweiachsiger Ausmitte
- Wände mit Schlankheiten  $> 20$
- Wände aus Eignungsmauerwerk (d.h. Wände nach DIN 1053-2 [6], die nicht nach Rezeptmauerwerk gemäß DIN 1053-2, Anhang B bemessen wurden, vgl. 2.1.6)
- Wände aus bewehrtem Mauerwerk

### **2.2.7 DIN 4102-4: 1994 [1]**

Auf der Grundlage von zahlreichen Versuchen wurden die Tabellen der klassifizierten Bauteile in DIN 4102-4 mit Herausgabe der Fassung DIN 4102: 1994 [1] umfangreich erweitert und differenzierter dargestellt. Die Eingangsgrößen zur Ermittlung der Mindestwanddicke wurden um die Art der Lochausbildung, den Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2$ , und die verwendete Mörtelart ergänzt. Die Unterscheidung nach den einzelnen Baustoffarten erfolgte, um das günstigere Brandverhalten einzelner Baustoffe zu berücksichtigen. Der Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2$  beschreibt das Verhältnis der vorhandenen Beanspruchung zu der zulässigen Beanspruchung nach dem vereinfachten Verfahren nach DIN 1053-1: 1990 bzw. dem genaueren Verfahren nach DIN 1053-2: 1984. Ferner werden planmäßige Lastexzentrizitäten bis  $e \leq 1/6 d$  abgedeckt. Bei größeren Lastexzentrizitäten wird eine konstruktive Zentrierung der Lasteinleitung vorgeschlagen. Des Weiteren besteht die Forderung bei Anwendung des genaueren Nachweisverfahrens nach DIN 1053-2 für die Ermittlung der zulässigen Spannung unter Berücksichtigung von Auswirkungen nach Theorie II. Ordnung stets eine konstante Lastexzentrizität über die

Wandhöhe anzusetzen ist. Nicht definiert ist jedoch, welche Lastexzentrizität nach Theorie I. Ordnung (Wandkopf, Wandmitte, Wandfuß) anzusetzen ist. Gemäß DIN 4102 hängt die Feuerwiderstandsdauer allgemein von folgenden Einflussgrößen ab:

- Brandbeanspruchung (ein – oder mehrseitig)
- verwendeter Baustoff oder Baustoffverbund
- Bauteilabmessungen (Querschnittsabmessungen, Schlankheit, Achsabstände usw.)
- Bauliche Durchbildung (Anschlüsse, Auflager, Fugen usw.)
- Statisches System (Lagerung, Lastabtragung, Einspannungen usw.)
- Ausnutzungsgrad der Festigkeiten der verwendeten Baustoffe infolge äußerer Lasten
- Anordnung von Bekleidungen (Ummantelungen, Putze, Unterdecken, usw.)

Die zu Grunde zu legenden Mauerwerksnormen zur Bestimmung des Ausnutzungsfaktors  $\alpha_2$  waren DIN 1053-1: 1990 [2] sowie DIN 1053-2: 1984[6], wobei jedoch nur Mauerwerkswände aus Rezeptmauerwerk mit den in DIN 4102-4 enthaltenen Tabellen brandschutztechnisch nachweisbar waren.

DIN 4102: 1994 besitzt für Mauerwerk, welches nach dem globalen Sicherheitskonzept von DIN 1053-1: 1996 bemessen wird, bis heute Gültigkeit. Besonders hervorzuheben ist jedoch, dass der in DIN 4102: 1994 angegebene Ausnutzungsfaktor sich ausschließlich auf die mit dem vereinfachten Verfahren berechneten zulässigen Spannungen bezieht. Dies bedeutet, dass die mit dem genaueren Verfahren nach DIN 1053-1: 1996 nutzbaren Tragfähigkeitspotenziale bei der kalten Bemessung nicht angesetzt werden können.

### **2.2.8 DIN 4102-22: 2004 [5]**

Da mit Einführung des semi-probabilistischen Sicherheitskonzeptes im Bauwesen die auf dem globalen Sicherheitskonzept basierenden Tabellenwerke der DIN 4102-4: 1994 [1] nicht mehr in ihrer bisherigen Form verwendet werden konnten, wurde als Übergangslösung DIN 4102-22 eingeführt. Für die Mehrzahl der Baustoffe konnte dadurch eine kombinierte Anwendung der Bemessungsnormen nach dem Teilsicherheitskonzept mit DIN 4102-4 ermöglicht werden. Dies gilt jedoch nicht für den Mauerwerksbau. In Abschnitt 7 von DIN 4102-22 [5] wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass eine brandschutztechnische Klassifizierung bisher nur auf Grundlage von DIN 1053-1: 1996 [3] möglich ist. Korrekterweise hätte hier auf DIN 1053 in der Fassung von 1990 verwiesen werden müssen. Aufgrund der DIN Vorschriften war es jedoch nur möglich, auf eine zu dieser Zeit gültige Norm zu verweisen.

## 2.3 Durchführung von Brandversuchen nach DIN 4102-2 [20]

### 2.3.1 Allgemeines

Brandversuche sind die wichtigste Grundlage der Tragwerksbemessung im Brandfall. Alle in DIN 4102-4 [1] angegebenen tabellarischen Daten stützen sich auf die Ergebnisse von Bauteilversuchen ab. Versuche liefern direkt die Standzeit des geprüften Bauteils unter einer bestimmten Kombination von Brandeinwirkung und äußerer Last. Neue Versuche sind immer dann erforderlich, wenn der Nachweis der Tragfähigkeit im Brandfall nicht durch eingeführte technische Baubestimmungen abgedeckt ist. Weiterhin stellen die tabellarischen Daten für die Mehrzahl der üblichen Bauteile eine weitgehend konservative Annahme dar. Durch Versuche kann deshalb im Einzelfall die erforderliche Traglast auch dann nachgewiesen werden, wenn die Anforderungen aus den tabellierten Daten nicht eingehalten sind.

Die Feuerwiderstandsklasse von Bauteilen muss auf der Grundlage von Prüfungen nach DIN 4102-2 nachgewiesen werden. Dabei waren mindestens zwei Prüfungen durchzuführen, von denen das ungünstigste Ergebnis für die Einstufung in eine Feuerwiderstandsklasse maßgebend war. Aufgrund der europäischen Harmonisierung der Prüfverfahren wurden ab Ende der 1980er Jahre die Probekörper variiert und ab Mitte der 1990er Jahre abweichend von DIN 4102-2 nur noch 1 Probekörper geprüft.

Ein Bauteil wird in eine Feuerwiderstandsklasse eingestuft, wenn der Probekörper bei einer Brandbeanspruchung nach der Einheitstemperaturzeitkurve über eine Prüfdauer, die mindestens der Feuerwiderstandsklasse entspricht, die Kriterien nach DIN 4102-2 [20] erfüllt.

Grundlage der Brandprüfungen ist die Einheitstemperaturzeitkurve (ETK), die idealisiert den Temperaturverlauf eines möglichen Brandes wiedergibt. Durch Verwendung der ETK werden einheitliche Prüfbedingungen geschaffen und damit eine gemeinsame Beurteilungsgrundlage für Bauteile unter Brandbeanspruchung ermöglicht. Für die überwiegende Anzahl der Brände liegt mit der ETK eine auf der sicheren Seite liegende Modellierung der Einwirkung Brand vor. Dies gilt insbesondere für den Nachweis von hohen Feuerwiderstandsdauern, da der in vielen Fällen real auftretende Temperaturrückgang bei hohen Branddauern durch die ETK nicht berücksichtigt wird.

Bei Bauteilversuchen sind zunächst die Materialeigenschaften bei 20° C an gesonderten Proben festzustellen. Sie werden für die Ermittlung der Traglast bei Raumtemperatur benötigt



und sollten den bei der statischen Berechnung zugrunde gelegten Materialeigenschaften entsprechen.

Allgemein muss beachtet werden, dass eine Prüfung die realen Bauteilbedingungen nur bedingt wiedergeben kann. Der Versuchsaufbau muss für die Übertragung der Versuchsergebnisse auf das untersuchte Bauteil oder Teiltragwerk geeignet sein. Bei druckbeanspruchten Bauteilen wie Stützen oder Wänden ist die möglichst wirklichkeitsnahe Abbildung der Lagerungsbedingungen und damit der Knicklängen sowie der Lastexzentrizitäten im Brandfall besonders wichtig. Diese Abweichungen liegen allerdings nicht zwangsläufig auf der sicheren Seite und sollten bei der Interpretation der Prüfergebnisse berücksichtigt werden. Des Weiteren bedeuten diese Schwierigkeiten bei der Quantifizierung der Unsicherheiten aber auch, dass ein festgelegter Genauigkeitsgrad des Prüfergebnisses nicht angegeben werden kann.

Eine Übertragung von Versuchsergebnissen auf Bauteile mit abweichenden Steinarten ist nicht zulässig, da das Hochtemperaturverhalten bei den verschiedenen Materialien sehr unterschiedlich ist. Zudem können Lochbild, Mörtelart etc. die Eigenschaften unter hohen Temperaturen zusätzlich beeinflussen.

Die Konzeption, Durchführung und Auswertung von Versuchen zum Tragverhalten unter Brandeinwirkung erfordert wegen der Vielzahl der Einflüsse große Erfahrung. In der Regel ist daher die Einschaltung anerkannter Prüfstellen erforderlich.

### **2.3.2 Anforderungen**

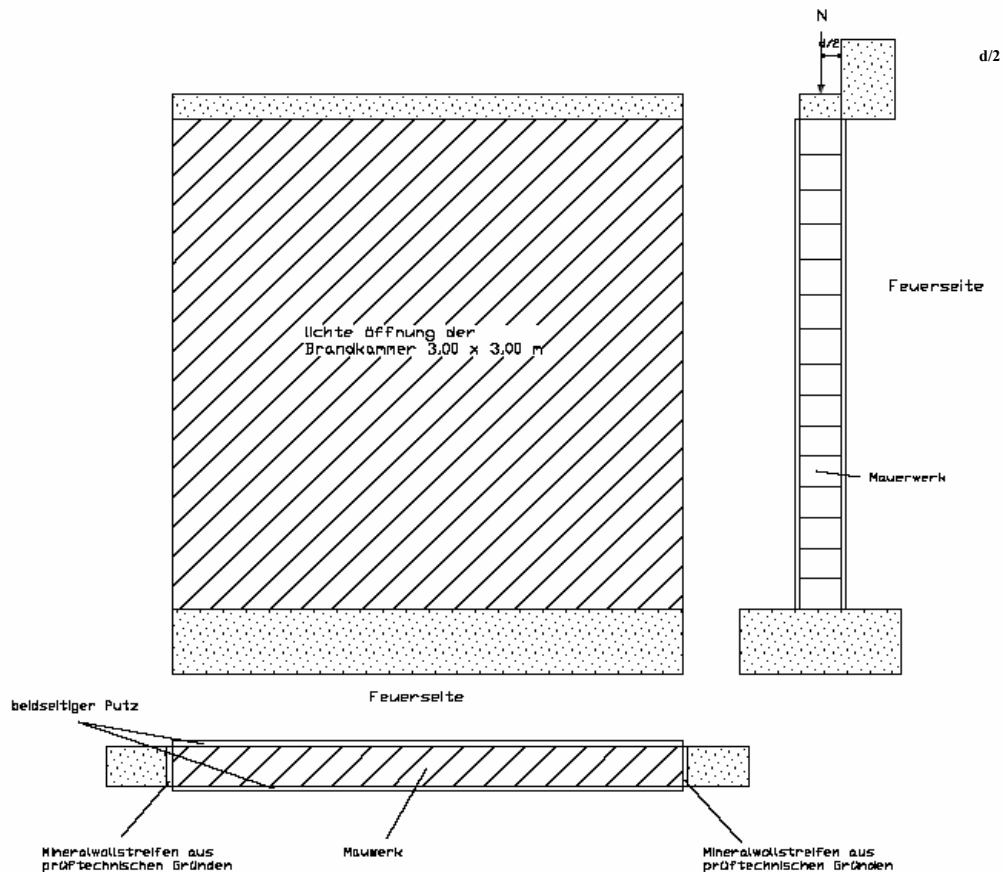
Die Anforderungen an Bauteile der Feuerwiderstandsklassen F30 bis F180 sind in Abschnitt 5 von DIN 4102-2 [20] angegeben. Sie betreffen im Wesentlichen neben dem Erhalt der Tragfähigkeit die Gewährleistung des Raumabschlusses (bei raumabschließenden Bauteilen), d.h. sie müssen den Durchgang des Feuers verhindern und dürfen sich an der Feuerabgewandten Seite im Mittel nicht um mehr als 140 K, maximal 180 K, erwärmen.

Soll ein Bauteil als Brandwand klassifiziert werden, sind noch weitere Anforderungen zu erfüllen. Diese sind in DIN 4102-3 angegeben.

### **2.3.3 Versuchsdurchführung**

Für die Durchführung von Brandprüfungen müssen Probekörper hergestellt werden, die in ihrer Gesamtkonstruktion der praktischen Anwendung entsprechen. Dabei gelten für Wände Mindestabmessungen von 2,0 m Breite und 2,5 m Höhe. Davon abweichend wurde Ende der 1970er Jahre die Probekörperabmessung auf  $B \times H = 3,0 \text{ m} \times 3,0 \text{ m}$  vergrößert. Heute sind

Abmessungen von  $B \times H = 3,0 \text{ m} \times 3,25 \text{ m}$  üblich, wobei die lichte Öffnung der Brandkammer Abmessungen von  $B \times H = 3,0 \text{ m} \times 3,0 \text{ m}$  aufweist. Bei konventionellen tragenden Wänden aus Mauerwerk wird die Prüflast zentrisch aufgebracht. Durch die Zentrierung der Lasteinleitung kann sich eine Verdrehung am Wandkopf jedoch ungehindert einstellen.



**Abbildung 2.2:** Schematische Darstellung eines Brandversuchaufbaus

Handelt es sich bei dem zu klassifizierenden Bauteil um eine Brandwand, ist die Belastung zusätzlich exzentrisch mit einer Exzentrizität von  $e/d = 1/6$  aufzubringen. Weiterhin wird zur Simulation der Auswirkung von herabfallenden Teilen unmittelbar vor Erreichen der angestrebten Feuerwiderstandsklasse eine dreimalige Stoßbeanspruchung durchgeführt. Die beiden ersten Stöße werden bei tragenden Wänden unter Volllast, der letzte nur unter Eigengewicht durchgeführt.

### 2.3.4 Festlegung der Prüflasten

Nach allen auszugsweise vorliegenden Versuchsprotokollen bzw. tabellarisch aufbereiteten Versuchsdaten wurde die in den Brandversuchen aufgebrachte Belastung stets auf Grundlage der maximal zulässigen Tragfähigkeit - bestimmt nach der jeweils gültigen Bemessungsnorm - aufgebracht. Die rechnerische Tragfähigkeit schlanker Mauerwerkswände hängt damit direkt von der berücksichtigten Wandschlankheit ab. Konnten mit dieser Prüflast, die der rechnerischen Tragfähigkeit der Wand nach dem vereinfachten Verfahren nach DIN 1053-1 entsprach, eine Einstufung in eine bestimmte Feuerwiderstandsklasse getroffen werden, ergibt sich daraus ein Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2 = 1,0$ . Legt man für die Bestimmung der maximalen Tragfähigkeit jedoch die unterschiedlichen Fassungen der DIN 1053-1 zugrunde, ergeben sich unterschiedliche Tragfähigkeiten. Anders ausgedrückt ist ein Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2 = 1,0$ , der z.B. nach DIN 1053-1: 1974 bestimmt wurde, nicht identisch mit einem Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2 = 1,0$ , der nach DIN 1053-1: 1990 ermittelt wurde.

Bei Einführung von DIN 4102-4: 1994 war DIN 1053-1: 1990 die gültige Fassung. Die Tabellenwerke in DIN 4102-4: 1994 mit ihren Ausnutzungsfaktoren wurden jedoch auch auf Grundlage von Brandversuchen, die vor Einführung von DIN 1053-1: 1990 durchgeführt wurden, aufgestellt. Man sollte zwar davon ausgehen, dass die Ausnutzungsfaktoren, die auf Grundlage älterer Normenfassungen bestimmt wurden, an das Tragfähigkeitsniveau von DIN 1053-1: 1990 angepasst wurden. Auszuschließen ist nach allen vorliegenden Informationen jedoch nicht, dass bei der Interpretation älterer Prüfergebnisse der zuvor beschriebene Sachverhalt ignoriert wurde. Dadurch besteht die Möglichkeit, dass in DIN 4102-4: 1994 z.T. falsche Ausnutzungsfaktoren angegeben sind.

### 2.3.5 Tragreserven durch realitätsnahen Ansatz der Knicklänge

In den Versuchsprotokollen zur Durchführung der Brandversuche sind i.d.R. Lagerungsbedingungen dokumentiert, die nicht mit denen übereinstimmen, die bei der Ermittlung der theoretischen Tragfähigkeit nach dem vereinfachten Verfahren von DIN 1053-1 zu berücksichtigen sind. Wie in Kapitel 2.3.3 dargestellt, wird die Belastung in den Brandversuchen zentriert eingeleitet, wodurch sich eine Verdrehung des Wandkopfes frei einstellen kann. Der Wandfuß steht vollflächig dem Prüfrahmen auf, hier kann bei entsprechender Auflast von einer Einspannung ausgegangen werden.

In den Brandversuchen nach 1990 wurden die zulässigen Tragfähigkeiten als Bezugsgröße jedoch unter Ansatz des abgeminderten Knicklängenbeiwertes  $\beta$  nach DIN 1053-1: 1990, Abschnitt 6.6.2 bestimmt. Diese Abminderung setzt allerdings eine Behinderung der Verdrehung des oberen und unteren Wandknotens voraus. Diese ist im Brandversuch am Kopf jedoch nicht gegeben. Damit liegt im Brandversuch tatsächlich ein größerer Knicklängenbeiwert  $\beta$  und damit eine geringere rechnerische Tragfähigkeit vor, als bei der Bestimmung der Prüflast angenommen. Als Konsequenz des größeren Knicklängenbeiwertes  $\beta$  und der damit verbundenen geringeren rechnerischen Tragfähigkeit als Bezugsgröße für die Ermittlung des Ausnutzungsfaktors  $\alpha_2$  ergibt sich, dass mit den bisher durchgeführten Brandversuchen Ausnutzungsfaktoren  $\alpha_2 > 1$  abgedeckt sind. Wie dieser Sachverhalt für die zukünftige Klassifizierung von Mauerwerkswänden nach DIN 4102-4 möglicherweise genutzt werden kann, ist Kapitel 5 zu entnehmen.

Um zu eruieren, in welchem Maße der bei der heißen Bemessung berücksichtigte Knicklängenbeiwert korrigiert werden kann, werden die Grundlagen, auf denen die Regelungen zur Knicklängenabminderung der Norm fußen, hier kurz vorgestellt. Sie werden zusammenfassend in Mann erläutert und basieren im Wesentlichen auf den Arbeiten von Gremmel [28], der in den 1970er Jahren Versuche zur Bestimmung der Knicklänge durchführte. Die grundlegenden Aspekte sind nachfolgend kurz zusammengefasst.

Im Allgemeinen werden die Lagerungsbedingungen eines Druckstabes über die Knicklänge  $h_k$  erfasst, so dass das statische System auf den Eulerfall 2 zurückgeführt werden kann. Mit der Annahme, dass die Wand nur zwischen den Deckenkonstruktionen ausknicken kann, ergibt sich daher:

$$h_k = h_s \quad \text{Gl. 2-6}$$

DIN 1053: 1974 (vgl. Abschnitt 2.1.5) enthielt diese Annahme und setzte die Knicklänge mit der Geschosshöhe gleich. Gremmel [28] führte im Rahmen seiner Dissertation in den Jahren 1973 – 1975 Versuche zur genaueren Bestimmung der Knicklänge durch, da eine Gelenkwirkung an den Wandenden immer dann nicht gegeben ist, wenn die aufliegende Decke die dazugehörige Wandverdrehung behindert. Folglich könnte in vielen Fällen eine reduzierte Knicklänge angesetzt werden. Die verwendete Versuchseinrichtung bestand aus einer zweifeldrigen Rahmenkonstruktion, die das Aufbringen von Deckenverdrehungen auf die geprüfte Wand ermöglichte, so dass eine realitätsnahe Beanspruchung der Wand vorlag [28]. Zur Er-

fassung der wirklichen Knicklängen wurden die horizontalen Wandverformungen während der Versuche mit Messuhren sowie einem Theodoliten gemessen und festgehalten. Der Abstand der Wendepunkte entspricht der wirklichen Knicklänge. Aus dem Verhältnis der Knicklänge zur Wandhöhe konnte somit die Reduzierung der Knicklänge infolge einer Randeinspannung experimentell ermittelt werden. Tabelle 2.7 gibt die Abminderungsfaktoren nach [28] wieder.

**Tabelle 2.7: Experimentell ermittelte Abminderung der Knicklänge nach Gremmel [28]**

	zentrisch		exzentrisch bzw. mit Deckenverdrehung	
	Streubereich	Mittelwert	Streubereich	Mittelwert
KSV	0,5 – 0,8	0,7	0,675 – 0,755	0,7
KSPE 25	0,735	0,735	-	-
Hlz 25	0,68 – 0,89	0,785	0,785 – 0,84	0,81
GS 5	0,58	0,58	0,84	0,84

Die Versuchsergebnisse unterstützen den Vorschlag weiterer Experten zur Reduzierung der Geschosshöhe um 25 % bei gleichsinnig drehenden Deckenauflagern am Wandfuß und am Wandkopf. Dieser Vorschlag gilt jedoch nicht für Wände, bei denen die anschließenden Decken eine gegensinnige Verdrehung bewirken. Solche Wände kommen z.B. bei versetzt angeordneten Geschossen oder unterschiedlichen Geschosshöhen vor. Ebenso wirken Fundamente mit geringer Steifigkeit auf bindigen Böden einer Einspannung entgegen, da sie sich mit der Zeit gegensinnig verdrehen. Abbildung 2.3 veranschaulicht die beschriebenen Sonderfälle.

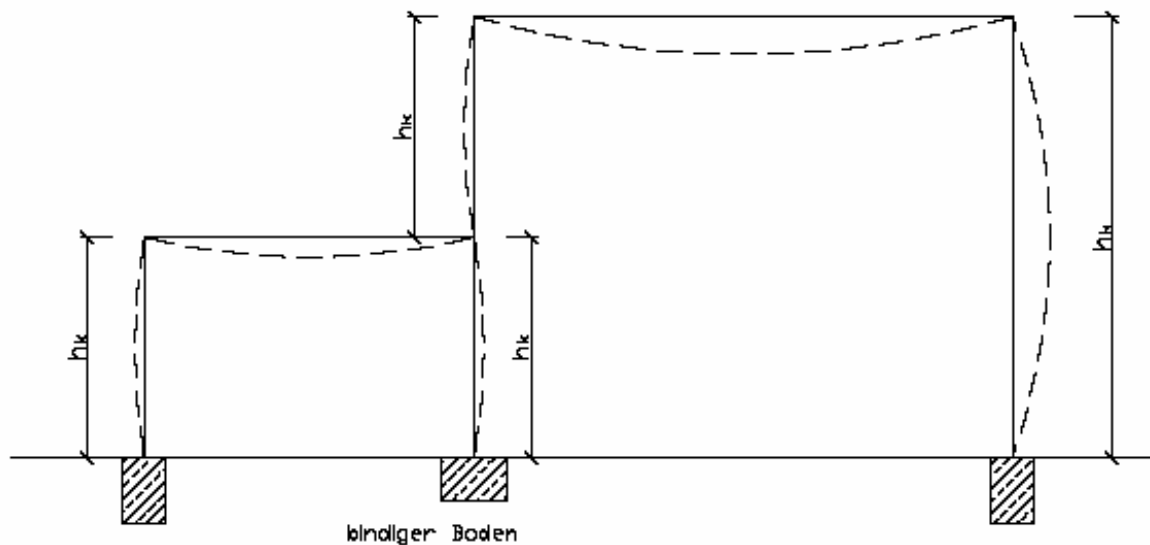


Abbildung 2.3: Von DIN 1053 abweichende Sonderfälle bei der Ermittlung der Knicklänge [28]

Nach Mann [33] gelten für die in DIN 1053-1 aufgenommenen Gleichungen zur Bestimmung der Knicklänge bestimmte Randbedingungen. Ist die Wand zwischen flächig aufgelagerten Decken eingespannt, darf die Einspannwirkung zur Abminderung der Knicklänge herangezogen werden. Für dünne Wände mit  $d \leq 17,5$  cm beträgt die reduzierte Knicklänge

$$h_k = 0,75 \cdot h_s \quad \text{für } e \leq d/6 \quad \text{Gl. 2-7}$$

$$h_k = 1,00 \cdot h_s \quad \text{für } e \leq d/3 \quad \text{Gl. 2-8}$$

Darin ist  $e$  die planmäßige Exzentrizität in halber Geschosshöhe.

