

DIN EN 13084-4

ICS 91.060.40

Ersatz für
DIN EN 13084-4:2003-06**Freistehende Schornsteine –
Teil 4: Innenrohre aus Mauerwerk –
Entwurf, Bemessung und Ausführung;
Deutsche Fassung EN 13084-4:2005**

Free-standing chimneys –
Part 4: Brick liners –
Design and execution;
German version EN 13084-4:2005

Cheminées indépendantes –
Partie 4: Conduits intérieurs en briques de terre cuite –
Conception et mise en oeuvre;
Version allemande EN 13084-4:2005

Gesamtumfang 44 Seiten

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN

Beginn der Gültigkeit

Diese Norm gilt ab 2005-12-01.

Nationales Vorwort

Diese Norm wurde von Technischen Komitee CEN/TC 297 „Freistehende Industrieschornsteine“ (Sekretariat: Deutschland) erarbeitet.

Zuständig für die Deutsche Fassung ist der Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 13084-4:2003-06 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Korrektur von Fehlern in einigen Formeln;
- b) Anpassung der Bezeichnung an die der DIN EN 13084-5;
- c) Berücksichtigung des Leitpapiers L „Anwendung der Eurocodes“ der Europäischen Kommission bzgl. der Sicherheitsfaktoren;
- d) Berücksichtigung einiger europäischer Prüfnormen, z. B. DIN EN 1052-1 und DIN EN 1052-2;
- e) allgemeine redaktionelle Überarbeitung, z. B. Aktualisierung der normativen Verweisungen.

Frühere Ausgaben

DIN 1056: 1927-04, 1929-08, 1984-10
DIN 1056-1: 1940-08, 1959-04, 1969-08
DIN 1056-2: 1940-08, 1959-04, 1969-08
DIN 1058: 1929-04, 1959-07, 1969-08
DIN EN 13084-4: 2003-06

Deutsche Fassung

Freistehende Schornsteine —
Teil 4: Innenrohre aus Mauerwerk —
Entwurf, Bemessung und Ausführung

Free-standing chimneys —
Part 4: Brick liners —
Design and execution

Cheminées indépendantes —
Partie 4: Conduits intérieurs en briques de terre cuite —
Conception et mise en oeuvre

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 29. April 2005 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/ CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Management-Zentrum: rue de Stassart, 36 B-1050 Brüssel

Inhalt

	Seite
Vorwort	4
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen	5
3 Begriffe und Symbole	5
3.1 Begriffe	5
3.2 Symbole	6
4 Baustoffe	7
4.1 Allgemeines	7
4.2 Mauerwerk	7
4.2.1 Allgemeines	7
4.2.2 Wärmeeinwirkungen	7
4.2.3 Klassifizierung und chemische Beanspruchung	7
4.3 Wärmedämmung	9
5 Entwurf und Bemessung	9
5.1 Allgemeines	9
5.2 Mindestwanddicke	9
5.3 Innenrohrabstützungen	10
5.4 Öffnungen	10
5.5 Belüftung	10
5.6 Schutzschichten	11
5.7 Zusatzeinrichtungen	11
5.7.1 Fugen	11
5.7.2 Kompensatoren	11
5.7.3 Einführungskanäle und Gebläse	11
6 Berechnung und Bemessung	11
6.1 Einwirkungen	11
6.1.1 Allgemeines	11
6.1.2 Windlasten	12
6.1.3 Einwirkungen aus Erdbeben	12
6.1.4 Wärmeeinwirkungen	12
6.1.5 Innendruck und Explosionen	13
6.2 Widerstände	13
6.3 Nachweis	13
6.3.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit	13
6.3.2 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	15
6.3.3 Berechnung der Beanspruchungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit	16
6.3.4 Elastische Stabilität	17
7 Ausführung	17
7.1 Imperfektionen	17
7.2 Toleranzen	17
8 Inspektion und Instandhaltung	18
8.1 Allgemeines	18
8.2 Anwendungsbereiche der Inspektion	18
8.2.1 Innenrohr aus Mauerwerk	18
8.2.2 Wärmedämmung	19
8.3 Häufigkeit	19
8.4 Durchführung	19
Anhang A (informativ) Berechnung und Bemessung von unten abgestützten Innenrohren	21
A.1 Allgemeines	21
A.2 Elastische Stabilität	21
A.2.1 Allgemeines	21