Bei Wänden mit  $d > 17,5$  cm muss die eventuell vorhandene große Biegesteifigkeit der Wand gegenüber der Decke berücksichtigt werden, da sich die Einspannwirkung dadurch verringert. Die Berechnung der Knicklänge erfolgt in Abhängigkeit des Knicklängenbeiwertes  $\beta$ . Es gilt:

$$h_k = \beta \cdot h_s \quad \text{mit } 0,75 \leq \beta \leq 1,0 \quad \text{Gl. 2-9}$$

Zur Gewährleistung der rechnerisch vorausgesetzten Einspannung der Wand in die Decke muss die Decke bei einer Wanddicke  $d < 24$  cm voll aufliegen. Für  $24 \leq d \leq 30$  genügt eine Auflagerung mit  $\frac{3}{4}d$  und bei Wänden mit  $d > 30$  cm sind  $\frac{2}{3}d$  als Auflagerfläche ausreichend. Außerdem ist in jedem Fall eine Drehung der Decke um die Wandkante zu vermeiden, so dass die Exzentrizität der Bedingung  $e \leq d/3$  genügen muss. Weiterhin liegt die Einschränk-

kung der maximalen Abminderung mit  $\beta = 0,75$  auf ungerissene Querschnitte darin begründet, dass für größere Ausmitten in halber Geschosshöhe bei der Ausarbeitung der Gleichungen noch nicht genügend Versuchsergebnisse vorlagen.

## 2.4 Beurteilung der derzeitigen Auslegung der Normen

Die folgende Abbildung gibt nochmals einen Überblick über die historische Entwicklung und die Interaktionen von DIN 4102 und DIN 1053.

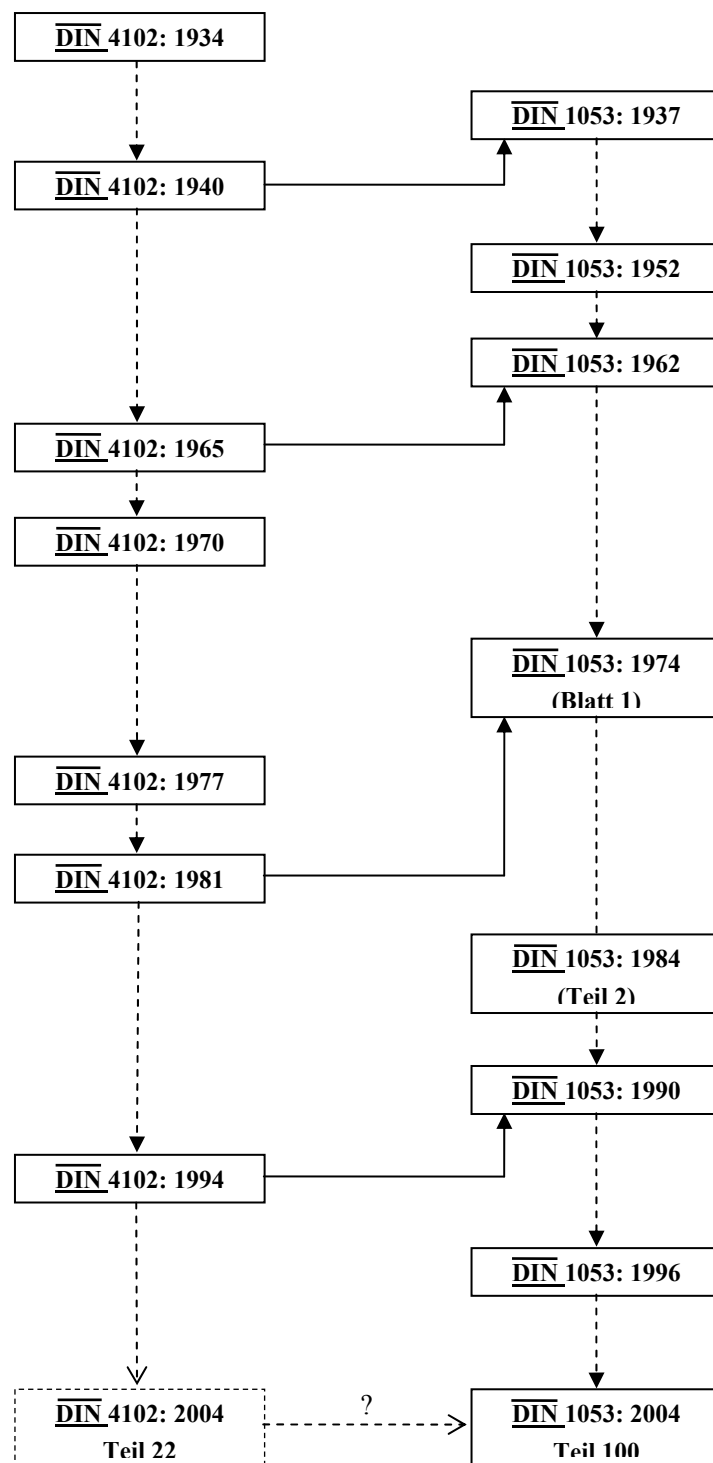


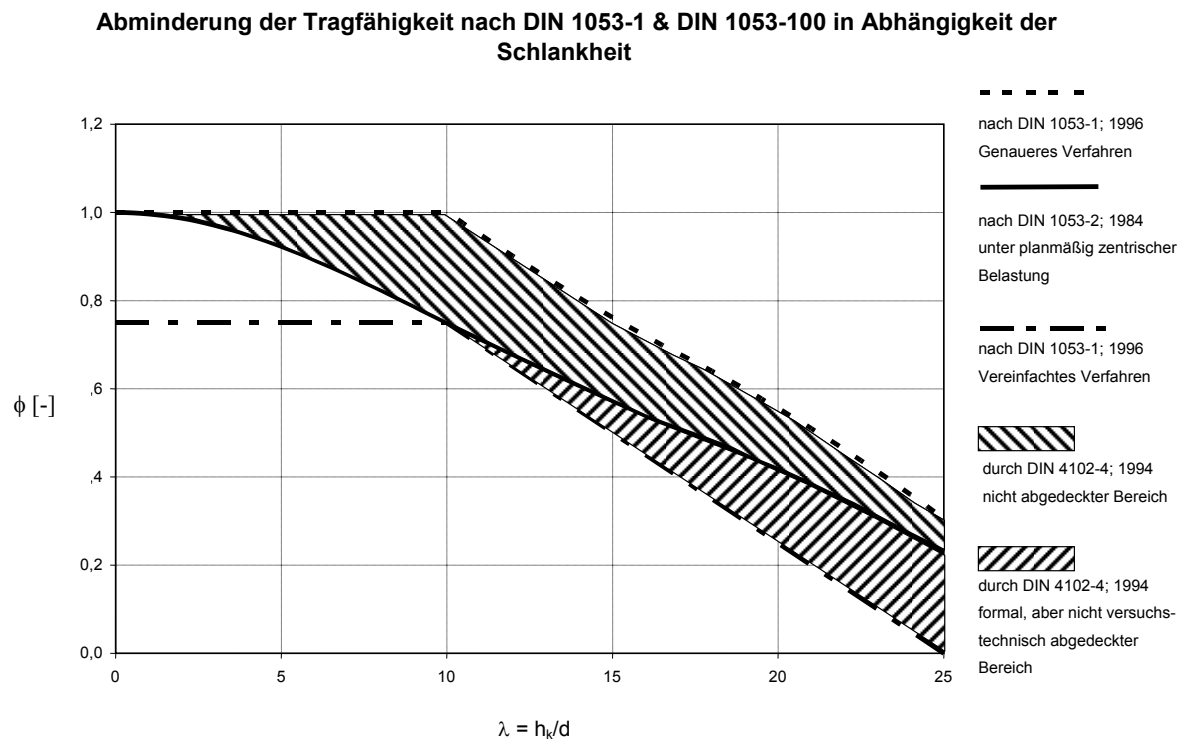
Abbildung 2.4: Überblick über die historische Entwicklung und Interaktionen von DIN 4102 und DIN 1053



Aus dieser historischen Entwicklung ist erkennbar, dass die derzeit für Brandschutznachweise im Mauerwerksbau verwendeten Tabellenwerke der DIN 4102-4: 1994 [1] und der darin enthaltene Ausnutzungsfaktor sich auf die Mauerwerksnormen DIN 1053-1: 1990 [2] und DIN 1053-2: 1984 [6] beziehen. Das in DIN 1053-1: 1990 [2] verankerte vereinfachte Verfahren und das in DIN 1053-2: 1984 [6] verankerte genauere Verfahren wurden 1996 in DIN 1053-1: 1996 [3] zusammengeführt. Demnach hat man in der Bemessungspraxis alle Hinweise in DIN 4102-4: 1994 [1] auf DIN 1053-2: 1984 [6] durch DIN 1053-1: 1996 [3] zu ersetzen (vgl. [15]).

Diese Vorgehensart birgt jedoch möglicherweise brandschutztechnische Sicherheitsrisiken, da dem Rechenverfahren nach Anhang B aus DIN 1053-2: 1984 [6] bzw. dem „genaueren“ Verfahren nach DIN 1053-1: 1990 [2] nicht die identischen Bemessungsansätze zu Grunde liegen wie dem „genaueren“ Verfahren nach DIN 1053-1: 1996 [3]. Im Unterschied zur älteren Ausgabe setzt DIN 1053-1: 1996 [3] im „genaueren“ Verfahren durch die Erhöhung des Rechenwertes der Druckspannung  $\beta_R$  um den Faktor 4/3 plastisches Verformungsverhalten an, wodurch höhere zulässige Traglasten erreicht werden. Der daraus resultierende Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2$  wird demnach kleiner was zu günstigeren brandschutztechnischen Anforderungen führen könnte, da die nach DIN 4102 – 4: 1994 [1] geforderte Mindestwanddicke vom Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2$  abhängt.

In Abbildung 2.5 ist die Abminderung der Traglast infolge der Schlankheit  $\lambda$  für die einzelnen Verfahren aufgetragen (siehe auch Kapitel 3).



**Abbildung 2.5: Abminderung der Traglast infolge des Schlankheitseinflusses nach dem „vereinfachten“ sowie dem „genaueren“ Verfahren nach DIN 1053, 1996 sowie DIN 1053-2: 1984**

Die untere Linie (punktirt) beschreibt die Abminderung für das „vereinfachte“ Verfahren nach DIN 1053-1 (Ausgabe 1990 & 1996). Die mittlere Kurve beschreibt den Verlauf der Knickabminderung für eine planmäßig zentrische Belastung nach DIN 1053-2: 1984. Der obere Verlauf bildet die Reduzierung der Traglast infolge der Schlankheit nach dem „genaueren“ Verfahren nach DIN 1053-1: 1996 [3]. Die Abweichung gegenüber der mittleren Kurve resultiert einzig aus der Erhöhung der zulässigen Randspannung um den Faktor  $4/3$ .

Durch die schraffierte Fläche wird die Differenz des „genaueren“ Verfahrens nach DIN 1053-1: 1990 [2] und DIN 1053-1: 1996 [3] nochmals hervorgehoben. Die in [15] vorgeschlagene Substitution der DIN 1053-1: 1990 [2] durch DIN 1053-1: 1996 [3] scheint somit in brand-schutztechnischer Hinsicht bedenklich.

### 3 Vergleich der Kaltbemessung im Mauerwerksbau nach verschiedenen Berechnungsverfahren

#### 3.1 Allgemeines

Bei der brandschutztechnischen Klassifizierung von Mauerwerkswänden wird die Einstufung in eine Feuerwiderstandsklasse in Abhängigkeit eines Ausnutzungsfaktors  $\alpha_2$  angegeben (siehe auch Kap. 4). Dieser Ausnutzungsfaktor wird auf Grundlage der Kaltbemessung bestimmt. Deshalb werden im folgenden Abschnitt die unterschiedlichen Bemessungsverfahren nach DIN 1053-1: 1996 [3] sowie DIN 1053-100, 2004 [4] gegenübergestellt. Darüber hinaus wird das genauere Berechnungsverfahren nach DIN 1053-2: 1984 [6] mit in die Gegenüberstellung einbezogen, welches der Vorläufer des genaueren Verfahrens nach DIN 1053-1: 1996 [3] ist. Die Ausführungen beziehen sich jeweils auf das „vereinfachte“ sowie das „genauere“ Bemessungsverfahren der zuvor genannten Normen, so dass insgesamt fünf Verfahren untersucht werden:

- DIN 1053-1: 1996 Vereinfachtes Verfahren (DIN 1053-1-V)
- DIN 1053-1: 1996 Genaueres Verfahren (DIN 1053-1-G)
- DIN 1053-2 : 1984 Genaueres Verfahren (DIN 1053-2)
- DIN 1053-100: 2004 Vereinfachtes Verfahren (DIN 1053-100-V)
- DIN 1053-100: 2004 Genaueres Verfahren (DIN 1053-100-G)

Die vorliegende Gegenüberstellung behandelt ausschließlich den Nachweis von Mauerwerkswänden unter Druckbeanspruchung. Auf eine umfassende Darstellung der einzelnen Nachweisverfahren wird verzichtet, vielmehr sollen die normativen Grundlagen der einzelnen Nachweisverfahren für einen Nachweis ausreichender Knicksicherheit so aufbereitet werden, dass sie mit den unterschiedlichen Regelungen nach DIN 1053-1: 1996 [3], DIN 1053-2: 1984 [6] und DIN 1053-100, 2004 [4] vergleichbar sind. Umfassende Hintergründe zur Bemessung von schlanken Mauerwerkswänden sind u.a. in [23] [24] zu finden.

### 3.2 Einfluss der Wandschlankheit

Die Berücksichtigung der Schlankheit  $\lambda$  erfolgt in allen Bemessungsverfahren über einen Faktor zur Abminderung der zulässigen Druckspannung, der im Folgenden mit  $\Phi$  bezeichnet wird. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Berechnungsverfahren nach dem Globalen und dem Teilsicherheitskonzept herzustellen, wird nachfolgend die Tragfähigkeit mit dem charakteristischen Wert der aufnehmbaren Normalkraft angegeben. Dieser Wert entspricht dem Begriff der zulässigen Normalkraft  $N_{zul}$ , wie er in der alten Normengeneration verwendet wurde. Allgemein ergibt sich daraus die aufnehmbare charakteristische Normalkraft zu

$$N_{zul} = N_{E,k} = \Phi \cdot A \cdot f \quad \text{Gl. 3-1}$$

mit

$N_{zul}$  bzw.  $N_{E,k}$ : aufnehmbare charakteristische Normalkraft

$\Phi$  Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Traglastminderung infolge Knicken

$A$  Wandquerschnitt

$f$  zulässige Druckspannung des betrachteten Verfahrens (bei zentrischer Belastung)

DIN 1053-1-V  $f = \sigma_0$

DIN 1053-1-G und DIN 1053-2  $f = \beta_R / \gamma_{gl} = 4/3 \cdot 2 \cdot \sigma_0 / \gamma_w$

DIN 1053-100  $f = f_d / \gamma_{G,Q}$

$\sigma_0$  Grundwert der zulässigen Druckspannung nach Tabelle 4, DIN 1053-1, Abschnitt 6.9

$\gamma_w$  Globaler Sicherheitsbeiwert nach DIN 1053-1,  $\gamma_w = 2,0$

$\beta_R$  Rechenwert der Druckfestigkeit mit der theoretischen Schlankheit Null

$f_d$  Bemessungswert der Druckfestigkeit von Mauerwerk,  $f_d = f_k \cdot \eta / \gamma_m$

$f_k$  charakteristische Druckfestigkeit des Mauerwerks nach Tabelle 4, DIN 1053-100, Abschnitt 8.9.1.1

$\eta$  Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung von Langzeitauswirkungen

$\gamma_M$  Teilsicherheitsbeiwert für die Materialeigenschaften,  $\gamma_m = 1,5$

$\gamma_{G,Q}$  Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkungen,  $\gamma_{G,Q} = 1,4$

Der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{G,Q}$  setzt sich aus den Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma_G$  und  $\gamma_Q$  zusammen. Für den Vergleich wird angenommen, dass das Verhältnis der ständigen Einwirkung zur Gesamteinwirkung  $2/3$  beträgt.

Der zulässige Grundwert der Druckspannung  $\sigma_0$  im „vereinfachten“ Verfahren nach DIN 1053-1: 1996 ist für den hier betrachteten Nachweis der Knicksicherheit einer Wand mit

dem Produkt aus den Beiwerten  $k_1 \cdot k_2$  abzumindern. Für Wände und kurze Wände darf der Beiwert  $k_1$  zu 1,0 gesetzt werden, so dass eine Abminderung der Tragfähigkeit aus dem Beiwert  $k_2$  resultiert, der in der Norm in Abhängigkeit der Schlankheit  $\lambda = h_k / d$  mit

$$k_2 = 1,0 \quad \text{für } h_k/d \leq 10 \quad \text{Gl. 3-2}$$

$$k_2 = \frac{25 - h_k/d}{15} \quad \text{für } 10 < h_k/d \leq 25 \quad \text{Gl. 3-3}$$

angegeben wird. Eine Berücksichtigung der Umrechnung einer Schlankheit von „10“ auf die theoretische Schlankheit Null, die den anderen Verfahren zu Grunde liegt, kann nach [11] mit dem Faktor 3/4 erfolgen, so dass sich der Abminderungsbeiwert zu

$$\Phi_{DIN1053-1-V} = \frac{3}{4} \cdot 1,0 \quad \text{für } h_k/d \leq 10 \quad \text{Gl. 3-4}$$

$$\Phi_{DIN1053-1-V} = \frac{3}{4} \cdot \frac{(25 - \lambda)}{15} \leq \frac{3}{4} \cdot 1,0 \quad \text{für } 10 < h_k/d \leq 25 \quad \text{Gl. 3-5}$$

ergibt. Es ist zu beachten, dass das vereinfachte Berechnungsverfahren aus der Lösung des genaueren Verfahrens ohne Berücksichtigung von planmäßigen Exzentrizitäten hergeleitet wurde. Unter anderem aus diesem Grund ist der Anwendungsbereich auch eingeschränkt.

Bei einem Nachweis nach dem „genaueren“ Verfahren nach DIN 1053-2: 1984 bzw. DIN 1053-1: 1996 ist mit Hilfe der Näherungslösung nach Mann [12] zunächst die Zusatzausmitte infolge Imperfektionen und Kriechen nach Gl. 3-6 zu bestimmen:

$$\frac{f}{d} = \frac{\Delta e_{II}}{d} + \frac{e_a}{d} + \frac{e_\varphi}{d} = \frac{1 + 6 \cdot e_0 / d}{2400} \cdot \left(1 + \frac{\varphi_\infty}{4}\right) \cdot \left(\frac{h_k}{d}\right)^2 \quad \text{Gl. 3-6}$$

Mit einem für alle Mauerwerksarten angesetzten Rechenwert der Endkriechzahl von  $\varphi_\infty = 4/3$  folgt daraus die in der Norm enthaltene Gleichung zur Ermittlung der Zusatzausmitte infolge Kriechen und Imperfektion:

$$f = \lambda \cdot h_k \cdot \frac{1 + m}{1800} \quad \text{Gl. 3-7}$$

Darin ist

$$\lambda = \frac{h_k}{d} \quad \text{die Schlankheit der Wand}$$

$h_k$  die Knicklänge der Wand

$m = \frac{6 \cdot e}{d}$  die bezogene planmäßige Exzentrizität in halber Geschosshöhe, für planmäßig zentrisch belastete Wände gilt  $m = 0$

Die Gleichung der gesamten bezogenen Ausmitte lautet allgemein:

$$m_g = 6 \cdot \frac{(e + f)}{d} \quad \text{Gl. 3-8}$$

Durch Umformen kann Gleichung Gl. 3-6 mit  $m = 0$  und  $\lambda = h_k/d$  in die Form

$$\frac{e}{d} = \frac{\lambda^2}{1800} \quad \text{Gl. 3-9}$$

gebracht werden. Mit der Annahme einer planmäßig zentrisch belasteten Wand lässt sich die gesamte bezogene Ausmitte nach Gl. 3-8 mit Gl. 3-9 durch die folgende Gleichung ersetzen.

$$m_g = \frac{\lambda^2}{300} \quad \text{Gl. 3-10}$$

Sowohl DIN 1053-2: 1984 als auch DIN 1053-1: 1996 verwenden ein linear elastisches Werkstoffgesetz für den Spannungsnachweis. Der Unterschied beider Vorschriften besteht darin, dass die zulässige Spannung am druckbeanspruchten Querschnittsrand bei Anwendung des genaueren Verfahrens nach DIN 1053-1: 1996 um den Faktor 4/3 erhöht werden darf. Damit wurde indirekt plastisches Werkstoffverhalten zugelassen, ohne den Ansatz eines linear-elastischen Materialverhaltens aufzugeben. Der Mittelwert der Spannungen im Querschnitt muss jedoch kleiner als der zulässige Rechenwert sein. Dieser Nachweis wird bis zu einer bezogenen Exzentrizität von  $e/d \leq 1/18$  maßgebend.

Zur Berechnung der Abminderungsfaktoren  $\Phi$  nach DIN 1053-1: 1996 ist zwischen den in der folgenden Tabelle enthaltenen Beanspruchungsfällen und den dort angegebenen Spannungsnachweisen zu differenzieren:

**Tabelle 3.1: Spannungsnachweise nach dem "genaueren" Verfahren gemäß DIN 1053-1: 1996 in Abhängigkeit der planmäßigen und unplanmäßigen Lastexzentrizität**

Anwendungsbereich	Spannungsnachweis
$0 < \frac{e+f}{d} \leq \frac{1}{18}$	$\sigma_m = \frac{N_{E,k}}{b \cdot d} \leq \beta_R / \gamma$ <span style="float: right;">Gl. 3-11</span>
$\frac{1}{18} < \frac{e+f}{d} \leq \frac{1}{6}$	$\sigma_R = \frac{N_{E,k}}{b \cdot d} \cdot (1 + m_g) \leq \frac{4}{3} \cdot \beta_R / \gamma$ <span style="float: right;">Gl. 3-12</span>
$\frac{1}{6} < \frac{e+f}{d} \leq \frac{1}{3}$	$\sigma_R = \frac{N_{E,k}}{b \cdot d} \cdot \frac{4}{3 - m_g} \leq \frac{4}{3} \cdot \beta_R / \gamma$ <span style="float: right;">Gl. 3-13</span>

Mit Gl. 3-9 können die Abgrenzungskriterien in Abhängigkeit der Schlankheit  $\lambda$  angegeben werden, so dass sich die nachstehenden Abminderungsfaktoren in Abhängigkeit der Schlankheit ergeben.

$$\phi_{DIN1053-1-G} = 1,0 \quad \text{für } \lambda \leq 10 \quad \text{Gl. 3-14}$$

$$\phi_{DIN1053-1-G} = \frac{4}{3} \frac{1}{(1 + \lambda^2/300)} \leq 1,0 \quad \text{für } 10 < \lambda \leq \sqrt{300} \quad \text{Gl. 3-15}$$

$$\phi_{DIN1053-1-G} = 1 - \frac{\lambda^2}{900} \leq 1,0 \quad \text{für } \lambda > \sqrt{300} \quad \text{Gl. 3-16}$$

Für den Nachweis der Knicksicherheit nach DIN 1053-2: 1984 darf die Erhöhung der Randspannung nicht in Ansatz gebracht werden, so dass sich die Beziehungen folgendermaßen vereinfachen:

**Tabelle 3.2: Spannungsnachweise nach dem "genaueren" Verfahren gemäß DIN 1053-2: 1984 in Abhängigkeit der planmäßigen und unplanmäßigen Lastexzentrizität**

Anwendungsbereich	Spannungsnachweis
$\frac{e+f}{d} \leq \frac{1}{6}$	$\sigma_R = \frac{N_{E,k}}{b \cdot d} \cdot (1 + m_g) \leq \beta_R / \gamma$ <span style="float: right;">Gl. 3-17</span>
$\frac{1}{6} < \frac{e+f}{d} \leq \frac{1}{3}$	$\sigma_R = \frac{N_{E,k}}{b \cdot d} \cdot \frac{4}{3 - m_g} \leq \beta_R / \gamma$ <span style="float: right;">Gl. 3-18</span>

Die Abminderungsfaktoren in Abhängigkeit der Schlankheit ergeben sich demnach zu:

$$\Phi_{DIN1053-2} = \frac{1}{(1 + \lambda^2/300)} \leq 1,0 \quad \text{für } \lambda \leq \sqrt{300} \quad \text{Gl. 3-19}$$

$$\Phi_{DIN1053-2} = \left(1 - \frac{\lambda^2}{900}\right) \cdot \frac{3}{4} \leq 1,0 \quad \text{für } \lambda > \sqrt{300} \quad \text{Gl. 3-20}$$

Der Faktor zur Berücksichtigung der Traglastminderung bei Knickgefahr bei geschosshohen Wänden wird gemäß dem „vereinfachten“ Verfahren nach DIN 1053-100, 2004 in Abschnitt 8.9.1.3 angegeben. Mit der Begrenzung der zulässigen Schlankheit auf  $\lambda \leq 25$  ergibt er sich zu

$$\Phi_{DIN1053-100-V} = 0,85 - 0,0011 \cdot \lambda^2 \quad \text{Gl. 3-21}$$

Mögliche planmäßige Exzentrizitäten werden nicht explizit erfasst. Sie sollen mit Gl. 3-20 im Rahmen der Anwendungsgrenzen abgedeckt sein.

Zur Bemessung einer Wand nach dem „genaueren“ Verfahren sieht DIN 1053-100:2004 eine Abminderung der Tragfähigkeit in halber Geschosshöhe entsprechend folgender Gleichung vor:

$$\phi_m = 1,14 \left(1 - 2 \frac{e_m}{d}\right) - 0,024 \cdot \frac{h_k}{d} \leq 1 - 2 \frac{e_m}{d} \quad \text{Gl. 3-22}$$

Dabei ist

$h_k/d$  die Schlankheit der Wand mit  $h_k/d \leq 25$

$e_m$  die Exzentrizität der einwirkenden Last  $N_{m,d}$  in halber Geschosshöhe

Bei der Bestimmung der gesamten Lastexzentrizität  $e_m$  sind neben dem Anteil der planmäßigen Exzentrizität zusätzliche Ausmitten infolge von Imperfektion sowie Kriechen zu berücksichtigen, so dass gilt:

$$e_m = e_{m0} + e_{mk} = \frac{M_{Emd}}{N_{Emd}} + e_a + e_{mk} \quad \text{Gl. 3-23}$$

mit

$M_{Emd}$  Bemessungswert des einwirkenden Momentes in halber Geschosshöhe nach Theorie I. Ordnung



- $N_{Emd}$  Bemessungswert der einwirkenden Normalkraft in halber Geschosshöhe
- $e_{m0}$  planmäßige Lastausmitte in halber Geschosshöhe infolge der Deckeneinspannung und Belastung durch Wind sowie einer ungewollten Ausmitte  $e_a$
- $e_a$  ungewollte Ausmitte, sie darf zu  $e_a = h_k / 450$  angenommen werden
- $e_{mk}$  Exzentrizität infolge Kriechen in halber Geschosshöhe

Vereinfacht dürfen zur Erfassung der Kriechausmitte die nachstehenden in der Norm angegebenen Gleichungen verwendet werden.

$$e_{mk} = 0 \quad \text{für } h_k / d \leq 10 \quad \text{Gl. 3-24}$$

$$e_{mk} = 0,002 \cdot \varphi_\infty \cdot h_k \cdot \sqrt{e_{m0}/d} \quad \text{für } h_k / d > 10 \quad \text{Gl. 3-25}$$

Mit

$\varphi_\infty$  Rechenwert der Endkriechzahl nach Tabelle 3, DIN 1053-100:2004

Abweichend von Tabelle 3 der DIN 1053-100:2004 wurde zu Vergleichszwecken für die nachfolgenden Auswertungen wie in DIN 1053-1: 1996 eine Endkriechzahl von  $\varphi_\infty = 4/3$  in Gl. 3-27 eingesetzt.

In Abhängigkeit der Schlankheit ergeben sich demnach nachstehende Abminderungsfaktoren. für  $\lambda \leq 10$  gilt:

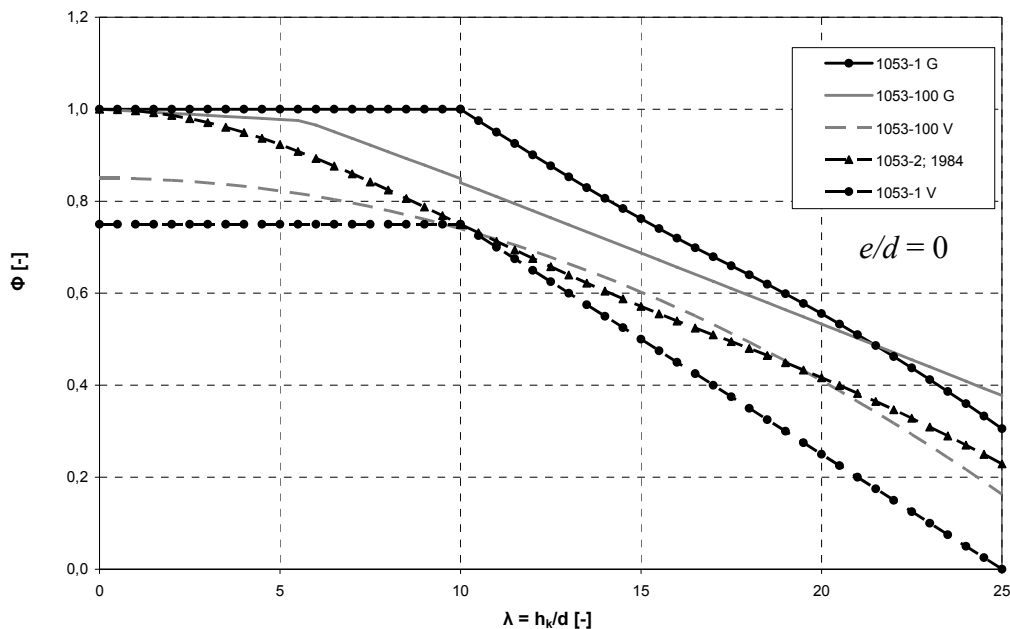
$$\Phi_{DIN1053-100-G} = \min \begin{cases} 1,14(1 - \lambda/225) - 0,024 \cdot \lambda \\ 1 - \lambda/225 \end{cases} \quad \text{Gl. 3-26}$$

für  $10 < \lambda \leq 25$ :

$$\Phi_{DIN1053-100-G} = \min \begin{cases} 1,14 \left( 1 - 2 \cdot \lambda \left( 1/450 + 1/375 \cdot \sqrt{\lambda/450} \right) \right) - 0,024 \cdot \lambda \\ 1 - 2 \cdot \lambda \left( 1/450 + 1/375 \cdot \sqrt{\lambda/450} \right) \end{cases} \quad \text{Gl. 3-27}$$

In der folgenden Abbildung sind die Abminderungsfaktoren  $\Phi$  der einzelnen Verfahren für eine planmäßig zentrische Belastung ( $e = 0$ ) in Abhängigkeit der Schlankheit aufgetragen. Während die Graphen nach DIN 1053-1 annähernd einen bilinearen Verlauf beschreiben und bis zu einer Schlankheit mit dem Wert 10 parallel zur Abszisse verlaufen, ist die Tragfähig-

keit bei einer Bemessung nach DIN 1053-100 mit zunehmender Schlankheit kontinuierlich abnehmend.



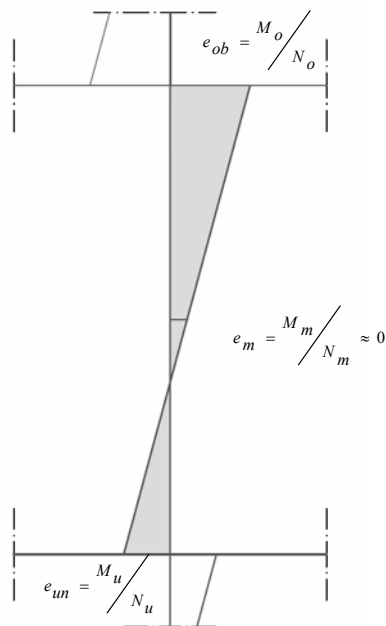
**Abbildung 3.1: Abminderung der Tragfähigkeit nach DIN 1053-1: 1996, DIN 1053-2: 1984 und DIN 1053-100: 2004 in Abhängigkeit der Schlankheit für planmäßig zentrischen Druck**

Weiterhin veranschaulicht die Abbildung, dass bei einer Bemessung nach dem „genaueren“ Verfahren nach DIN 1053-1 bei einer Schlankheit zwischen  $\lambda=0$  und  $\lambda=21,5$  die geringsten Abminderungen zu berücksichtigen sind.

Bei Wänden mit einer Schlankheit größer 21,5 nutzt eine Bemessung nach dem genaueren Verfahren von DIN 1053-100 den Wandquerschnitt am meisten aus, während bei  $\lambda < 21,5$  das genauere Verfahren nach DIN 1053-1: 1996 die größten Tragfähigkeiten ergibt. Das „vereinfachte“ Verfahren nach DIN 1053-100 liefert stets günstigere Abminderungsfaktoren als das „vereinfachte“ Verfahren nach DIN 1053-1. Weiterhin ist auffällig, dass das genauere Verfahren der DIN 1053-1: 1996 im Vergleich zu DIN 1053-2: 1984 deutlich größere Tragfähigkeiten liefert. Diese Differenz kommt alleine durch die nach DIN 1053-1: 1996 zulässige Erhöhung der Randspannung zustande.

### 3.3 Einfluss von Lastexzentrizitäten

Zunächst ist anzumerken, dass in diesem Abschnitt ausschließlich die für den Knicksicherheitsnachweis maßgebenden Lastexzentrizitäten in halber Geschosshöhe gemäß der nachfolgenden Abbildung betrachtet werden.

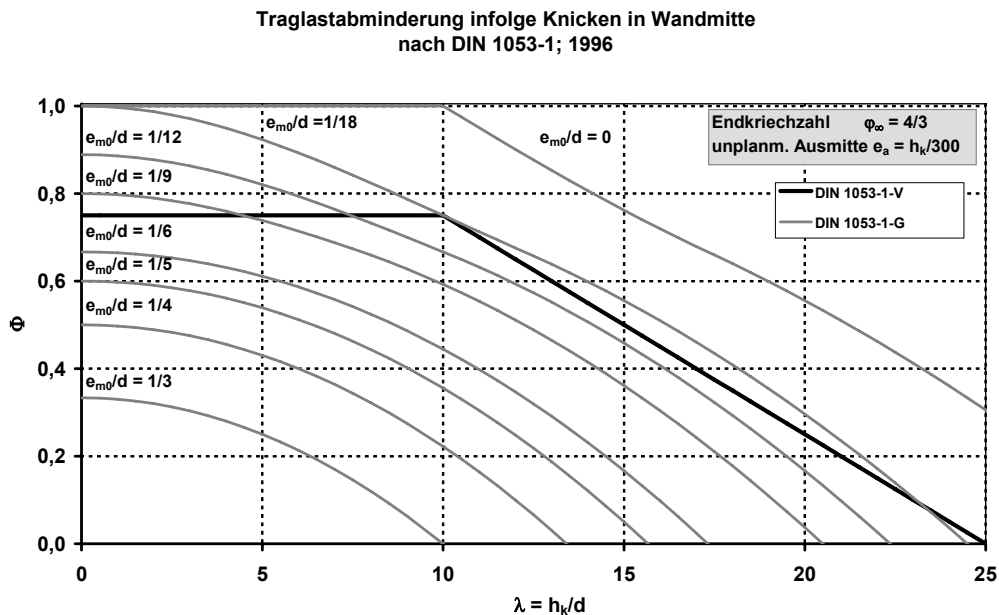


**Abbildung 3.2: Planmäßige Exzentrizitäten nach Theorie I. Ordnung am Rahmensystem**

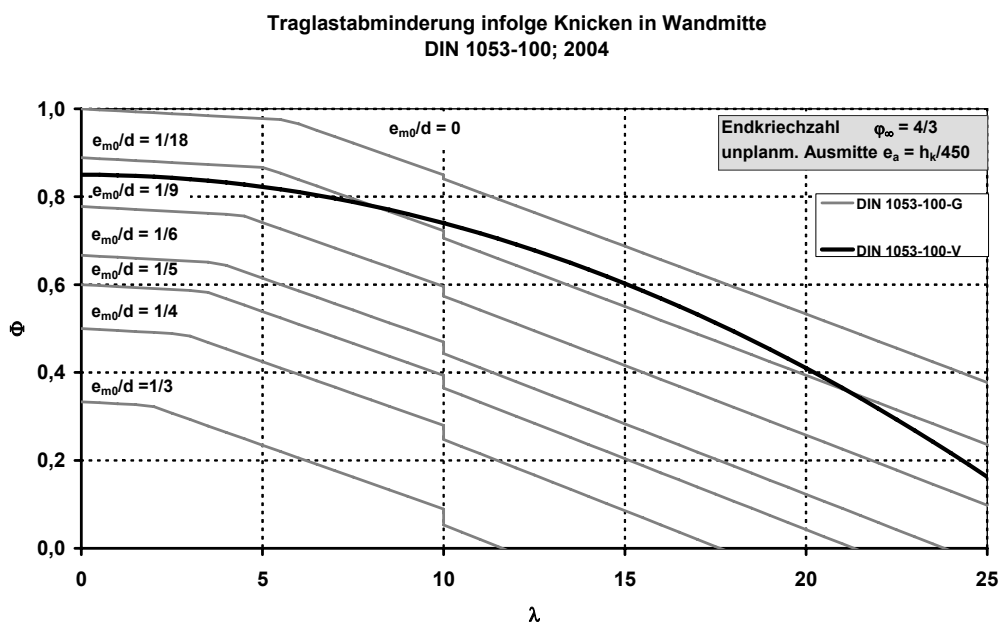
Die Knotenmomente aus der Deckeneinspannung sind zwar in halber Geschosshöhe zu berücksichtigen und die daraus resultierenden Exzentrizitäten als planmäßige Exzentrizitäten im Knicksicherheitsnachweis anzusetzen, aber sie beeinflussen die Tragfähigkeit im Allgemeinen nicht stark. Im Fall von regelmäßigen Bauwerken ergeben sich die Momente aus einer Rahmenrechnung am Wandfuß und am Wandkopf dem Betrag nach etwa gleich groß, da der Deckenauflagerdrehwinkel am oberen und am unteren Wandrand gleich groß wird, so dass das Moment in Wandmitte den Wert Null annimmt. Selbst bei asymmetrischer Momentenverteilung bleibt der Einfluss der Exzentrizität gering [33].

In Abhängigkeit der Schlankheit  $\lambda$  nimmt die Tragfähigkeit einer Wand mit zunehmend exzentrischer Lasteinleitung ab. Dabei werden bei einer planmäßigen Exzentrizität in halber Geschosshöhe von  $1/6 d$  maximal zulässige Schlankheiten von  $\lambda=23,5$  (DIN 1053-100-G) bzw.  $\lambda=17$  (DIN 1053-1-G) erreicht. Beträgt die planmäßige Ausmitte  $1/3 d$ , so sind maximal Schlankheiten von  $\lambda= 11,5$  (DIN 1053-100-G) bzw.  $\lambda=10$  (DIN 1053-1-G) zulässig, wobei

diese Schlankheit den theoretischen Maximalwert bilden, da sie einer Tragfähigkeit „Null“ zugeordnet wären. In den beiden nachstehenden Diagrammen (Abbildung 3.3 und Abbildung 3.4) sind die Traglastabminderungsfaktoren infolge Knicken in Abhängigkeit der Schlankheit nach DIN 1053-1: 1996 und DIN 1053-100: 2004 dargestellt. Zu Vergleichszwecken sind jeweils die Abminderungsfaktoren der vereinfachten Verfahren in die Diagramme integriert.



**Abbildung 3.3:** Traglastabminderung infolge Knicken in Wandmitte DIN 1053-1 in Abhängigkeit der Schlankheit für verschiedene planmäßige Exzentrizitäten in halber Geschosshöhe



**Abbildung 3.4:** Traglastabminderung infolge Knicken in Wandmitte nach DIN 1053-100 in Abhängigkeit der Schlankheit für verschiedene planmäßige Exzentrizitäten in halber Geschosshöhe

In Abbildung 3.5 - Abbildung 3.7 werden die genaueren Abminderungsfaktoren der genaueren Rechenverfahren jeweils für die Exzentrizitäten  $e/d = 1/18$ ,  $e/d = 1/6$  sowie  $e/d = 1/3$  dargestellt.

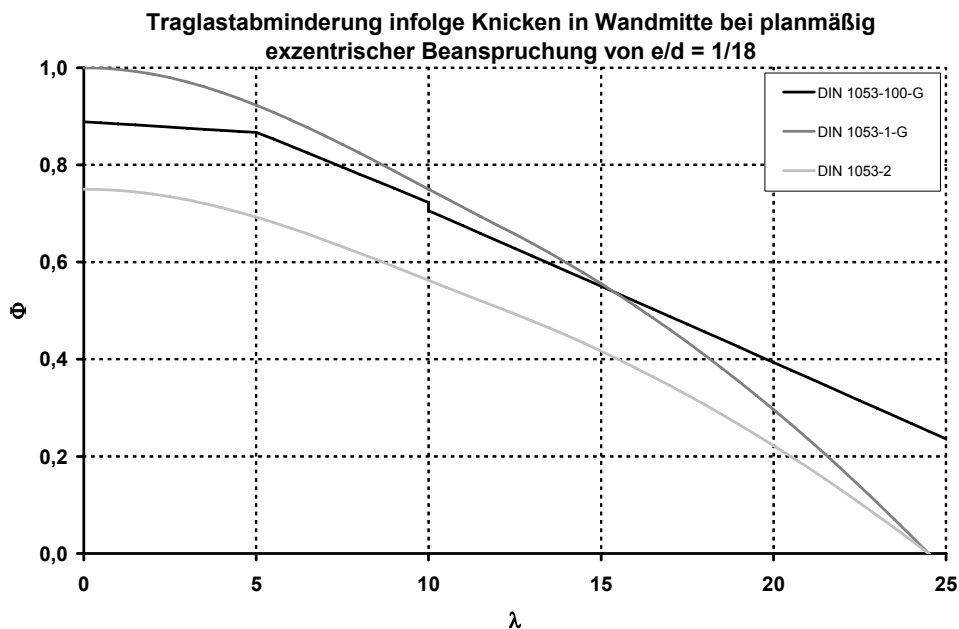


Abbildung 3.5: Vergleich der Traglastabminderung infolge Knicken in Wandmitte bei planmäßig exzentrischer Beanspruchung von  $e/d = 1/18$  in halber Geschosshöhe

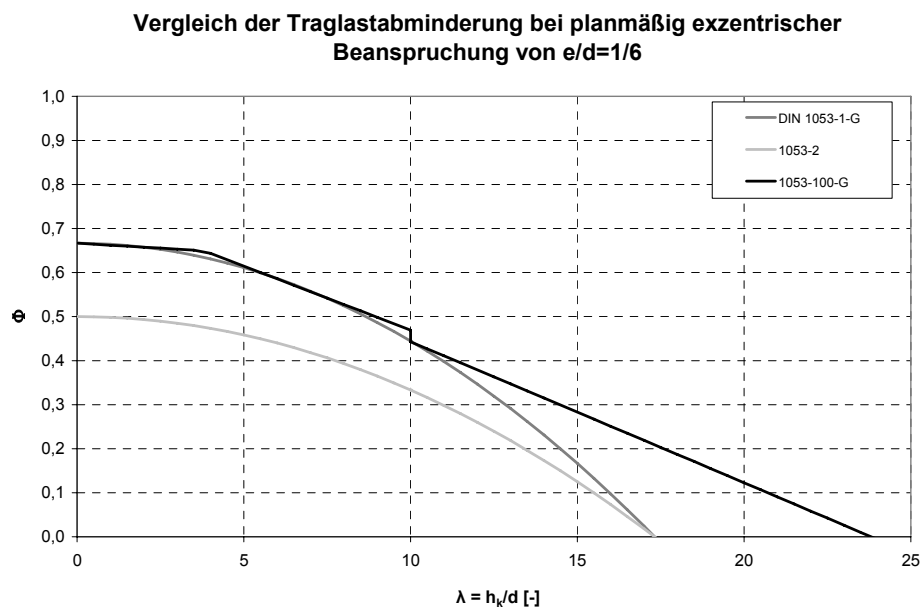
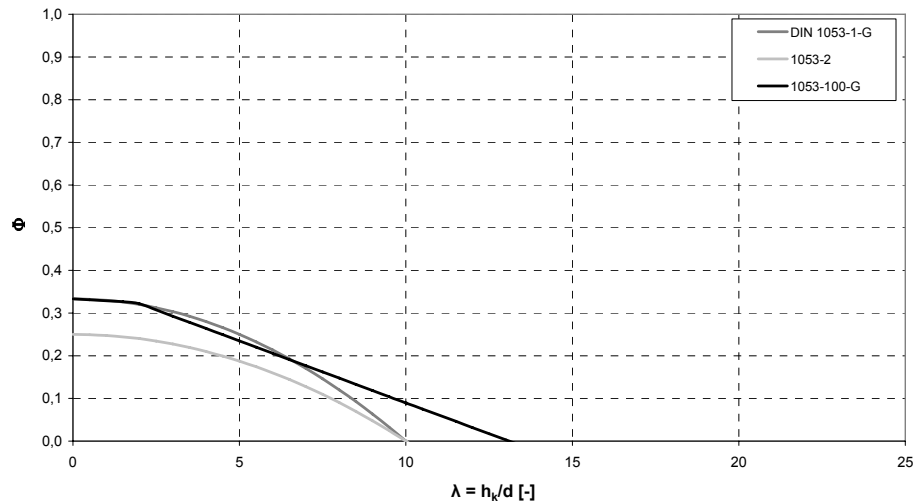


Abbildung 3.6: Vergleich der Traglastabminderung infolge Knicken in Wandmitte bei planmäßig exzentrischer Beanspruchung von  $e/d = 1/6$  in halber Geschosshöhe

**Vergleich der Traglastabminderung bei planmäßig exzentrischer Beanspruchung von  $e/d = 1/3$**



**Abbildung 3.7:** Vergleich der Traglastabminderung infolge Knicken in Wandmitte bei planmäßig exzentrischer Beanspruchung von  $e/d = 1/3$  in halber Geschosshöhe

Die Diagramme zeigen, dass mit zunehmender Exzentrizität bei größeren Schlankheiten eine Bemessung gemäß des „genaueren“ Verfahrens nach DIN 1053-100 gegenüber einer Bemessung mit dem „genaueren“ Verfahren nach DIN 1053-1 höhere Tragfähigkeiten liefert. Sind bei einer Bemessung nach DIN 1053-100 bei zentrischer Belastung erst bei Schlankheiten  $\lambda > 22,5$  günstigere Ergebnisse zu erwarten, so ist dies bei einer planmäßigen Ausmitte von  $e/d = 1/6$  bereits ab Schlankheiten  $\lambda > 10$  der Fall. Liegt eine exzentrische Belastung in halber Geschosshöhe mit  $e/d = 1/3$  vor, so werden mit dem „genaueren“ Verfahren nach DIN 1053-1 bei Schlankheiten  $\lambda > 7$  signifikant niedrigere Tragfähigkeiten erzielt als nach DIN 1053-100. Für geringe Schlankheiten liefern beide Verfahren bei exzentrischer Belastung ähnliche Abminderungsfaktoren.

Obgleich im „vereinfachten“ Verfahren nach DIN 1053-1: 1996 und DIN 1053-100 rechnerisch keine planmäßige Exzentrizität anzusetzen ist, werden durch die berücksichtigten Abminderungsfaktoren indirekt Lastexzentrizitäten abgedeckt. Die Gegenüberstellung der Tragfähigkeit nach dem „genaueren“ Verfahren nach DIN 1053-1: 1996 mit der des „vereinfachten“ Verfahrens liefert die in Abbildung 3.8 dargestellten Exzentrizitäten, welche implizit berücksichtigt sind. Für eine bezogene planmäßige und ungewollte Exzentrizität mit  $1/18 < (e+f)/d < 1/6$  gelten die folgenden Gleichungen:

$$\frac{4}{3 \cdot (1 + m_g)} = \frac{3}{4} \quad \text{für } \lambda \leq 10 \quad \text{Gl. 3-28}$$

$$\frac{4}{3 \cdot (1 + m_g)} = \frac{3}{4} \cdot \frac{25 - \lambda}{15} \quad \text{für } 10 < \lambda \leq 25 \quad \text{Gl. 3-29}$$

Mit  $f$  und  $m_g$  nach Gl. 3-6 und Gl. 3-8 kann die im „vereinfachten“ Verfahren abgedeckte planmäßige Exzentrizität wie folgt bestimmt werden.

$$e/d = \frac{-(3\lambda^3 - 700)}{18(\lambda^2 + 300)} \quad \text{für } \lambda \leq 10 \quad \text{Gl. 3-30}$$

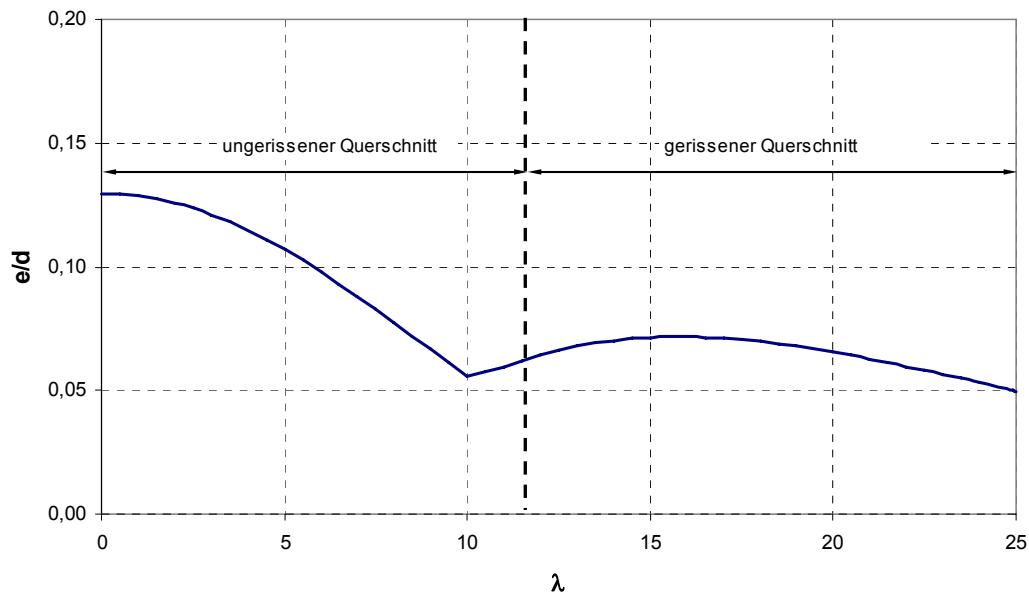
$$e/d = \frac{-(\lambda^3 - 25\lambda^2 + 300\lambda + 500)}{6(\lambda - 25)(\lambda^2 + 300)} \quad \text{für } 10 < \lambda \quad \text{Gl. 3-31}$$

Überschreitet die Summe aus planmäßiger und ungewollter Exzentrizität den Wert  $d/6$ , liegt also ein gerissener Querschnitt vor, kann die im vereinfachten Verfahren abgedeckte Ausmitte mit nachstehenden Gleichungen ermittelt werden.

$$\frac{4 \cdot (3 - m_g)}{3 \cdot 4} = \frac{3}{4} \cdot \frac{25 - \lambda}{15} \quad \text{für } 10 < \lambda \leq 25 \quad \text{Gl. 3-32}$$

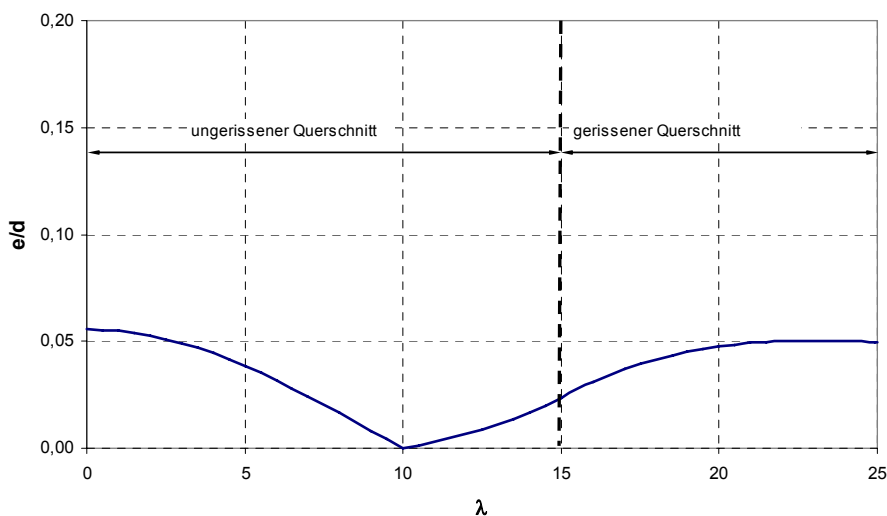
Mit  $f$  und  $m_g$  nach Gl. 3-6 und Gl. 3-8 folgt daraus

$$e/d = \frac{-(\lambda^2 - 45\lambda + 225)}{6 \cdot (\lambda^2 + 300)} \quad \text{für } 11,5 < \lambda \quad \text{Gl. 3-33}$$



**Abbildung 3.8:** Im "vereinfachten" Verfahren nach DIN 1053-1: 1996 indirekt berücksichtigte bezogene Exzentrizität  $e/d$  in Abhängigkeit der Schlankheit  $\lambda$

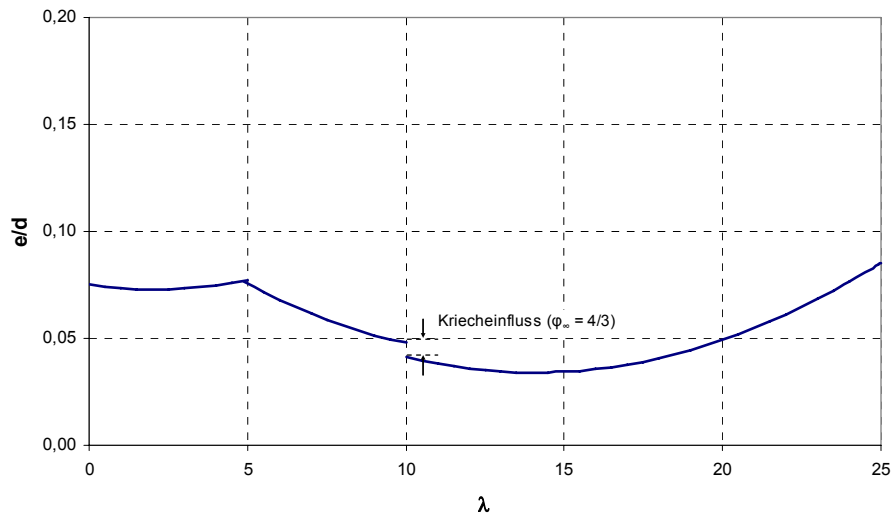
Legt man für die Ermittlung der im vereinfachten Verfahren der DIN 1053-1: 1996 implizit abgedeckten Exzentrizitäten das genauere Verfahren nach DIN 1053-2: 1984 zugrunde, erhält man aufgrund der niedrigeren Tragfähigkeiten des genaueren Nachweisverfahrens erwartungsgemäß kleinere Ausmitten, die in Abbildung 3.9 dargestellt sind. Für eine Schlankheit von  $\lambda = 10$  ist sogar zu erkennen, dass gar keine planmäßige Ausmitte mit dem vereinfachten Verfahren abgedeckt wäre.



**Abbildung 3.9:** Im "vereinfachten" Verfahren nach DIN 1053-1: 1996 indirekt berücksichtigte bezogene Exzentrizität  $e/d$  in Abhängigkeit der Schlankheit  $\lambda$  bezogen auf das genauere Verfahren nach DIN 1053-2: 1984



Für das „vereinfachte“ Verfahren nach DIN 1053-100 ergibt sich analog die in Abbildung 3.10 dargestellte planmäßige Exzentrizität, wenn als Bezugsmaßstab das genauere Verfahren nach DIN 1053-100: 2004 zugrunde gelegt wird. Die Unstetigkeit des Kurvenverlaufes resultiert aus der Berücksichtigung des Kriecheinflusses ab einer Schlankheit  $\lambda > 10$ .



**Abbildung 3.10: Im "vereinfachten" Verfahren nach DIN 1053-100: 2004 indirekt berücksichtigte bezogene Exzentrizität  $e/d$  in Abhängigkeit der Schlankheit  $\lambda$**

Die vorangegangenen Ausführungen zeigen, dass auch mit dem „vereinfachten“ Verfahren in Abhängigkeit der Schlankheit gewisse Lastexzentrizitäten abgedeckt werden. Es ist jedoch zu erkennen, dass in DIN 1053-100: 2004 insbesondere im praxisrelevanten Bereich von Schlankheiten zwischen  $10 \leq \lambda \leq 20$  planmäßige Exzentrizitäten nicht mehr so großzügig abgedeckt werden wie in DIN 1053-1: 1996. Dies ist möglicherweise bei der zukünftigen Durchführung von Brandversuchen auf Basis der DIN 1053-100: 2004 zu berücksichtigen. Es sollte in Erwägung gezogen werden, die Belastung im Brandversuch ebenfalls mit einer planmäßigen Exzentrizität aufzubringen. Bisher ist dies nur bei Versuchen zur Klassifizierung von Brandwänden üblich.

### 3.4 Einfluss des Sicherheitskonzeptes

Bekanntermaßen findet in DIN 1053-100: 2004 das Teilsicherheitskonzept Verwendung, während in DIN 1053-1: 1996 das globale Sicherheitskonzept verankert ist. In DIN 1053-1: 1996 war der globale Sicherheitsbeiwert  $\gamma_{gl} = 2,0$  bereits im Grundwert der zulässigen Druckspannungen  $\sigma_0$  enthalten. Der Zusammenhang zwischen dem Rechenwert der Druckfestigkeit  $\beta_R$  und dem Grundwert der zulässigen Druckspannung  $\sigma_0$  lautet:

$$\beta_R = \alpha \cdot \gamma_{gl} \cdot \sigma_0 = \frac{4}{3} \cdot 2 \cdot \sigma_0 = 2,67 \cdot \sigma_0 \quad \text{Gl. 3-34}$$

Darin entspricht der Faktor „ $\alpha = 4/3$ “ der Umrechnung der Schlankheit  $\lambda = 10$  auf die theoretische Schlankheit  $\lambda = 0$ . Dieser Faktor kann bestimmt werden, indem man die Tragfähigkeit für eine planmäßig zentrisch gedrückte Wand ( $m = 0$ ) mit der Schlankheit  $\lambda = 10$  und  $\lambda = 0$  gleichsetzt. Die Zusatzausmitte für  $\lambda = 10$  beträgt nach Gl. 3-7  $f = d/18$ . Demnach ergibt sich die für die Bemessung maßgebende Randspannung zu

$$\sigma(\lambda = 10) = \frac{N}{A} \cdot (1 + 6f/d) = \sigma(\lambda = 0) \cdot (1 + 1/3) = 4/3 \cdot \sigma(\lambda = 0) \quad \text{Gl. 3-35}$$

Der in DIN 1053-100: 2004 verwendete charakteristischen Werte der Druckfestigkeit  $f_k$  wurde aus den Rechenwerten bzw. aus den Grundwerten der zulässigen Druckspannungen abgeleitet.

$$\beta_R = \eta \cdot f_k = 0,85 \cdot f_k \quad \text{Gl. 3-36}$$

$$f_k = \alpha \cdot \frac{\gamma_{gl}}{\eta} \cdot \sigma_0 = \frac{4}{3} \cdot \frac{2}{0,85} \cdot \sigma_0 = 3,14 \cdot \sigma_0 \quad \text{Gl. 3-37}$$

Der Einfluss der Langzeitbelastung wird durch den Dauerstandsfaktor  $\eta = 0,85$  berücksichtigt, der im Rechenwert  $\beta_R$  von DIN 1053-1 bereits eingerechnet war.

Nach DIN 1053-1 wird der Tragsicherheitsnachweis im genaueren Verfahren mit folgender Bemessungsgleichung geführt:

$$N_{vorh} \leq N_{zul} = \Phi \cdot A \cdot \frac{\beta_R}{\gamma_{gl}} \quad \text{Gl. 3-38}$$

Darin ist  $\Phi$  der Traglastabminderungsfaktor infolge Knicken, der in Kapitel 3.2 und 3.3 ausführlich dargestellt wurde.

Im Gegensatz dazu lautet die Nachweisgleichung für eine Bemessung nach DIN 1053-100: 2004:

$$\begin{aligned}
 N_{Ed} \leq N_{Rd} & \Rightarrow \gamma_E \cdot N_{Ek} \leq \frac{N_{Rk}}{\gamma_M} \\
 N_{Ek} \leq \frac{\Phi \cdot A \cdot f_k \cdot \eta}{\gamma_M \cdot \gamma_E} & \Rightarrow N_{Ek} \leq \Phi \cdot A \cdot \frac{f_k \cdot \eta}{\gamma_{gl, DIN 1053-100}}
 \end{aligned}
 \tag{Gl. 3-39}$$

Der charakteristische Wert der einwirkenden Normalkraft ist dabei gleich dem  $N_{vorh}$  des globalen Sicherheitskonzeptes. Aus den Gleichungen 3-38 und 3-39 wird deutlich, dass die Unterschiede bezüglich der Tragfähigkeit einerseits im unterschiedlichen Traglastabminderungsfaktor, andererseits lediglich in der abweichenden Größe des globalen Teilsicherheitsbeiwertes begründet sind. Dies gilt allerdings nur dann, wenn die maßgebende Lastfallkombination der Lastfall Volllast ist, was beim Knicksicherheitsnachweis bei geringen planmäßigen Lastausmitten der Fall ist.

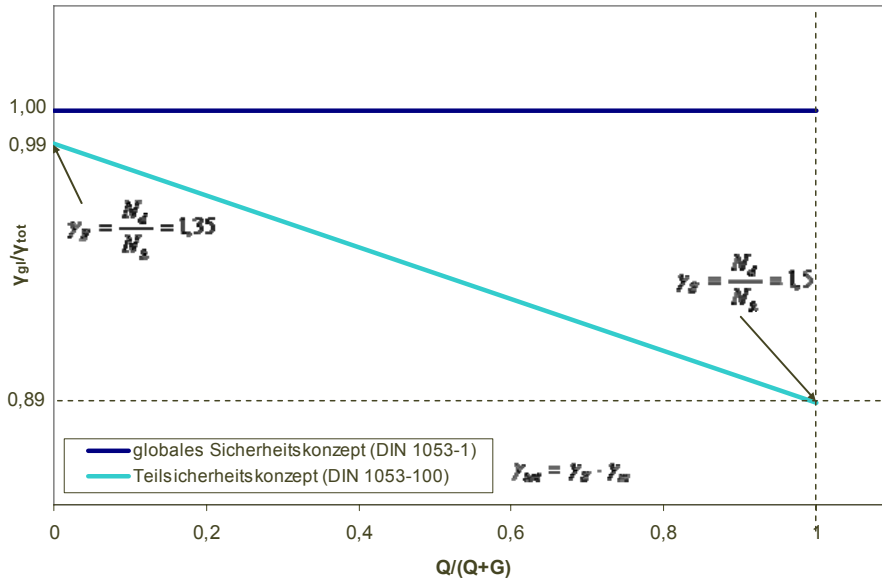
Aus den Gleichungen 3.38 und 3.39 wird ersichtlich, dass sich Differenzen zwischen DIN 1053-1 und DIN 1053-100 bezüglich des unterschiedlichen Sicherheitskonzeptes durch das Verhältnis der beiden globalen Sicherheitsfaktoren  $\gamma_{glob,1053-1} / \gamma_{glob,1053-100}$  darstellen lassen. Der globale Sicherheitsfaktor nach DIN 1053-1 beträgt  $\gamma_{gl, 1053-1} = 2,0$ . Bei einer Bemessung nach dem Teilsicherheitskonzept nach DIN 1053-100 sind die Sicherheitsbeiwerte der Einwirkungsseite mit denen der Lastseite zu multiplizieren. Der globale Sicherheitsabstand nach DIN 1053-100 hängt dabei vom Verhältnis der ständigen Einwirkungen zur Gesamteinwirkung ab. Das folgende Diagramm veranschaulicht die Auswirkungen des Verhältnisses von Verkehrslast zu Gesamtlast bei der Bemessung nach dem Teilsicherheitskonzept. Während der globale Sicherheitsfaktor im „alten“ Nachweisverfahren konstant mit  $\gamma_{gl, DIN 1053-1} = 2,0$  angesetzt wurde, differiert dieser Wert bei einer Bemessung nach dem Teilsicherheitskonzept zwischen den Grenzen

$$\gamma_{gl, DIN 1053-100} = \gamma_M \cdot \gamma_E = 1,5 \cdot 1,35 = 2,025$$

$$\gamma_{gl, DIN 1053-100} = \gamma_M \cdot \gamma_E = 1,5 \cdot 1,50 = 2,25.$$

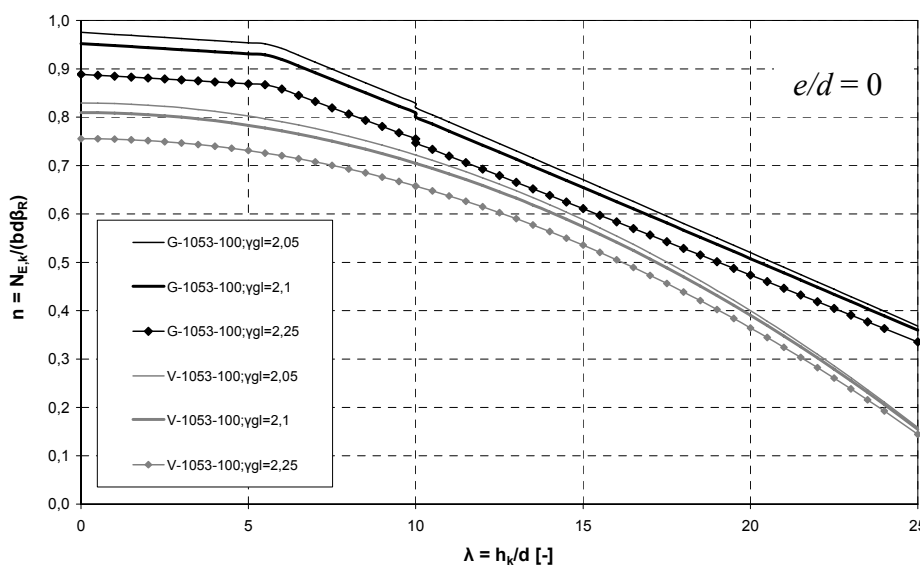
Der erste Wert ergibt sich bei einer reinen Beanspruchung infolge ständiger Lasten. Der zweite Wert beschreibt den theoretischen Fall einer Belastung, die ausschließlich aus einer Verkehrslast resultiert. Je höher der globale Sicherheitsbeiwert wird, desto geringer werden folglich die aufnehmbaren Tragfähigkeiten. Bezogen auf eine Bemessung mit dem globalen Sicherheitskonzept sind beim Nachweis mit dem Teilsicherheitskonzept bei zentrischer Belas-

ung bei einer reinen Querschnittsbetrachtung theoretisch maximal 11 % Traglasteinbußen zu verzeichnen.



**Abbildung 3.11: Einfluss des Verhältnisses Verkehrslast zu Gesamtlast auf die Sicherheitsfaktoren beim Nachweis nach dem Teilsicherheitskonzept im Vergleich zum globalen Sicherheitskonzept**

Die Abbildung 3.12 verdeutlicht nochmals die Differenzen der aufnehmbaren Tragfähigkeiten in Abhängigkeit der Schlankheit. Es wird deutlich, dass mit zunehmender Schlankheit das Verhältnis von Verkehrslast zu Gesamtlast an Bedeutung verliert.



**Abbildung 3.12: Bezogene Tragfähigkeit nach DIN 1053-100 in Abhängigkeit der Schlankheit bei planmäßig zentrischer Beanspruchung und unterschiedlichen Verkehrslastanteilen**

Verknüpft man die Unterschiede, sich aus den unterschiedlichen Sicherheitskonzepten ergeben mit den Abweichungen infolge des Schlankheitseinflusses, können die bezogenen Tragfähigkeiten nach Abbildung 3.13 dargestellt werden. Die Darstellung gilt für eine planmäßig zentrische Belastung in Wandmitte sowie einem Verhältnis von ständigen Einwirkungen zur Gesamteinwirkung von  $2/3$ . Daraus resultiert dann ein globaler Sicherheitsbeiwert von  $\gamma_{gl, \text{DIN 1053-100}} = 2,1$ .

Es wird deutlich, dass das genauere Bemessungsverfahren nach DIN 1053-1: 1996 für  $e/d = 0$  stets höhere Traglasten liefert als das entsprechende Bemessungsverfahren nach DIN 1053-100. Ursache ist u.a. auch die deutlich auf der unsicheren Seite liegende Festlegung der Mauerwerksfestigkeit bei kleinen Lastexzentrizitäten nach DIN 1053-1: 1996.

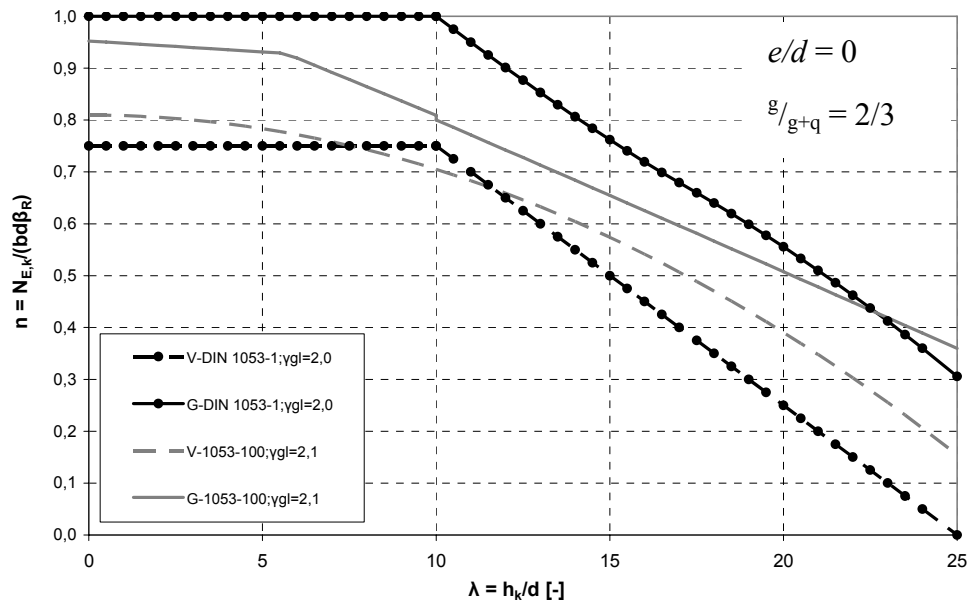


Abbildung 3.13: Bezojene Tragfähigkeit nach DIN 1053-1 und DIN 1053-100 in Abhängigkeit der Schlankheit bei planmäßig zentrischer Belastung

### 3.5 Einfluss der Mauerwerksart

Sowohl das „vereinfachte“ Verfahren als auch das „genauere“ Verfahren nach DIN 1053-1 bzw. DIN 1053-100 unterscheidet bei der Bemessung nur geringfügig zwischen den Mauerwerksarten, da die Grundwerte der zulässigen Druckspannung  $\sigma_0$  bzw. die charakteristischen Druckfestigkeiten  $f_k$  bei Verwendung von Normalmörtel in Abhängigkeit der Steinfestigkeitsklasse und der Mörtelgruppe angegeben werden. Beim Einsatz von Leichtmörteln und Dünnbettmörteln sind die Wärmeleitfähigkeit bzw. das Steinformat zu berücksichtigen. Folglich fließt die Mauerwerksart im Allgemeinen nur indirekt in die Bemessung ein, da die vorhandenen Steinfestigkeitsklassen die Eigenschaften der Mauerwerksart bezüglich der Druckfestigkeit charakterisieren. Im Folgenden wird der Einfluss der Berücksichtigung unterschiedlicher Endkriechzahlen näher untersucht.

Sowohl das „genauere“ Verfahren nach DIN 1053-1 als auch das „genauere“ Verfahren gemäß DIN 1053-100 berücksichtigen innerhalb einer Bemessung die Verformungseigenschaften des Mauerwerks.

Wie in Kapitel 3.2 in dargestellt, kann die Zusatzausmitte nach Theorie II.Ordnung mit Gleichung 3-6 bestimmt werden. Mit einem für alle Mauerwerksarten angesetzten Rechenwert der Endkriechzahl von  $\varphi_\infty = 4/3$  folgt daraus die in der Norm enthaltene Gleichung zur Ermittlung der Zusatzausmitte infolge Kriechen und Imperfektion im Knicksicherheitsnachweis (siehe Gleichung 3-7). Mit Gl. 3-13 folgt für „e+f“ > d/6 die bezogene Tragfähigkeit zu

$$n = \frac{N_{E,k}}{bd\beta_R} = \frac{3 - m_g}{3} \quad \text{Gl. 3-40}$$

mit  $m_g$  nach Gl. 3-8.

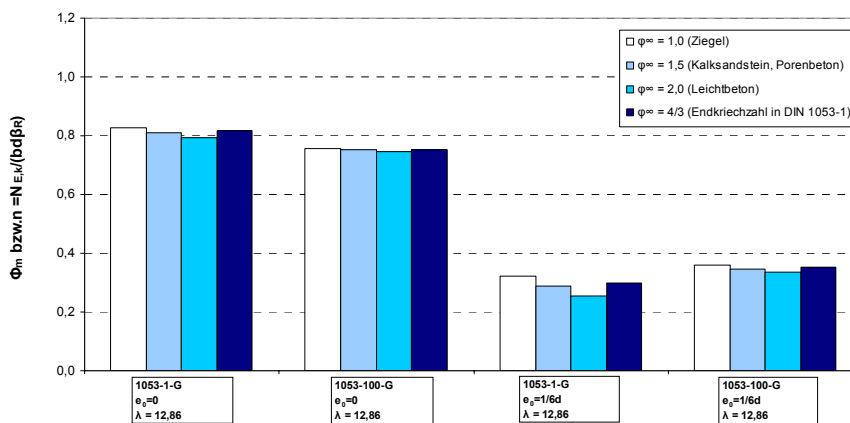
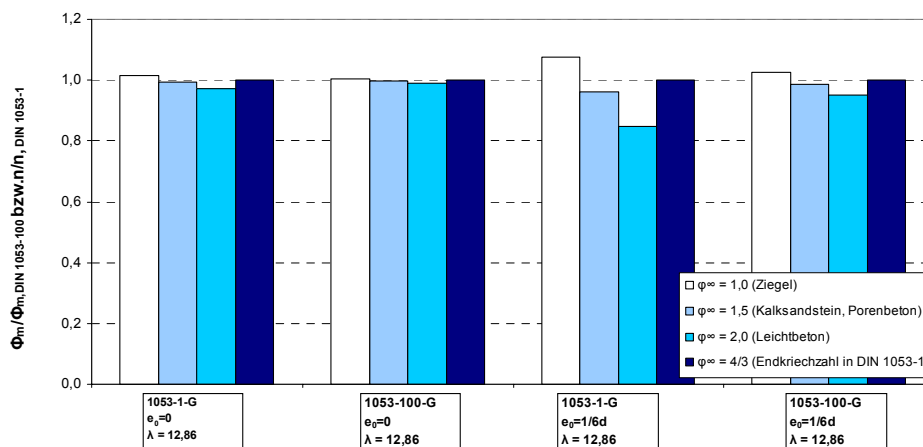
Für die Berechnung der Zusatzausmitte sowie die bezogene Tragfähigkeit nach DIN 1053-100 gelten die Gleichungen Gl. 3-22 bis Gl. 3-25.

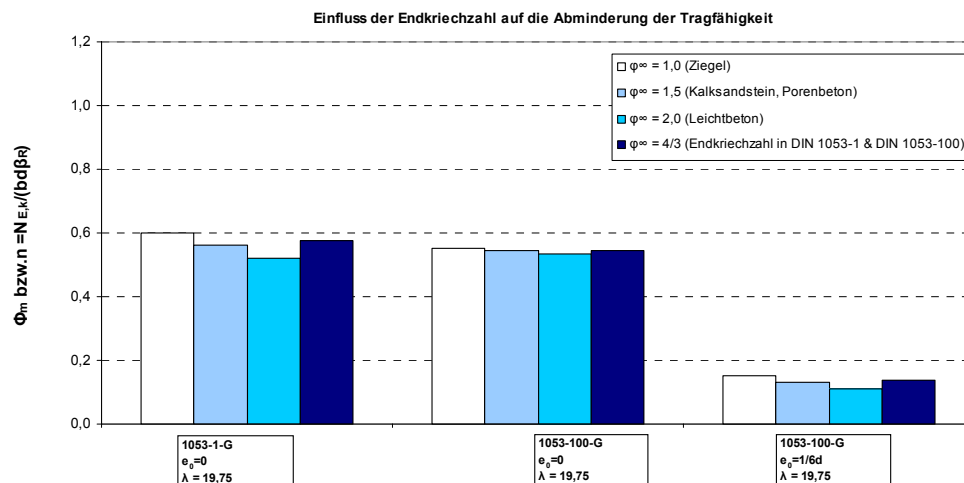
Die Auswirkungen auf die Tragfähigkeit unter Einbeziehung unterschiedlicher Endkriechzahlen sollen im Folgenden anhand von Wänden mit einer Knicklänge  $h_k = 2,25$  m sowie Wanddicken  $d = 11,5$  cm bzw.  $d = 17,5$  cm untersucht werden. Die untenstehende Tabelle enthält die in der Norm angegebenen Rechenwerte der Endkriechzahlen für die üblichen Mauerwerksarten.

**Tabelle 3.3: Rechenwerte der Endkriechzahlen gemäß Tabelle 2: DIN 1053-1 bzw. Tabelle 3: DIN 1053-100**

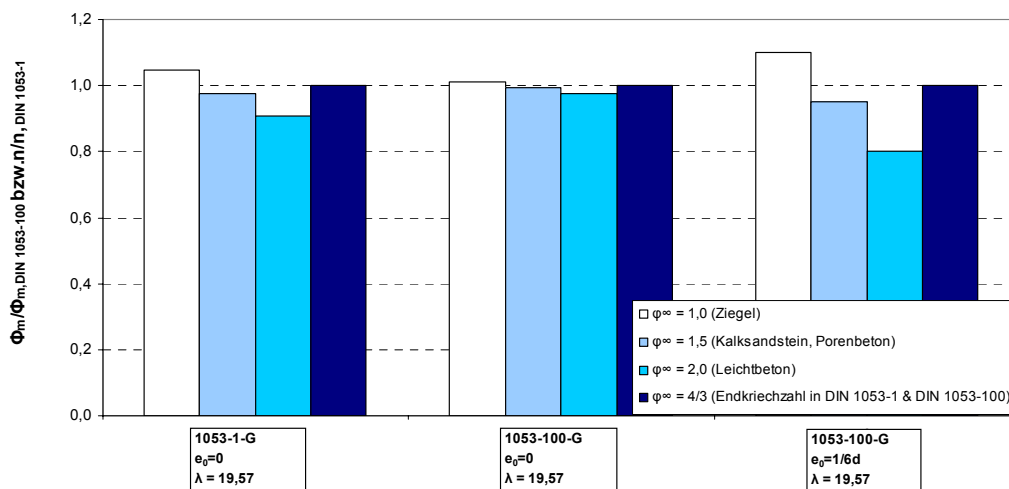
Mauerwerksart	Ziegel	Kalksandstein, Porenbeton	Leichtbeton
Rechenwert der Endkriechzahl $\varphi_{\infty}$	1,0	1,5	2,0

Je nach Exzentrizität der Lasteinleitung ergeben sich nach den einzelnen Verfahren die in den folgenden Diagrammen dargestellten bezogenen Tragfähigkeiten. Anzumerken ist, dass nur zulässige Ergebnisse abgebildet werden, so dass bei einer Schlankheit  $\lambda = 19,57$  ( $h_k = 2,25$  m,  $d = 11,5$  cm) nicht mehr jedes Diagramm alle Nachweisverfahren enthält.

**Abbildung 3.14: Einfluss der Endkriechzahl auf die Abminderung der Tragfähigkeit bei einer Schlankheit  $\lambda=12,86$** **Abbildung 3.15: Einfluss der Endkriechzahl auf die Abminderung der Tragfähigkeit bezogen auf eine Abminderung mit  $\varphi_{\infty}=4/3$  bei einer Schlankheit  $\lambda=12,86$**



**Abbildung 3.16:** Einfluss der Endkriechzahl auf die Abminderung der Tragfähigkeit bei einer Schlankheit  $\lambda=19,75$



**Abbildung 3.17:** Einfluss der Endkriechzahl auf die Abminderung der Tragfähigkeit bezogen auf eine Abminderung mit  $\varphi^\infty=4/3$  bei einer Schlankheit  $\lambda=19,75$

Es ist zu erkennen, dass der Einfluss der Kriechzahl mit zunehmender Lastexzentrizität an Bedeutung gewinnt, wobei die Differenzen der Abminderungsfaktoren untereinander bei größeren Schlankheiten zunehmen.



Die Ergebnisse bestätigen die Berücksichtigung unterschiedlicher Endkriechzahlen im „genaueren“ Verfahren nach DIN 1053-100: 2004, da die Tragfähigkeiten der einzelnen Mauersteinarten besser ausgenutzt werden können. Während der Einfluss bei zentrischer Belastung bei der gewählten Steifigkeitsklasse gering erscheint, wird darauf hingewiesen, dass sich bei hohen Steifigkeitsklassen größere Unterschiede ergeben können. Das günstige Kriechverhalten von Wänden aus Ziegel wird bei einer Bemessung nach DIN 1053-1 nicht ausgenutzt, wohingegen das Kriechverhalten von Mauerwerk aus Kalksandsteinen sowie Leichtbeton zu günstig beurteilt werden.

## 4 Klassifizierung von Mauerwerkswänden nach DIN 4102-4

### 4.1 Allgemeines

Nach derzeitigem Normungsstand fehlen für den Bereich des Mauerwerkbaus konsistente Nachweisverfahren, die eine Bemessung bei Umgebungstemperatur und eine anschließende rechnerische Bemessung für den Brandfall nach dem semiprobabilistischen Sicherheitskonzept ermöglichen. Zwar wurde mit der Einführung der DIN 4102-22: 2004 die normative Grundlage zur Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes bei der „Kaltbemessung“ und darauf aufbauender „Heißbemessung“ für sämtliche Bauteile geschaffen, doch ist für Bauteile aus Mauerwerk im Brandfall noch keine Umstellung auf das neue Nachweiskonzept erfolgt.

Die Konsequenz ist, dass für die heiße Bemessung momentan eine Parallelbemessung DIN 1053-100: 2004 und DIN 1053-1: 1996 durchgeführt werden muss. Dies bedeutet einerseits einen größeren Planungsaufwand, andererseits können die Vorteile der DIN 1053-100: 2004 bezüglich der Tragfähigkeit bei der heißen Bemessung nicht genutzt werden.

Als Grundlage für das weitere Vorgehen werden kurz die wesentlichen Unterschiede des globalen und des semiprobabilistischen Sicherheitskonzeptes bezüglich der außergewöhnlichen Einwirkung Brand dargestellt.

Der Brandfall ist eine außergewöhnliche Situation, die nur mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit innerhalb der Nutzungsdauer eines Gebäudes auftritt. Für eine außergewöhnliche Situation werden im Vergleich zur Situationen des normalen Betriebes geringere Sicherheitsanforderungen an die Auslegung von Bauteilen gestellt. So sieht das Sicherheitskonzept für die Bemessung im Brandfall gemäß DIN 1053-1 in Verbindung mit DIN 4102-4 vor, dass der rechnerische globale Sicherheitsbeiwert zu  $\gamma_{gl,fi} = 1,0$  angenommen werden konnte. Die Bemessungsgleichung für diesen Fall lautet demnach:

$$N_{vorh} \leq N_{zul,fi} \quad \text{Gl. 4-1}$$

Darin ist  $N_{vorh}$  die vorhandene Einwirkung, sie entspricht der charakteristischen Einwirkung  $N_{Ek}$  nach dem semi-probabilistischen Sicherheitskonzept.  $N_{zul,fi}$  stellt den Bauteilwiderstand im Brandfall dar. Die Belastungen, die bei der Durchführung des Brandversuchs unter Einhaltung der in DIN 4102-2 geforderten Kriterien im Versuch nachgewiesen werden können, entsprechen damit dem Bauteilwiderstand im Brandfall. Der Nachweis gilt damit ohne weitere Verwendung eines Sicherheitsbeiwertes (entspricht  $\gamma_{gl,fi} = 1,0$ ) als erbracht.

Die Philosophie, dass für eine außergewöhnliche Bemessungssituation ein geringerer Sicherheitsabstand zwischen Einwirkung und Widerstand anzusetzen ist, schlägt sich auch in DIN 1055-100 nieder. Für den Nachweis der Tragfähigkeit im Brandfall darf der Teilsicherheitsbeiwert für den Bauteilwiderstand  $\gamma_{M,A}$  und die Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen  $\gamma_{E,i,A}$  mit reduzierten Werten angenommen werden.

Veränderliche Einwirkungen werden in der außergewöhnlichen Bemessungssituation mit den zugehörigen Kombinationsbeiwerten berücksichtigt. Die vorherrschende veränderliche Einwirkung wird dabei mit dem häufigen Wert  $\psi_{1,1}$ , jede weitere veränderliche Einwirkung mit ihrem quasi-ständigen Wert  $\psi_{2,j}$  abgemindert. Bei Büro- und Wohnräumen gilt für die Verkehrslast im Allgemeinen der Kombinationsbeiwert  $\psi_1 = 0,5$ .

$$E_{d,fi} = \sum_{j \geq 1} \gamma_{GA,j} \cdot G_{k,j} \oplus \gamma_{PA} \cdot P_k \oplus A_d \oplus \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad \text{Gl. 4-2}$$

mit:  $E_{d,fi}$  Bemessungswert einer Schnittgröße im Brandfall

$\gamma_{GA,j} = 1,0$  siehe DIN 1055-100, Tabelle A.3

$\gamma_{PA} = 1,0$  siehe DIN 1055-100, Tabelle A.3

$A_d =$  Temperatureinwirkung  $T_d(ETK)$  nach DIN 4102-2: in der Regel über die Widerstandsseite berücksichtigt.

Die außergewöhnliche Einwirkung  $T_d(ETK)$  wird im Regelfall nicht auf der Einwirkungsseite, sondern ausschließlich über die temperaturabhängige Abnahme der Festigkeit und Steifigkeit auf der Bauteilwiderstandsseite erfasst. Nur in Ausnahmefällen ist eine Berücksichtigung der thermischen Dehnungen auf der Einwirkungsseite erforderlich.

Der Bemessungswert der einwirkenden Normalkraft ergibt somit sich mit der vereinfachten Annahme von nur einer veränderlichen Einwirkung zu:

$$N_{Ed} = \sum_{j > 1} \gamma_{GA,j} \cdot N_{G,k,j} \oplus \psi_{1,1} \cdot N_{Q,k,1} \quad \text{Gl. 4-3}$$

In Abhängigkeit des Verhältnisses von ständigen und veränderlichen Lasten zur gesamten charakteristischen Normalkraft  $N_{E,k}$  und mit  $\gamma_{GA} = 1,0$  lässt sich Gl. 4-3 in die nachstehende Gleichung überführen. Das Herausstellen der Größe  $N_{E,k}$  ermöglicht dabei einen direkten Ver-

gleich der Einwirkungen nach dem globalen Sicherheitskonzept mit denen des Teilsicherheitskonzeptes

$$N_{Ed} = N_{E,k} \cdot (\zeta + \psi_{1,1} \cdot (1 - \zeta))$$

mit  $\zeta = \frac{N_{G,k}}{N_{G,k} + N_{Q,k}}$  Gl. 4-4

Alternativ dazu kann die maßgebende Einwirkung im Brandfall vereinfachend über einen Abminderungsfaktor  $\eta_{fi}$  aus dem Bemessungswert der Einwirkung bei Normaltemperatur bestimmt werden.

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} \cdot E_{d,kalt} \quad \text{Gl. 4-5}$$

$$\eta_{fi} = \frac{E_{d,fi}}{E_{d,kalt}} = \frac{G_k + \psi_1 \cdot Q_{k1}}{\gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_{k1}} = \frac{1 + \psi_1 \cdot \xi}{\gamma_G + \gamma_Q \cdot \xi} = \frac{1,0 + 0,5 \cdot \xi}{1,35 + 1,5 \cdot \xi} \quad \text{Gl. 4-6}$$

mit:  $\xi = Q_{k1} / G_k$

Auf der sicheren Seite liegend darf gemäß DIN 4102-22 stets angenommen werden:

$$\eta_{fi} = 0,7 \cdot E_{d,kalt} \quad \text{Gl. 4-7}$$

Für die Bestimmung des Bauteilwiderstandes wird gemäß DIN 1053-100 bei Mauerwerk für die außergewöhnliche Bemessungssituationen ein Teilsicherheitsfaktor  $\gamma_{M,A} = 1,3$  angesetzt. Hinsichtlich der Ausnutzung der Spannungen ist weiterhin zu beachten, dass der Brandfall eine kurzzeitige Einwirkung darstellt und daher der Dauerlastfaktor  $\eta$  zu 1,0 angenommen werden kann. Für den Bauteilwiderstand bedeutet dies:

$$f_{d,fi} = \frac{\eta \cdot f_{k,fi}}{\gamma_{M,A}} = \frac{f_{k,fi}}{1,3} \quad \text{Gl. 4-8}$$

Darin bezeichnet  $f_{k,fi}$  den charakteristischen Wert der Druckfestigkeit von Mauerwerk zum betrachteten Zeitpunkt im Brandfall. Er ist abhängig von einer Vielzahl von Faktoren, im Wesentlichen von der Temperaturverteilung im Bauteil. Dies ist allerdings eher ein theoretischer

Wert, da der charakteristische Wert der Festigkeit momentan normativ nicht in Abhängigkeit der Branddauer bzw. der Bauteiltemperatur angegeben werden kann. Ein rein rechnerischer Nachweis der Standsicherheit im Brandfall ist demnach im Mauerwerksbau momentan auf normativer Grundlage nicht möglich. Der Nachweis muss also nach wie vor auf Basis von Brandversuchen geführt werden. Die Bemessungsgleichung für den Nachweis im Brandfall gilt:

$$N_{Ed,fi} \leq N_{Rd,fi} \Rightarrow N_{Ek} \cdot (\zeta + \psi_{1,1} \cdot (1 - \zeta)) \leq \frac{N_{Rk,fi}}{\gamma_{M,fi}} \quad \text{Gl. 4-9}$$

Darin ist  $N_{Rk,fi}$  in Analogie zur Bemessungsgleichung des globalen Sicherheitskonzeptes die Tragfähigkeit, die aus dem Brandversuch stammt. Der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,fi}$  müsste formal gemäß DIN 1053-100 mit  $\gamma_{M,fi} = \gamma_{M,A} = 1,3$  angesetzt werden.

Allerdings kann zu Vergleichszwecken mit dem globalen Sicherheitskonzept ebenfalls ein globaler Sicherheitsabstand im Brandfall nach dem Teilsicherheitskonzept angegeben werden:

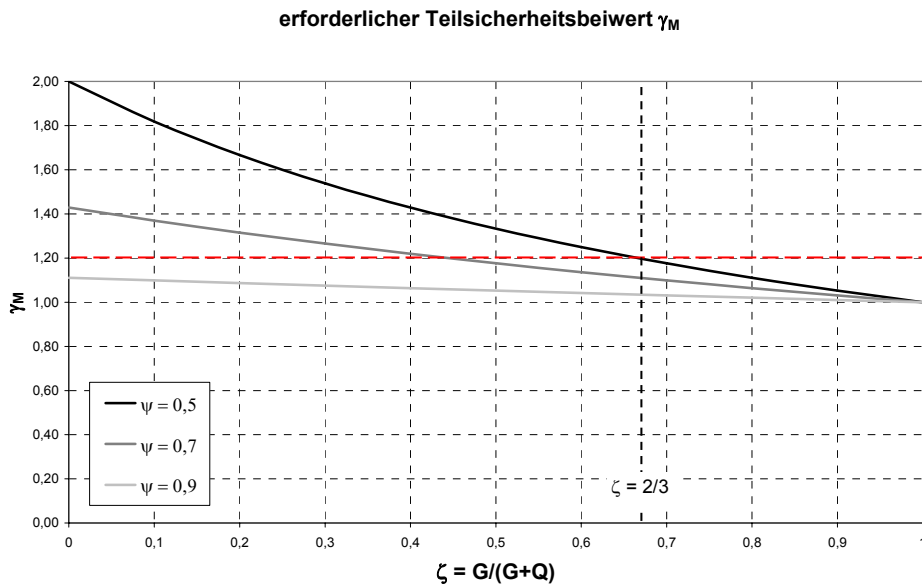
$$\gamma_{gl,fi} = (\zeta + \psi_{1,1} \cdot (1 - \zeta)) \cdot \gamma_{M,fi} \quad \text{Gl. 4-10}$$

Mit Gleichung 4-10 kann der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,fi}$  am bestehenden globalen Sicherheitsfaktor kalibriert werden, indem  $\gamma_{gl,fi}$  zu 1,0 gesetzt wird. Für im Mauerwerksbau übliche Belastungsverhältnisse von  $\zeta = 2/3$  und  $\psi_{1,1} = 0,5$  ergibt sich damit

$$\gamma_{M,fi} = \frac{1}{\zeta + \psi_{1,1} \cdot (1 - \zeta)} = \frac{1}{\frac{2}{3} + 0,5 \cdot \left(1 - \frac{2}{3}\right)} = 1,2 \quad \text{Gl. 4-11}$$

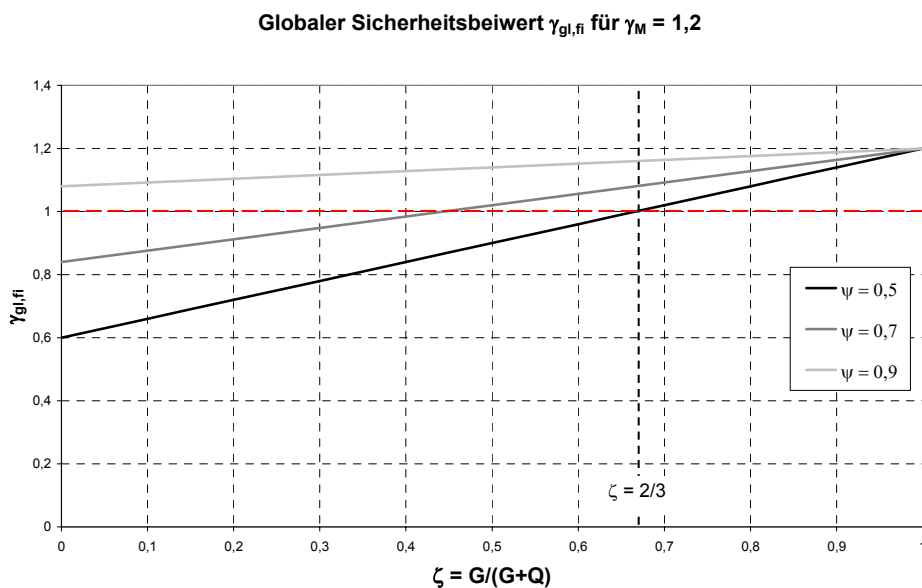
Es zeigt sich also, dass für übliche Verhältnisse ein Teilsicherheitsbeiwert von  $\gamma_{M,fi} = 1,2$  ausreicht, um das derzeit für zulässig erachtete Zuverlässigkeitsniveau zu gewährleisten.

Theoretisch ergibt sich in Abhängigkeit des Lastverhältnisses und des Kombinationsbeiwertes jedoch ein variabler Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,fi}$ , der in Abbildung 4.1 dargestellt ist.

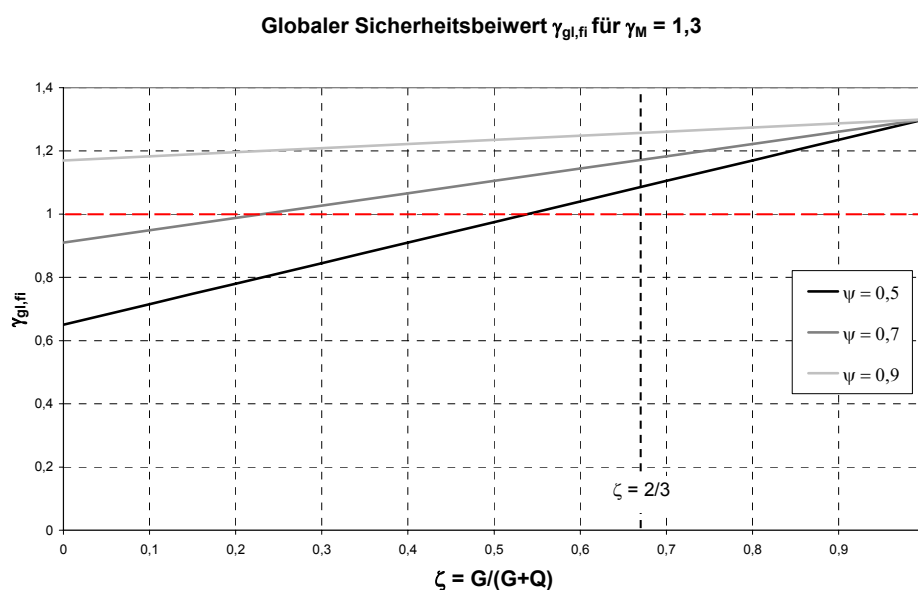


**Abbildung 4.1:** Erforderlicher Teilsicherheitsbeiwert für den Brandfall zur Erreichung des bisherigen Sicherheitsniveaus in Abhängigkeit des Lastverhältnisses und des Kombinationsbeiwertes  $\psi$

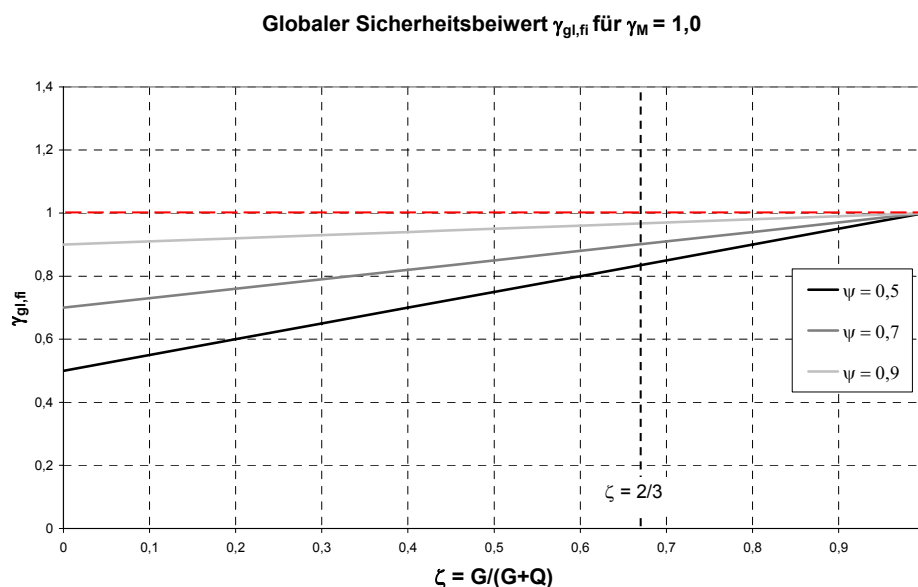
Ein variabler Teilsicherheitsbeiwert widerspricht jedoch der Philosophie des semi-probabilistischen Sicherheitskonzeptes. Bei Ansatz eines konstanten Teilsicherheitsbeiwertes  $\gamma_{M,fi}$ , ergibt sich nach der Definition für  $\gamma_{gl,fi}$  nach Gleichung 4.10 ein variabler globaler Sicherheitsfaktor. Dieser ist für die Werte  $\gamma_{M,fi} = 1,2$ ,  $\gamma_{M,fi} = 1,3$  und  $\gamma_{M,fi} = 1,0$  in den Abbildungen 4.2 bis 4.4 dargestellt.



**Abbildung 4.2:** Globaler Sicherheitsbeiwert für den Brandfall nach dem Teilsicherheitskonzept in Abhängigkeit des Lastverhältnisses und des Kombinationsbeiwertes  $\psi$  für einen Teilsicherheitsbeiwert auf der Materialeite von  $\gamma_M = 1,2$



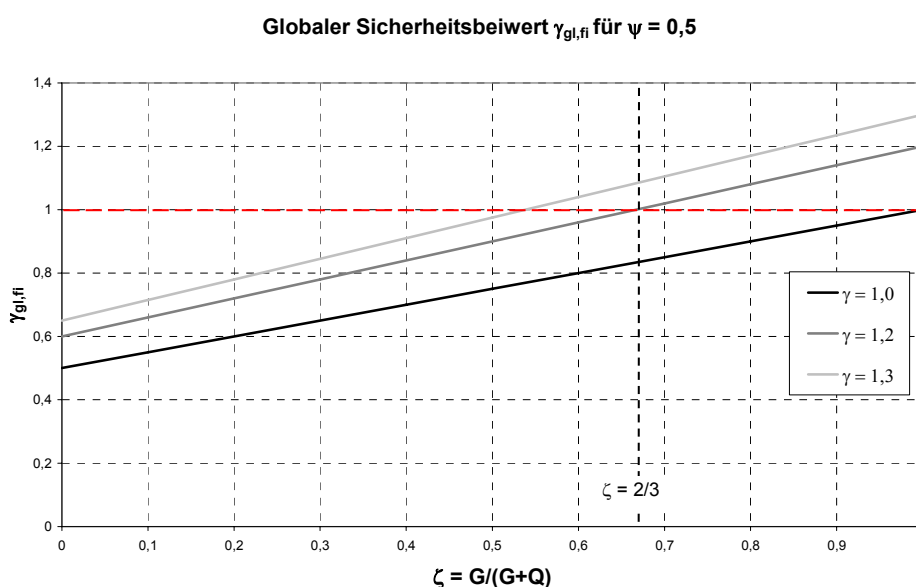
**Abbildung 4.3:** Globaler Sicherheitsbeiwert für den Brandfall nach dem Teilsicherheitskonzept in Abhängigkeit des Lastverhältnisses und des Kombinationsbeiwertes  $\psi$  für einen Teilsicherheitsbeiwert auf der Materialeite von  $\gamma_M = 1,3$



**Abbildung 4.4:** Globaler Sicherheitsbeiwert für den Brandfall nach dem Teilsicherheitskonzept in Abhängigkeit des Lastverhältnisses und des Kombinationsbeiwertes  $\psi$  für einen Teilsicherheitsbeiwert auf der Materialeite von  $\gamma_M = 1,0$

Die zuvor dargestellten Abbildungen veranschaulichen die differierenden globalen Sicherheitsfaktoren bei einem unterschiedlichen Ansatz der Teilsicherheitsbeiwerte für die Bau-

stoffeigenschaften. Dementsprechend würde der in DIN 1053-100: 2004 mit  $\gamma_M = 1,3$  vorgegebene Teilsicherheitsbeiwert ungünstigere, das heißt größere Ausnutzungsfaktoren  $\alpha_2$ , als der im Vorschlag nach [25] angesetzte Sicherheitsbeiwert für die Bauteilfestigkeit von  $\gamma_M = 1,2$  liefern (siehe Kapitel 4.3). Die Differenz der resultierenden globalen Sicherheitsbeiwerte ist allerdings vernachlässigbar gering, sodass der Ansatz von  $\gamma_M = 1,2$  vertretbar erscheint. Außerdem erscheint die Erfordernis eines größeren globalen Sicherheitsbeiwertes bei ansonsten gleichen Randbedingungen nicht nachvollziehbar, insbesondere vor dem Hintergrund, dass mit  $\gamma_M = 1,2$  das bisherige Zuverlässigkeitsniveau gewährleistet ist.



**Abbildung 4.5: Globaler Sicherheitsbeiwert für den Brandfall nach dem Teilsicherheitskonzept in Abhängigkeit des Lastverhältnisses und des Teilsicherheitsbeiwertes auf der Materialseite  $\gamma_M$  für einen Kombinationsbeiwertes  $\psi = 0,5$**

Ein Ansatz von  $\gamma_M = 1,0$ , wie er u.a. im Eurocode 6 vorgesehen ist und z.T. im Betonbau verwendet wird [26][27], würde zwar erwartungsgemäß zu einer spürbaren Abminderung des Ausnutzungsfaktors  $\alpha_2$  führen (siehe Abbildung 4.4 und Abbildung 4.5), jedoch scheint ein Ansatz dieses Teilsicherheitsbeiwertes ohne weitere sicherheitstheoretische Überlegungen nicht gerechtfertigt.

Die Ergebnisse der Untersuchung des Einflusses des Verhältnisses von ständigen Lasten zu Verkehrslasten auf den globalen Sicherheitsfaktor zeigen theoretisch relativ große Unterschiede von bis zu 40 %. Für wirklichkeitsnahe Lastverhältnisse zwischen  $0,5 \leq \zeta \leq 0,8$  liegen die Abweichungen jedoch unterhalb von lediglich 10 %, sodass hier eine differenzierte Betrachtung der Lastverhältnisse nur in Ausnahmefällen sinnvoll ist.



## 4.2 Definition des Ausnutzungsgrades $\alpha_2$ nach DIN 4102: 1994

### 4.2.1 Grundlagen

In DIN 4102-4, Abschnitt 4.5.2.2 wird der Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2$  als „...das Verhältnis der vorhandenen Beanspruchung zu der zulässigen Beanspruchung nach DIN 1053 Teil 1 ( $\sigma_{vorh} / \sigma_{zul}$ )...“ beschrieben. Im Normtext fehlt jedoch eine explizite Angabe, auf welche Ausgabe von DIN 1053-1 der Anwender diese Definition zu beziehen hat, so dass auf die zum Zeitpunkt der Herausgabe von DIN 4102: 1994 gültige Version geschlossen werden kann. Demzufolge wäre dann DIN 1053-1: 1990 die heran zuzuziehende Mauerwerksnorm.

Neben dem in DIN 1053-1 beschriebenen „vereinfachten“ Verfahren, kann gemäß DIN 4102-4: Abschnitt 4.5.1.1 das „genauere“ Verfahren nach DIN 1053-2: 1984 zur Ermittlung des Ausnutzungsfaktors  $\alpha_2$  angewendet werden.

Eine Bestimmung des Ausnutzungsfaktors  $\alpha_2$  nach DIN 1053-2 ist kritisch zu hinterfragen, da in den durchgeführten Brandversuchen mit einer Exzentrizität von  $e/d = 0$  als Prüflasten stets die sich nach dem vereinfachten Verfahren ergebenden geringeren Tragfähigkeiten verwendet wurden. In sämtlichen vorliegenden Daten aus Untersuchungsberichten zum Brandverhalten von Mauerwerkswänden wurde nämlich eine zulässige Druckspannung nach dem „vereinfachten“ Verfahren nach DIN 1053-1 dokumentiert, mit der die zugehörigen Ausnutzungsgrade  $\alpha_2$  berechnet wurden. Die Abweichungen zwischen den beiden Verfahren sind allerdings im praxisrelevanten Schlankheitsbereich zwischen  $\lambda = 10-20$  nicht so ausgeprägt, da bei einer Berechnung mit dem genaueren Verfahren nach DIN 1053-2: 1984 stets planmäßige Lastexzentrizitäten zu berücksichtigen sind. Dabei kommt der Größe der darin anzusetzenden Exzentrizität eine besondere Bedeutung zu. Die mit dem genaueren Verfahren nach DIN 1053-1: 1996 zulässigen höheren Tragfähigkeiten sind durch die bisherigen Brandversuche jedoch definitiv nicht abgedeckt (vgl. auch Kapitel 2.3.5).

Für den hier betrachteten Knicksicherheitsnachweis kann der Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2$  auf Basis des „vereinfachten“ Verfahrens wie folgt angegeben werden:

$$\alpha_2 = \frac{\text{vorh}\sigma}{\text{zul}\sigma} \quad \text{Gl. 4-12}$$

mit  $\text{vorh}\sigma = \frac{N_F}{b \cdot d} \quad \text{Gl. 4-13}$

$$\text{und} \quad \text{zul}\sigma = k \cdot \sigma_0 \quad \text{Gl. 4-14}$$

ergibt sich der Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2$  in Abhängigkeit der Schlankheit zu:

$$\alpha_2 = \frac{N_F}{b \cdot d \cdot \sigma_0} \quad \text{für } h_k/d \leq 10 \quad \text{Gl. 4-15}$$

$$\alpha_2 = \frac{15}{25 - h_k/d} \frac{N_F}{b \cdot d \cdot \sigma_0} \quad \text{für } 10 < h_k/d \leq 25 \quad \text{Gl. 4-16}$$

Darin ist

$N_F$  der Größtwert der Normalkraft am Wandfuß

$b$  die Wandlänge

$d$  die Wanddicke

$\sigma_0$  der Grundwert der zulässigen Druckspannung nach DIN 1053-1: 1996, Tabelle 4

$k$  Abminderungsbeiwert  $k = k_2$  nach Abschnitt 3.2

$h_k$  die Knicklänge der Wand nach DIN 1053-1: Abschnitt 6.7.2

#### 4.2.2 Beschränkung der Lastexzentrizität

Laut DIN 4102-4, Abschnitt 4.5.2.4 sind mit den für Mauerwerkswänden geltenden Tabellenwerken planmäßige Lastexzentrizitäten bis  $e/d = 1/6$  abgedeckt. Legt man die für die Erstellung der Tabellen durchgeführten Brandversuche zugrunde, ist die Größe dieser Exzentrizität jedoch nicht nachvollziehbar. Die konventionellen Brandversuche wurden i.d.R. mit zentrischer Belastung durchgeführt. Damit wurden, abgesehen von der lichten Wandhöhe, die Randbedingungen des vereinfachten Verfahrens eingehalten. In Kapitel 3.3 wurde aufgezeigt, welche Exzentrizität implizit im vereinfachten Verfahren enthalten ist. Legt man als Bezugswert das genauere Verfahren nach DIN 1053-2: 1984 zugrunde, erkennt man aus Abbildung 3.9, dass die im vereinfachten Verfahren implizit abgedeckten Exzentrizitäten deutlich kleiner sind als  $e/d = 1/6$ . Die „Beschränkung“ der Gültigkeit der Tabellenwerte von DIN 4102-4 auf den Grenzfall  $e/d < 1/6$  erscheint somit nicht gerechtfertigt. Eventuell wurden aber auch andere Abweichungen zwischen Brandversuch und realen Bauteilrandbedingungen (siehe z.B. Kapitel 2.3.5 bzw. 5.2), die auf der sicheren Seite liegen, bei der Festlegung dieser Regelung mit in die Bewertung eingeflossen sind.

Ebenso besteht die Möglichkeit, dass Erkenntnisse aus Brandwandversuchen bei dieser Festlegung berücksichtigt wurden, da im Rahmen der zugehörigen Bauteilversuche die Belastung mit einer Exzentrizität von  $e/d = 1/6$  durchgeführt werden.

### 4.3 Ermittlung des Ausnutzungsgrades $\alpha_2$ auf Basis des Teilsicherheitskonzeptes nach [25]

#### 4.3.1 Herleitung der Bestimmungsgleichung

Da die Lasten in den Brandversuchen, die der Erstellung der Tabellen zur Klassifizierung von Bauteilen aus Mauerwerk nach DIN 4102-4 zu Grunde lagen, nach dem „vereinfachten“ Verfahren nach DIN 1053-1 bestimmt wurden, ist bei weiterer Anwendung dieser Tabellen bei einer Kaltbemessung nach DIN 1053-100 der Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2$  auf dieses Bemessungsniveau umzurechnen. Im Folgenden wird die Herleitung des Vorschlages zur Bestimmung des Ausnutzungsfaktors  $\alpha_2$  auf Basis des Teilsicherheitskonzeptes nach [25] näher erläutert.

Wie in den vorangehenden Kapiteln dargestellt, unterscheidet sich die Bemessung von schlanken Mauerwerkswänden durch drei Einflussgrößen: das Sicherheitskonzept, der unterschiedliche Traglastabminderungsfaktor zur Berücksichtigung des Knickens und die Definition der Festigkeiten. In Kap. 3.4 wurde gezeigt, dass die unterschiedliche Definition der Mauerwerksfestigkeit keine Differenzen in der Bestimmung der Tragfähigkeit verursacht. Die Unterschiede liegen im Wesentlichen in der unterschiedlichen Berücksichtigung der Traglastabminderung infolge Knickens. Die Unterschiede im Sicherheitskonzept sind für den Nachweis schlanker Wände unter Längsdruckbeanspruchung vornehmlich formaler Natur, in Kapitel 3.4 wurden Abweichungen je nach Verhältnis von Eigengewicht und Verkehrslast von maximal 11% ermittelt. Ersetzt man nun in den Gleichungen 4.12 bis 4.16 den Grundwert der zulässigen Druckspannung  $\sigma_0$  durch den charakteristischen Wert der Druckfestigkeit  $f_k$  unter Berücksichtigung von Gl. 3-37 sowie Gl. 4.9 und Gl. 4.10, so erhält man für Schlankheiten  $\lambda = h_k/d < 10$ :

$$\begin{aligned}\alpha_2 &= 3,14 \cdot \frac{N_{Ek}}{b \cdot d \cdot f_k} \cdot k_0 \cdot [(\zeta + \psi_{1,1} \cdot (1 - \zeta)) \cdot \gamma_{M,fi}] \\ &= 3,14 \cdot \frac{N_{Ek}}{b \cdot d \cdot f_k} \cdot k_0 \cdot \gamma_{gl,fi}\end{aligned}\quad \text{Gl. 4-17}$$

Für Schlankheiten  $10 < h_k/d \leq 25$  gilt demnach:

$$\begin{aligned}\alpha_2 &= 3,14 \cdot \frac{15}{25 - \lambda} \cdot \frac{N_{Ek}}{b \cdot d \cdot f_k} \cdot k_0 \cdot [(\zeta + \psi_{1,1} \cdot (1 - \zeta)) \cdot \gamma_{M,fi}] \\ &= 3,14 \cdot \frac{15}{25 - \lambda} \cdot \frac{N_{Ek}}{b \cdot d \cdot f_k} \cdot k_0 \cdot \gamma_{gl,fi}\end{aligned}\quad \text{Gl. 4-18}$$

$k_0$  stellt in diesen Gleichungen einen Faktor zur Berücksichtigung unterschiedlicher Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M$  für Wände und kurze Wände gemäß DIN 1053-100 dar. Es gilt:  $k_0 = 1,0$  für Wände und  $k_0 = 1,25$  für Pfeiler und kurze Wände.

In Gleichung 4.10 wurde für eine Bemessung nach dem Teilsicherheitskonzept der globale Sicherheitsbeiwert für den Brandfall definiert, der in Gl. 4.17 und Gl. 4.18 natürlich ebenfalls eingeht. Kalibriert man diesen globalen Sicherheitsbeiwert am bestehenden Nachweiskonzept, dann ergibt sich für  $\gamma_{gl,fi} = 1,0$  (siehe auch Kapitel 4.1). Dabei ist zu beachten, dass bei Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes im Brandfall geringere Einwirkungen ( $N_{Ed} = N_{G,k,j} + \psi_{1,1} \cdot N_{Q,k,1}$ ) zu berücksichtigen sind, als im bisherigen globalen Nachweiskonzept. Daher sollte nach Meinung der Verfasser zur Gewährleistung des gleichen Zuverlässigkeitsniveaus bei Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes stets ein Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M = 1,2$  auf der Widerstandsseite verwendet werden. Der Ausnutzungsgrad  $\alpha_2$  vereinfacht sich dann entsprechend den nachstehend genannten Gleichungen zu:

$$\alpha_2 = 3,14 \cdot \frac{N_{Ek}}{b \cdot d \cdot f_k} \cdot k_0 \quad \text{für } \lambda \leq 10 \quad \text{Gl. 4-19}$$

$$\alpha_2 = 3,14 \cdot \frac{15}{25 - \lambda} \cdot \frac{N_{Ek}}{b \cdot d \cdot f_k} \cdot k_0 \quad \text{für } 10 < \lambda \leq 25 \quad \text{Gl. 4-20}$$

Sollte sich mit diesen Gleichungen ein Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2 > 1$  ergeben, bedeutet dies, dass eine Klassifizierung der Wand in eine Feuerwiderstandsklasse mit den Tabellen nach DIN 4102-4 nicht möglich ist. Abhilfe kann dann entweder durch Wahl einer höheren Mauerwerksfestigkeitsklasse oder durch Vergrößerung der Querschnittsabmessungen geschaffen werden.

### 4.3.2 Anwendungsbeispiel

Zur Veranschaulichung wird die Bestimmung des Ausnutzungsfaktors nach dem Vorschlag aus [25] zur Bemessung im Brandfall auf Basis des Teilsicherheitskonzeptes anhand eines Beispiels durchgeführt. Es wird zunächst eine Bemessung mit dem vereinfachten Verfahren nach DIN 1053-100 durchgeführt, anschließend erfolgt die Bestimmung des Ausnutzungsfaktors  $\alpha_2$ .

Es gelten folgende Annahmen:

- $h_s = 2,75$  m
- $d = 11,5$  cm

- $N_{Ek} = 100 \text{ kN/m}$  ( $N_{G,k} = 2/3 \cdot N_{Ek}$ ;  $N_{Q,k} = 1/3 \cdot N_{Ek}$ )

Für die angegebene lichte Geschosshöhe ergibt sich die Schlankheit mit dem Abminderungsbeiwert  $\beta$  zu

$$\lambda = \frac{0,75 \cdot 2,75}{0,115} = 17,93$$

Nach dem „vereinfachten“ Verfahren nach DIN 1053-100: 2004, Abschnitt 8.9 kann der erforderliche charakteristische Wert der Druckfestigkeit  $f_k$  zur Bemessung bei Umgebungstemperatur folgendermaßen bestimmt werden:

$$N_{Ed} = 1,35 \cdot \frac{2}{3} \cdot 0,1 + 1,5 \cdot \frac{1}{3} \cdot 0,1 = 1,4 \cdot 0,1 = 0,14 \text{ MN/m}$$

$$\phi_2 = 0,85 - 0,0011 \cdot 17,93^2 = 0,50$$

$$\text{erf } f_k = \frac{0,14 \cdot 1,5}{0,50 \cdot 0,115 \cdot 0,85} = 4,3 \text{ MN/m}^2$$

Aus DIN 1053-100: 2004: Tabelle 4 wird die charakteristische Druckfestigkeit für die Steinfestigkeitsklasse 10 und Mörtelgruppe IIa mit

$$f_k = 4,4 \text{ MN/m}^2$$

gewählt. Damit ist die Tragfähigkeit der Wand bei Umgebungstemperatur nachgewiesen

Der für die Brandbemessung nach DIN 4102-4 erforderliche Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2$  ergibt sich nach Gl. 4-20 zu:

$$\alpha_2 = 3,14 \cdot \frac{15}{25 - 17,93} \cdot \frac{0,10}{1,0 \cdot 0,115 \cdot 4,4} = 1,32$$

Da Ausnutzungsfaktoren  $> 1,0$  nach DIN 4102-4: 1994 unzulässig sind, kann die Wand mit den gewählten Parametern brandschutztechnisch nicht bemessen werden. Zur Verkleinerung des Ausnutzungsfaktors ist der Wert der charakteristischen Druckfestigkeit  $f_k$  zu erhöhen. Die erforderliche charakteristische Druckfestigkeit muss also betragen:

$$\text{erf } f_k = 1,32 \cdot 4,4 = 5,8 \text{ MN/m}^2$$

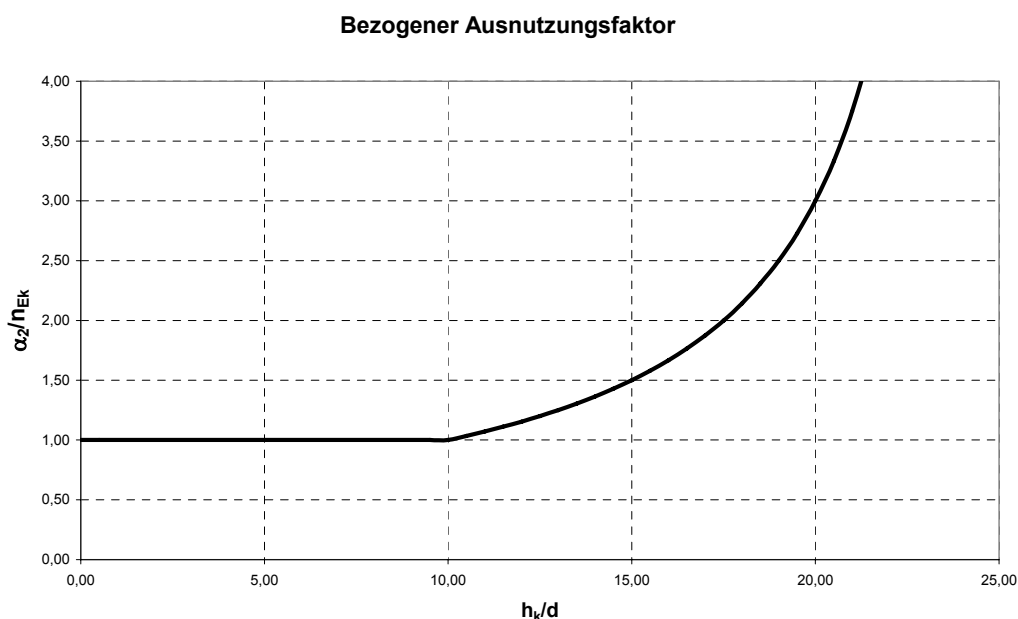
Dies entspricht einer Steinfestigkeitsklasse 20 und Mörtelgruppe IIa.

### 4.3.3 Kritische Analyse der Anwendungsgrenzen

Der Vorteil der Bestimmung des Ausnutzungsfaktors nach Kapitel 4.3.1 liegt darin begründet, dass der charakteristische Wert der Einwirkungen verwendet werden kann. Somit besteht die völlige Unabhängigkeit von dem gewählten Verfahren, mit welchem die Bemessung unter Normaltemperatur durchgeführt wird. Ein Nachteil liegt allerdings darin, dass der Ausnutzungsfaktor auf die Tragfähigkeit des vereinfachten Verfahrens nach DIN 1053-1 bezogen ist. Insbesondere bei großen Schlankheiten sind die sich aus dem vereinfachten Verfahren ergebenden Traglastminderungen sehr groß (vgl. Kapitel 3). Dieser Unterschied wird nochmals deutlich wenn man mit der Einführung der bezogenen charakteristischen Normalkraft

$$n_{Ek} = 3,14 \cdot \frac{N_{Ek}}{b \cdot d \cdot f_k} \cdot k_0 \quad \text{Gl. 4-21}$$

einen bezogenen Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2/n_{Ek}$  definiert. Unter Verwendung der Gleichungen 4.19 und 4.20 erhält man in Abhängigkeit der Schlankheit den in Abbildung 4.6 dargestellten Zusammenhang.



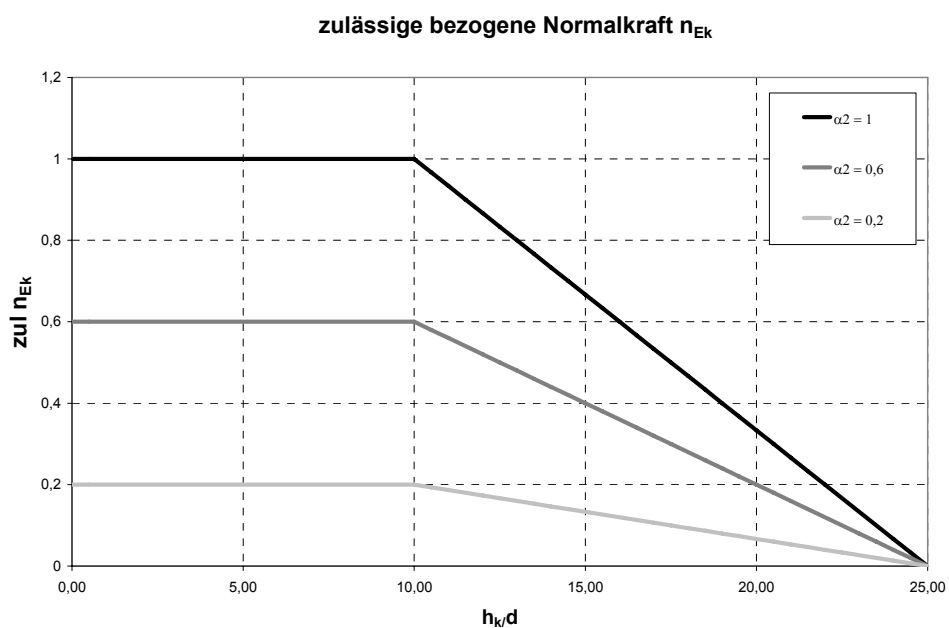
**Abbildung 4.6:** Bezogener Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2/n_{Ek}$  in Abhängigkeit der Schlankheit  $\lambda = h_k/d$

Abbildung 4.6 veranschaulicht nochmals, dass mit dem vorgestellten Ansatz zur Berechnung des Ausnutzungsfaktors  $\alpha_2$  schon bei Schlankheiten  $\lambda > 15$  nur mit kleinen bezogenen Tragfähigkeiten brauchbare Ausnutzungsfaktoren, d.h.  $\alpha_2 \leq 1,0$  berechnet werden können. Mit

zunehmender Schlankheit steigt der zugehörige Ausnutzungsgrad  $\alpha_2$  überproportional an. Der Grund für diese schnelle Zunahme ist die lineare Abnahme der Tragfähigkeit beim Knicknachweis nach dem „vereinfachten“ Verfahren nach DIN 1053-1 bis auf den Wert Null, auf die die nach dem Teilsicherheitskonzept bestimmten Spannungen bei der Berechnung des Ausnutzungsfaktors  $\alpha_2$  bezogen werden.

Es ist jedoch anzumerken, dass Schlankheiten  $\lambda \geq 20$  in der Praxis selten vorkommen, so dass der für große Schlankheiten in der praktischen Umsetzung besonders ungünstige Bereich der Bestimmungsgleichung für den Ausnutzungsgrad  $\alpha_2$  an Bedeutung verliert.

Der bezogene Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2/n_{Ek}$  ist eigentlich nichts anderes als der Kehrwert des Traglastabminderungsfaktors  $k_2$  des vereinfachten Verfahrens nach DIN 1053-1: 1996. Man kann die bezogene Normalkraft in Abhängigkeit der Schlankheit auch als zulässige bezogene Normalkraft angeben. In Abbildung 4.7 ist für die drei verschiedenen Ausnutzungsgrade  $\alpha_2$ , die in den Tabellen der DIN 4102-4 verwendet wurden, jeweils die bezogene zulässige Normalkraft dargestellt.



**Abbildung 4.7:** Zulässige bezogene Normalkraft für verschiedene Ausnutzungsgrade  $\alpha_2$  in Abhängigkeit der Schlankheit  $\lambda = h_k/d$

Weiterhin ist anzumerken, dass die einfache Anwendung der charakteristischen Einwirkungen auf der Kalibrierung des globalen Sicherheitsbeiwertes am bestehenden Sicherheitsniveau beruht. Dadurch werden Abweichungen infolge unterschiedlicher Verhältnisse von Eigenge-



wicht und Verkehrslasten und der Nutzungsart, die über den Kombinationsbeiwert  $\psi_{1,1}$  nach DIN 1055-100 in die Berechnung eingeht, vernachlässigt. Diese Einflüsse werden in Summe über den globalen Sicherheitsbeiwert  $\gamma_{gl,fi} = 1,0$  abgedeckt, ohne sie im Einzelnen zu quantifizieren. Zur Berücksichtigung dieser Effekte kann der variable globale Sicherheitsbeiwert nach Kapitel 4.1 zusätzlich verwendet werden.

## 5 Möglichkeit einer Modifizierung des Ausnutzungsgrades $\alpha_2$

### 5.1 Allgemeines

Der in Kapitel 4.3 vorgestellte Vorschlag zur Berechnung des Ausnutzungsfaktors  $\alpha_2$  hat den Nachteil, dass insbesondere bei großen Schlankheiten nur sehr geringe charakteristische Tragfähigkeiten erreicht werden können. Deshalb wird im vorliegenden Kapitel ein Vorschlag zur Modifizierung des Ausnutzungsfaktors  $\alpha_2$  vorgestellt, der für Wanddicken  $d \leq 17,5$  cm eine höhere Ausnutzung von Mauerwerkswänden im Brandfall ermöglicht.

In Kapitel 2.3.5 wurden die Hintergründe zur normativen Festlegungen zur Ermittlung der Knicklänge zur Bemessung von Mauerwerkswänden und die Abweichungen der Randbedingungen, die im Brandversuch vorhanden sind, dargestellt. Aus dem realitätsnahen Ansatz der Knicklänge im Brandversuch ergeben sich Tragreserven, die für eine Neubewertung der Versuche genutzt werden könnten. Diese Tragreserven werden im nachfolgenden Abschnitt näher quantifiziert. Diese Quantifizierung möglicher Tragreserven ist als ein erster Ansatz zu verstehen, der durch weitere umfangreiche Untersuchungen bezüglich der Randbedingungen im realen Bauwerk und im Brandversuch verifiziert werden muss. Dies kann im Rahmen zukünftiger Forschungsvorhaben erarbeitet werden und könnte als Grundlage für eine entsprechende Regelung im Zuge der zukünftigen Überarbeitung von DIN 1053-1 bzw. DIN 4102-22 verwendet werden.

### 5.2 Quantifizierung von Tragreserven durch realitätsnahen Ansatz der Knicklänge

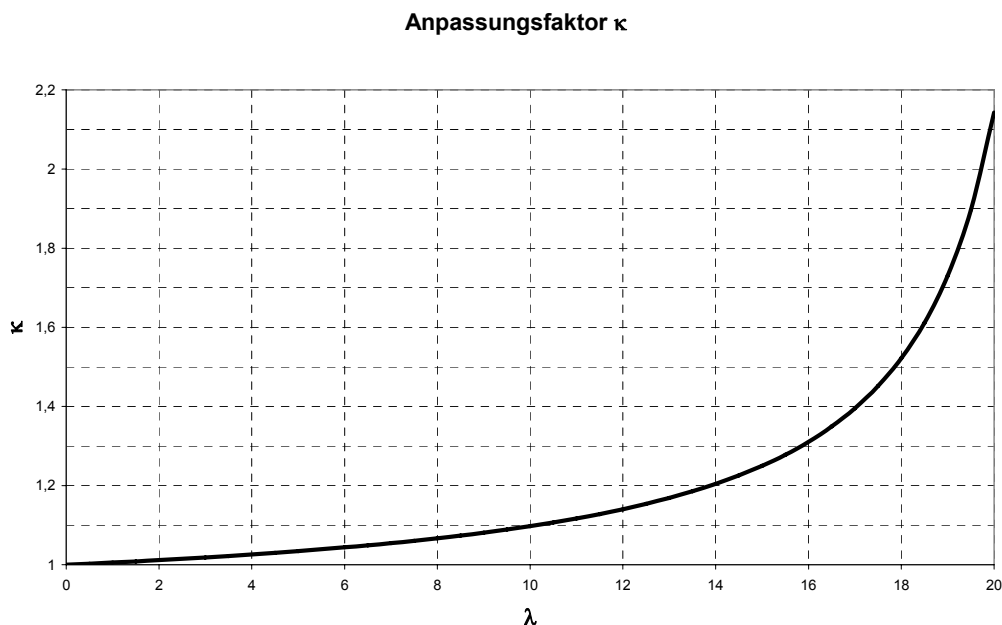
In Kapitel 2.3.5 wurden die Hintergründe zur Festlegung der Knicklänge erläutert, die in DIN 1053-1 enthalten sind. Die Regelungen basieren im Wesentlichen auf der Arbeit von Gremmel [28]. Darin wurde der Knicklängenbeiwert durch Messung der Verformungen, die sich in den damals durchgeführten Versuchen ergaben, bestimmt. Der Abstand der Wendepunkte der Biegelinie bestimmt dabei die Knicklänge. Wertet man diese Arbeit neu unter der Annahme aus, dass eine teilweise Einspannung am Wandfuß und eine gelenkige Lagerung am Wandkopf gegeben ist, so ergeben sich Knicklängenbeiwerte, die in der Größenordnung  $\beta = 0,95$  liegen. Auf der sicheren Seite liegend wird für die weiteren Überlegungen anstelle von  $\beta = 0,75$  nach DIN 1053-1 ein Knicklängenbeiwert von  $\beta = 0,85$  angesetzt.

Als Konsequenz des größeren Knicklängenbeiwertes  $\beta$  und der damit verbundenen geringeren rechnerische Tragfähigkeit als Bezugsgröße für die Ermittlung des Ausnutzungsfaktors  $\alpha_2$  ergibt sich, dass mit den bisher durchgeführten Brandversuchen Ausnutzungsfaktoren  $\alpha_2 > 1$  abgedeckt sind. Dieser Unterschied kann über einen Anpassungsfaktor  $\kappa$  ausgedrückt werden, der sich aus dem Verhältnis der Knicklängenabminderungsfaktoren  $k_2$  nach dem vereinfachten Verfahren ergibt, berechnet mit den Knicklängenbeiwerten von  $\beta = 0,75$  und  $\beta = 0,85$ :

$$\kappa = \frac{k_{2,\beta=0,75}}{k_{2,\beta=0,85}} = \frac{25 - 0,75 \cdot \frac{h_s}{d}}{15} \cdot \frac{15}{25 - 0,85 \cdot \frac{h_s}{d}} = \frac{25 - 0,75 \cdot \frac{h_s}{d}}{25 - 0,85 \cdot \frac{h_s}{d}} \quad \text{Gl. 5-1}$$

mit  $\lambda = 0,75 \cdot \frac{h_s}{d}$  folgt  $\kappa = \frac{25 - \lambda}{25 - \frac{0,85}{0,75} \cdot \lambda}$  Gl. 5-2

Die normativ angegebenen zulässigen Ausnutzungsfaktoren könnten damit erhöht werden. In Abbildung 5.1 ist der Anpassungsfaktor in Abhängigkeit der Schlankheit  $\lambda$  dargestellt.



**Abbildung 5.1: Anpassungsfaktor  $\kappa$  in Abhängig der Schlankheit**

Allgemein ist festzustellen, dass sich der Fehler bei der wirklichkeitsnahen Bestimmung der Knicklänge insbesondere bei großen Schlankheiten bemerkbar macht. So können z.B. bei einer Schlankheit von  $\lambda = 19,6$  (entspricht  $h_s = 3,0$  und  $d = 11,5$  cm) allein aus der zutreffen-

den Berücksichtigung der im Versuch vorliegenden Knicklängen der die zulässigen Ausnutzungsfaktoren um 94 % erhöht und damit annähernd verdoppelt werden.

### 5.3 Modifizierung des Ausnutzungsgrades

Der Ausnutzungsgrad kann unter Verwendung des in Kapitel 5.2 eingeführten Anpassungsfaktors  $\kappa$  demnach wie folgt modifiziert werden:

$$\alpha_2 = 3,14 \cdot \frac{N_{Ek}}{b \cdot d \cdot f_k} \cdot k_0 \quad \text{für } h_k/d \leq 12 \quad \text{Gl. 5-3}$$

$$\alpha_2 = 3,14 \cdot \frac{15}{25 - \lambda} \cdot \frac{N_{Ek}}{b \cdot d \cdot f_k} \cdot k_0 \cdot \frac{1}{\kappa} \quad \text{für } 12 < h_k/d \leq 20 \quad \text{Gl. 5-4}$$

Die Modifizierung ist grundsätzlich nur bei Schlankheiten  $\lambda > 10$  sinnvoll, da für gedrungene Mauerwerkswände kein Schlankheitseinfluss in die Berechnung des Ausnutzungsfaktors einfließt. Darüber hinaus würde sich theoretisch auch schon bei Schlankheiten  $\lambda = 10$  eine Reduzierung des Ausnutzungsfaktors ergeben, die jedoch nicht begründet erscheint. Die in Gleichung 5.4 angegebene modifizierte Berechnung des Ausnutzungsfaktors gilt demnach für Schlankheiten  $\lambda \geq 12$ . Weiterhin beschränkt sich die Gültigkeit auf Schlankheiten  $\lambda \leq 20$ , da für größere Schlankheiten kaum Brandversuche durchgeführt wurden und diese Schlankheiten auch nicht unbedingt praxisrelevant sind. Der Anpassungsfaktor  $\kappa$  kann natürlich nur bei Wänden mit  $d \leq 17,5$  cm in Ansatz gebracht werden. Für Wanddicken von  $d > 17,5$  cm sind die Abweichungen in der Berechnung der Knicklänge so gering, dass daraus keine Reserven abgeleitet werden können.

Eine Gegenüberstellung der Ermittlung des Ausnutzungsfaktors nach [25] und des modifizierten Vorschlages ist in der nachstehenden Abbildung dargestellt. Die sich daraus ergebenden zulässigen bezogenen Normalkräfte sind Abbildung 5.3 zu entnehmen.

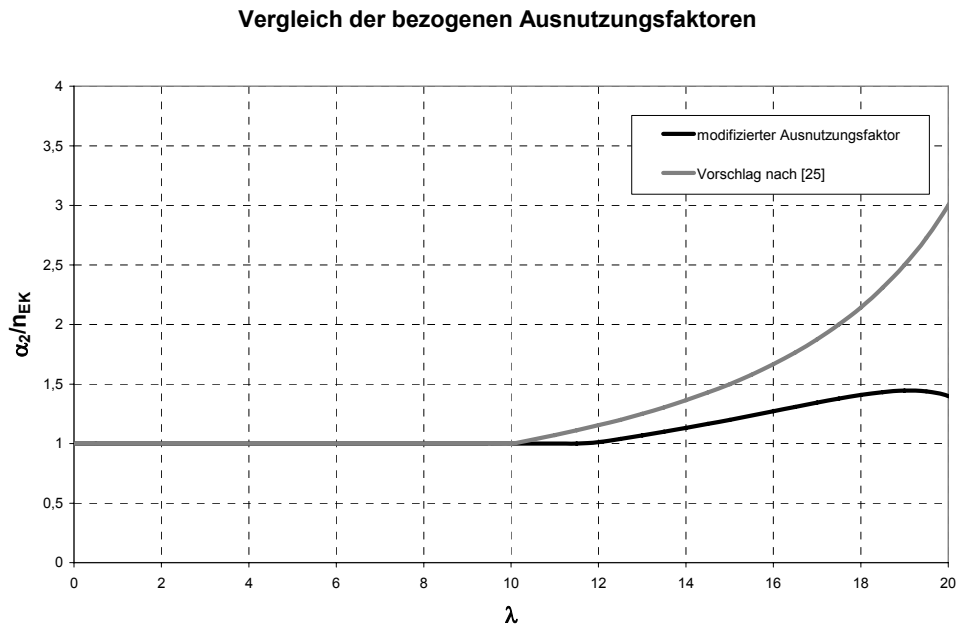


Abbildung 5.2: Gegenüberstellung der Ermittlung des Ausnutzungsfaktors  $\alpha_2$  nach [25] sowie des Neuvorschlages

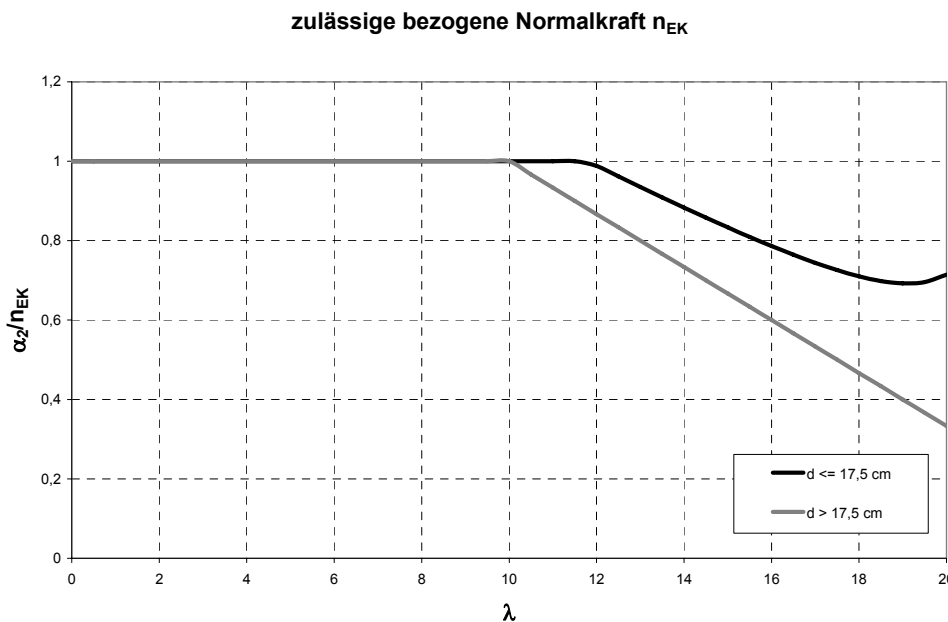


Abbildung 5.3: Gegenüberstellung zulässigen bezogenen Normalkraft für Wände  $d > 17,5$  cm und  $d \leq 17,5$  cm

Die vorangegangenen Überlegungen sollen nochmals anhand einer exemplarischen Vergleichsrechnung verdeutlicht werden. Dabei wird der Ausnutzungsfaktor gemäß Gl. 5-4 be-

stimmt und den Ergebnissen der Beispielrechnungen aus Kapitel 4.3 gegenübergestellt. Es gelten die bekannten Annahmen:

$$h_s = 2,75 \text{ m}; \quad d = 11,5 \text{ cm}; \quad f_k = 4,4 \text{ MN/m}^2; \quad N_{Ek} = 0,10 \text{ MN/m} \quad \lambda = 17,93$$

$$\kappa = \frac{25 - \lambda}{25 - \frac{0,85}{0,75} \cdot \lambda} = \frac{25 - 17,93}{25 - \frac{0,85}{0,75} \cdot 17,93} = 1,51$$

$$\alpha_2 = 3,14 \cdot \frac{15}{25 - \lambda} \cdot \frac{N_{Ek}}{b \cdot d \cdot f_k} \cdot k_0 \cdot \frac{1}{\kappa} = 3,14 \cdot \frac{15}{25 - 17,93} \cdot \frac{0,1}{1 \cdot 0,115 \cdot 4,4} \cdot 1 \cdot \frac{1}{1,51} = 0,87$$

Unter Zuhilfenahme des Anpassungsfaktors könnte diese Mauerwerkswand noch in die entsprechende Feuerwiderstandsklasse eingestuft werden.

Abschließend sei nochmals darauf hingewiesen, dass es bei dem vorliegenden Vorschlag zur Modifizierung des Ausnutzungsfaktors um eine erste Annäherung handelt, um dem Sachverhalt zu begegnen, dass sich die Randbedingungen des statischen Systems im Brandversuch und in der realen Umgebung des Bauteils unterscheiden können. Dies wurde bisher in den Auswertungen der Brandversuche nicht explizit berücksichtigt. Es ist aber u.a. noch zu überprüfen, ob diese Tragreserve nicht durch andere Überlegungen, die in die Versuchsauswertung eingeflossen sein könnten und nicht ausdrücklich dokumentiert wurden, kompensiert wurde. Dazu ist beispielsweise der Sachverhalt zu zählen, dass eine planmäßig exzentrische Belastung in den Brandversuchen bisher in der Regel nicht aufgebracht wird, diese jedoch die Tragfähigkeit stark beeinflussen kann (siehe auch Kapitel 4.2.2). Eine Anwendung der vorgestellten Modifizierung in der Bemessungspraxis sollte daher nicht ohne weitere Absicherung im Rahmen weiterer Forschungstätigkeit vorgenommen werden.

## 6 Ausblick auf zukünftigen Forschungsbedarf

Im Rahmen der Bearbeitung dieses Forschungsvorhabens sind eine Reihe von Fragestellungen aufgetreten, die im Rahmen weiterer Forschungsvorhaben geklärt werden sollten, um langfristig eine konsistente, wirtschaftliche und den Sicherheitsanforderungen einer modernen Gesellschaft genügenden Anforderungen zu sichern.

Die im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens angegebenen Beziehungen zur Bestimmung eines modifizierten Ausnutzungsfaktors können lediglich eine Übergangslösung darstellen, da sie das Potenzial der größeren Tragfähigkeiten nach DIN 1053-100 unter Brandeinwirkung nicht ausschöpfen. Um diesem Sachverhalt zu begegnen, sind weitere Analysen notwendig, bei denen Ausnutzungsfaktoren  $\alpha_2$  bezogen auf die Tragfähigkeiten nach DIN 1053-100 definiert werden. Dazu sollten z.B. die umfangreich vorliegenden Ergebnisse von Brandversuchen gezielt auf mögliche Reserven hin analysiert und hieraus verbesserte Ausnutzungsfaktoren  $\alpha_2$  entwickelt werden. Gleichzeitig kann so zielgerichtet festgestellt werden, bei welchen Stein-Mörtel Kombinationen zusätzliche Brandversuche notwendig sind.

Im Zuge der Umstellung auf das Teilsicherheitskonzept tritt die Frage auf, mit welcher Größe die entsprechenden Teilsicherheitsfaktoren für die Einwirkungen und den Bauteilwiderstand angesetzt werden müssen. Eine Möglichkeit, die im Bauwesen häufig angewendet wird, ist die Festlegung der Sicherheitsbeiwerte auf der Grundlage, dass augenscheinlich das gleiche Zuverlässigkeitsniveau wie bisher erreicht wird. Eine korrekte Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte müsste aber eigentlich auf der Grundlage umfangreicher Zuverlässigkeitsanalysen erfolgen. Um das bisherige Zuverlässigkeitsniveau zu gewährleisten, mit dem gute Erfahrungen gemacht wurden, ist demnach zunächst dessen Quantifizierung notwendig.

Teilsicherheitsbeiwerte werden üblicherweise auf Fraktilwerte bezogen, die auf Grundlage statistischer Untersuchungen der entsprechenden Basisgröße festgelegt werden. Die bei den Brandversuchen normativ ausreichende Anzahl von 2 Brandversuchen als Grundlage zur Klassifizierung von Mauerwerkswänden ist als Basis für eine statistische Auswertung jedoch nicht ausreichend. Hier wären weitergehende Untersuchungen hilfreich, um die Aussagekraft solcher Versuche zu erhöhen, und daraus möglicherweise kleinere Teilsicherheitsfaktoren für die Widerstandsseite abzuleiten.

Es ist offenkundig, dass die im Brandversuch vorherrschenden Randbedingungen nur in Ausnahmefällen mit denen der Realität übereinstimmen. Ziel muss aber dennoch eine möglichst gute Annäherung von Versuch und Realität sein. Abweichungen davon können dabei aber

sowohl auf der sicheren als auch auf der unsicheren Seite liegen. Die Interpretation dieser Abweichungen scheint in der Vergangenheit nicht immer ausreichend berücksichtigt worden zu sein. Insbesondere die richtige Festlegung von Knicklängen und deren Interpretation für die Versuchsauswertung bedarf weiterer Untersuchungen.

Weiterhin werden Lastexzentrizitäten im Brandversuch bisher nicht aufgebracht und sind damit versuchstechnisch bisher eigentlich nicht abgedeckt. Für Bauteile, die einer horizontalen Belastung ausgesetzt sind (z.B. Kellerwand, Außenwand) sind damit die momentan vorliegenden Regelungen nicht ausreichend und sollten daher dringend überprüft werden.

Die neue Generation der europäischen Normen sieht für den Brandschutznachweis von Bauteilen ein rechnerisches Nachweisverfahren vor, das auf Grundlage der temperaturabhängigen Materialeigenschaften den Nachweis der Tragfähigkeit im Brandfall ermöglicht. Momentan liegen für den Mauerwerksbau jedoch die entsprechenden Eingangsgrößen nur bedingt vor, so dass hier noch erheblicher Forschungsbedarf besteht. Als Grundlage eines rechnerischen Nachweiskonzeptes ist zunächst die versuchstechnische Ermittlung der thermischen Materialkennwerte und der Temperaturverteilung im Bauteil durch Versuche an Kleinbauteilen zu ermitteln. Auf dieser Grundlage könnten mit der Finiten Element Methode unter Berücksichtigung der zuvor ermittelten Eingangsgrößen Mauerwerkswände modelliert und berechnet werden. Die aufwändige Durchführung von Brandversuchen könnte dadurch erheblich reduziert werden.



## 7 Zusammenfassung und Fazit

Das Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens war die Darstellung der Hintergründe zur Bemessung von Mauerwerk unter Brandeinwirkung sowie die Entwicklung eines Vorschlages zur Ermittlung des Ausnutzungsfaktors  $\alpha_2$ , der unabhängig vom Konzept der Kaltbemessung eine Klassifizierung von Mauerwerkswänden in eine bestimmte Feuerwiderstandsklasse auf Grundlage der Tabellenwerke von DIN 4102-4: 1994 ermöglicht. Mit Vorliegen eines solchen Ausnutzungsfaktors kann eine sinnvolle Anwendung von DIN 1053-100: 2004 in Verbindung mit DIN 4102-22: 2004 und DIN 4102-4: 1994 gewährleistet werden.

Dazu wurde zunächst eine Analyse der historischen Entwicklung von DIN 4102 und DIN 1053 durchgeführt. Darin hat sich gezeigt, dass sich die derzeit für Brandschutznachweise im Mauerwerksbau verwendeten Tabellenwerke der DIN 4102-4: 1994 und der darin enthaltene Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2$  auf die Mauerwerksnormen DIN 1053-1: 1990 und DIN 1053-2: 1984 beziehen. Das in DIN 1053-1: 1990 verankerte vereinfachte Verfahren und das in DIN 1053-2: 1984 verankerte genauere Verfahren wurden 1996 in DIN 1053-1: 1996 zusammengeführt. Später wurden dann jedoch in der Bemessungspraxis in DIN 4102-4: 1994 alle Hinweise auf DIN 1053-2: 1984 durch DIN 1053-1: 1996 ersetzt.

Diese Vorgehensart birgt jedoch möglicherweise brandschutztechnische Sicherheitsrisiken, da dem Rechenverfahren nach Anhang B aus DIN 1053-2: 1984 bzw. dem „genaueren“ Verfahren nach DIN 1053-1: 1990 nicht die identischen Bemessungsansätze zu Grunde liegen wie dem „genaueren“ Verfahren nach DIN 1053-1: 1996. Im Unterschied zur älteren Ausgabe setzt DIN 1053-1: 1996 im „genaueren“ Verfahren durch die Erhöhung des Rechenwertes der Druckspannung  $\beta_R$  um den Faktor  $4/3$  bei ausmittiger Belastung plastisches Verformungsverhalten an, wodurch höhere zulässige Traglasten erreicht werden. Der daraus resultierende Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2$  wird demnach kleiner, was zu günstigeren brandschutztechnischen Anforderungen führt, da die nach DIN 4102 – 4: 1994 geforderte Mindestwanddicke vom Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2$  abhängt.

Als Grundlage für die Entwicklung eines Vorschlages zur Ermittlung des Ausnutzungsfaktors  $\alpha_2$  wurde eine eingehende Analyse der verschiedenen normativen Bemessungsverfahren von schlanken Mauerwerkswänden durchgeführt. Die Bemessung unterscheidet sich durch drei Einflussgrößen: das Sicherheitskonzept, der unterschiedliche Traglastabminderungsfaktor zur Berücksichtigung des Knickens und die Definition der Festigkeiten. In Kap. 3.4 wurde gezeigt, dass die unterschiedliche Definition der Mauerwerksfestigkeit keine Differenzen in der

Bestimmung der Tragfähigkeit verursacht. Die Unterschiede liegen im Wesentlichen in der unterschiedlichen Berücksichtigung der Traglastabminderung infolge Knicken. Die Unterschiede im Sicherheitskonzept sind für den Nachweis schlanker Wände unter Längsdruckbeanspruchung vornehmlich formaler Natur, in Kapitel 3.4 wurden Abweichungen je nach Verhältnis von Eigengewicht und Verkehrslast von maximal 11% dargestellt.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen konnte ein Vorschlag zur Ermittlung des Ausnutzungsfaktors  $\alpha_2$  entwickelt werden, der eine sinnvolle Anwendung von DIN 1053-100: 2004 in Verbindung mit DIN 4102-22: 2004 und DIN 4102-4: 1994 gewährleistet.

Dieser Vorschlag basiert auf dem charakteristischen Wert der Einwirkung  $N_{Ek}$  und der Mauerwerksfestigkeit  $f_k$ . Da die Brandversuche in der Vergangenheit mit Belastungen gefahren wurden, die auf der rechnerischen Tragfähigkeit nach dem vereinfachten Bemessungsverfahren nach DIN 1053-1: 1990 bzw. 1996 ermittelt wurden, wird als Bezugswert für den Tragfähigkeitsabminderungsfaktor infolge Knicken der Faktor  $k_2$  aus den genannten Bemessungsverfahren verwendet. Die nach dem Teilsicherheitskonzept bei einer außergewöhnlichen Bemessungssituation, wie sie der Brandfall darstellt, eigentlich zulässige Reduzierung der Einwirkung gegenüber dem charakteristischen Wert wird durch Ansatz eines gegenüber der Bemessung unter Normaltemperaturen reduzierten Teilsicherheitsbeiwertes auf der Materialseite  $\gamma_M$  wieder kompensiert. Dieser Teilsicherheitsbeiwert wurde am bestehenden Sicherheitsniveau für ein Verhältnis von Eigengewicht zu Gesamtlast von 2/3 kalibriert. Es kann dann mit einem Wert  $\gamma_M = 1,2$  gearbeitet werden. Bei Bedarf können die Einflüsse aus den Lastverhältnissen und der Lastursache aber durch einen variablen globalen Sicherheitsbeiwert im Brandfall berücksichtigt werden.

Im Einzelnen ergibt sich folgender Vorschlag zur Bestimmung des Ausnutzungsfaktors:

$$\text{für } \lambda \leq 10: \quad \alpha_2 = 3,14 \cdot \frac{N_{Ek}}{b \cdot d \cdot f_k} \cdot k_0$$

$$\text{für } 10 < \lambda \leq 25 \quad \alpha_2 = 3,14 \cdot \frac{15}{25 - \lambda} \cdot \frac{N_{Ek}}{b \cdot d \cdot f_k} \cdot k_0$$

$k_0$  stellt darin einen Faktor zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M$  für Wände und kurze Wände dar.

Es bleibt festzuhalten, dass diese Bestimmungsgleichungen als Übergangslösung zu betrachten sind, die momentan nur gewährleisten, dass formal eine Anwendung der Mauerwerksnorm auf dem semi-probabilistischen Sicherheitskonzept möglich ist. Insgesamt gesehen können die Tragfähigkeitspotenziale, die in DIN 1053-100 enthalten sind, bei Brandschutzanforderungen derzeit nur bedingt realisiert werden.

Für Wände mit Wanddicken  $d \leq 17,5$  cm wurde als Grundlage für weitere Diskussionen eine weitere Modifizierung des Ausnutzungsfaktor  $\alpha_2$  vorgestellt. Begründung ist, dass bei der Bestimmung der zulässigen Beanspruchungen, die der aufgebrachten Last in den Brandversuchen entspricht, von einer Abminderung der Knicklänge mit  $\beta = 0,75$  Gebrauch gemacht wurde. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens konnte jedoch festgestellt werden, dass unter einer wirklichkeitsnahen Berücksichtigung der realen Lagerungsbedingungen im Brandversuch ein Knicklängenbeiwert von  $\beta = 0,85$  vorhanden ist und somit die Wand mit einer zu hoch gewählten Last geprüft wurde, wodurch sich der zulässige Ausnutzungsfaktor erhöht. Die Nutzung dieser Tragreserve muss jedoch noch durch weitere Forschungsarbeiten abgesichert werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] DIN 4102 (1994): Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., 1981
- [2] DIN 1053 (1990): Mauerwerk – Teil 1: Rezeptmauerwerk: Berechnung und Ausführung. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., 1990
- [3] DIN 1053 (1996): Mauerwerk – Teil 1: Berechnung und Ausführung. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., 1990
- [4] DIN 1053 – 100 (2004): Mauerwerk – Teil 100: Berechnung auf der Grundlage des semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., 2004
- [5] DIN 4102 (2004): Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 22: Anwendungsnorm zu DIN 4102-4 auf der Bemessungsbasis von Teilsicherheitsbeiwerten: Deutsches Institut für Normung e.V., 1981
- [6] DIN 1053 (1984): Mauerwerk – Teil 2: Mauerwerk nach Eignungsprüfung: Berechnung und Ausführung. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., 1984
- [7] DIN 1053 (1937): Berechnungsgrundlagen für Bauteile aus künstlichen und natürlichen Steinen. Berlin: Deutscher Normenausschuss, 1940
- [8] DIN 1053 (1952): Mauerwerk: Berechnung und Ausführung. Berlin: Deutscher Normenausschuss, 1952
- [9] DIN 1053 (1962): Mauerwerk: Berechnung und Ausführung. Berlin: Deutscher Normenausschuss, 1962
- [10] DIN 1053 (1974): Mauerwerk – Blatt 1: Berechnung und Ausführung. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., 1974
- [11] Kirtschig, K. & Meyer, J. (1987): Auswertung von Mauerwerksversuchen zur Festlegung von zulässigen Spannungen und charakteristischen Mauerwerksfestigkeiten. Mitteilungen aus dem Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover, Heft 54, Teil 1, S. 7-8. Hannover, 1987
- [12] Mann, W. (1979): Grundlagen für die Bemessung von Ingenieurmauerwerk. Mauerwerk-Kalender, 4 (1979), S. 35-67. Berlin: Ernst & Sohn, 1979

- [13] Hahn, C. (1992): Brandschutz im Mauerwerksbau, Grundlagen und neuere Entwicklungen. Mauerwerk-Kalender, 17 (1992), S. 565-591. Berlin: Ernst & Sohn, 1992
- [14] Hahn, C. (1998): Mauerwerk nach DIN 4102-4: 1994. Mauerwerk-Kalender, 23 (1998), S. 647-681. Berlin: Ernst & Sohn, 1998
- [15] Hahn, C. (2000): Brandschutz im Mauerwerksbau mit Praxisbeispielen. Mauerwerk-Kalender, 25 (2000), S. 572 . Berlin: Ernst & Sohn, 2000.
- [16] DIN 4102 (1940): Widerstandsfähigkeit von Baustoffen und Bauteilen gegen Feuer und Wärme. Berlin: Deutscher Normenausschuss, 1940
- [17] DIN 4102 (1965): Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Blatt 2: Begriffe, Anforderungen und Prüfungen von Bauteilen. Berlin: Deutscher Normenausschuss, 1965
- [18] DIN 4102 (1965): Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Blatt 4: Einreihung in die Begriffe. Berlin: Deutscher Normenausschuss, 1965
- [19] DIN 4102 (1970): Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Blatt 4: Einreihung in die Begriffe. Berlin: Deutscher Normenausschuss, 1970
- [20] DIN 4102 (1977): Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 2: Bauteile - Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., 1977
- [21] DIN 4102 (1981): Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 1: Baustoffe - Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., 1981
- [22] DIN 4102 (1981): Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., 1981
- [23] Glock, C. (2004): Traglast unbewehrter Beton- und Mauerwerkswände – Nichtlineares Berechnungsmodell und konsistentes Bemessungskonzept für schlanke Wände unter Druckbeanspruchung. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 2004
- [24] Graubner, C.-A., Glock, C.: Jäger, W.: Pflücke, T.: Knicksicherheit von Mauerwerk. Mauerwerk-Kalender 2002. S. 381-411. Berlin: Ernst & Sohn, 2001
- [25] Graubner, C.-A.: Jäger, W.: Hahn, C.: Bemessung von Mauerwerk im Brandfall- Bestimmung des Ausnutzungsgrades  $\alpha_2$ . Textvorschlag für die DIBt-Richtlinie zur Anwendung von DIN 4102-22 in Verbindung mit DIN 1053-100. Darmstadt, Dresden, Braunschweig, 2005

- [26] Fastabend, M.: Agatz, S. & Schäfers, T. (2005): Zum Nachweis des konstruktiven Brandschutzes auf der Basis von Bemessungen nach DIN 1045-1. Beton- und Stahlbetonbau, 100, Heft 4 (2005), S. 360-363. Berlin: Ernst & Sohn, 2005.
- [27] Richter, E.: Hosser, D.: Brandverhalten von Beton., Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen nach deutschen und Europäischen Normen. Der Bauingenieur 77, Heft 7 (2002), S. 370-377
- [28] Gremmel, M. (1978): Zur Ermittlung der Tragfähigkeit schlanker Mauerwerkswände an Bauteilen in wirklicher Größe. Dissertation, TU Braunschweig, 1978
- [29] Hahn, C. (1989): Experimentelle Untersuchungen zum Brandverhalten von Ingenieurmauerwerk. Forschungsarbeiten 1984-1989 aus dem Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, Heft 87, S. 249-252. Braunschweig, 1989
- [30] Hahn, C. (1993): Brandverhalten von Mauerwerkskonstruktionen. Braunschweiger Brandschutz-Tage ,93, Kurzreferate, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, Heft 103, S. 113-120. Braunschweig, 1993
- [31] Mann, W. (1988): Grundlagen der vereinfachten Bemessung von Mauerwerk nach DIN 1053 Teil 1, Entwurf 1987. Mauerwerk-Kalender, 13 (1988), S. 2-4. Berlin: Ernst & Sohn, 1988
- [32] Mann, W. (1992): Grundlagen für die ingenieurmäßige Bemessung von Mauerwerk nach DIN 1053 Teil 2. Mauerwerk-Kalender, 17 (1992), S.15-38. Berlin: Ernst & Sohn, 1992
- [33] Mann, W. (1995): Grundlagen für die ingenieurmäßige Bemessung von Mauerwerk nach DIN 1053 Teil 2. Mauerwerk-Kalender, 20 (1995), S.21-44. Berlin: Ernst & Sohn, 1995
- [34] DIN 1055 (2001): Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung – Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., 2001