A.2.2	Elastische Stabilität des ungerissenen Rohres	22
A.2.3	Elastische Stabilität freistehender vertikaler Pfeiler	23
A.2.4	Elastische Stabilität eines halben Rohres	24
A.2.5	Vergleich der drei Berechnungsverfahren und Schlussfolgerungen	25
Anhang B (normativ) Öffnungen		28
Anhang C (informativ) Kompensatoren		29
Anhang D (informativ) Dynamische Einflüsse		31
Anhang E (informativ) Verstärken - Bewehrtes Mauerwerk		34
E.1	An der Außenseite des Innenrohrs angebrachte Stahlbänder	34
E.1.1	Spannungen im Innenrohr	34
E.1.2	Flachstahlbänder	35
E.1.3	Stahlbänder mit Federn	36
E.2	Bewehrtes Mauerwerk	38
E.2.1	Allgemeines	38
E.2.2	Bemessung	38
E.2.3	Baustoffe	38
E.2.4	Korrosionsschutz	38
E.2.5	Ausführung	39
Anhang F (informativ) Wärmeeinwirkungen		40
Anhang G (informativ) Trocknen und Hochfahren		41
G.1	Neue Innenrohre	41
G.1.1	Allgemeines	41
G.1.2	Außen wärme gedämmte Innenrohre	41
G.1.3	Nicht wärme gedämmte Innenrohre	42
G.2	Alte Innenrohre aus Mauerwerk	42
Bilder		
Bild A.1 — Kritische Höhe eines freistehenden, ungerissenen Innenrohrs aus Mauerwerk		23
Bild A.2 — Kritische Höhe von gerissenen und ungerissenen Innenrohren aus Mauerwerk		26
Bild C.1 — Beispiel einer Innenrohrfuge mit Kompensator		30
Bild D.1 — Niedrigste maßgebende Schwingungsform des Innenrohres		33
Bild D.2 — Verhältnis zwischen h_{el}/r und γ		33
Bild E.1 — Stahlbänder mit Federn		37
Bild E.2 — Bewehrter Mauerwerksquerschnitt mit Formsteinen		39
Tabellen		
Tabelle 1 — Wesentliche Symbole		6
Tabelle 2 — Mindestwanddicken für Innenrohre aus Mauerwerk		10
Tabelle 3 — Charakteristische Werte mechanischer Eigenschaften von Mauerwerk		13
Tabelle 4 — Einwirkungskombinationen für ständige Bemessungssituationen ^a		14
Tabelle 5N — Teilsicherheitsbeiwerte γ_{G} und γ_{Qi} für Einwirkungen		15
Tabelle 6N — Teilsicherheitsbeiwerte γ_{M} für Mauerwerk		15
Tabelle A.1 — Kritische Höhe in Abhängigkeit von der Wanddicke		24
Tabelle A.2 — Berechnungsergebnisse bei vorgegebenen Innenrohrmaßen		25
Tabelle A.3 — Größte Höhe des Innenrohrs und kleinste Wanddicke in Abhängigkeit vom Durchmesser		27

Vorwort

Dieses Dokument (EN 13084-4:2005) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 297 „Freistehende Industrieschornsteine“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom DIN gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Februar 2006 und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Februar 2006 zurückgezogen werden.

Dieses Dokument ist Teil 4 des unten gelisteten Normenpaketes:

- EN 13084-1, *Freistehende Schornsteine — Teil 1: Allgemeine Anforderungen*
- EN 13084-2, *Freistehende Schornsteine — Teil 2: Betonschornsteine*
- EN 13084-4, *Freistehende Schornsteine — Teil 4: Innenrohre aus Mauerwerk — Entwurf, Bemessung und Ausführung*
- EN 13084-5, *Freistehende Schornsteine — Teil 5: Baustoffe für Innenrohre aus Mauerwerk — Produktfestlegungen*
- EN 13084-6, *Freistehende Schornsteine — Teil 6: Innenrohre aus Stahl — Entwurf, Bemessung und Ausführung*
- EN 13084-7, *Freistehende Schornsteine — Teil 7: Produktfestlegungen für zylindrische Stahlbauteile zur Verwendung in einschaligen Stahlschornsteinen und Innenrohren aus Stahl*
- EN 13084-8: *Freistehende Schornsteine — Teil 8: Entwurf, Bemessung und Ausführung von Tragmastkonstruktionen mit angehängten Schornsteinen*

Zusätzlich gilt

- EN 1993-3-2, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 3-2: Türme, Maste und Schornsteine — Schornsteine*

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

1 Anwendungsbereich

Diese Europäische Norm behandelt die besonderen Anforderungen und die Leistungskriterien für Entwurf, Bemessung und Ausführung von Innenrohrkonstruktionen aus Mauerwerk für freistehende Industrieschornsteine. In der gängigen europäischen Praxis werden aus einzelnen Abschnitten bestehende Innenrohre (Etagen-Innenrohre) bevorzugt, und die Festlegungen der Norm beziehen sich hauptsächlich auf diese Lösungen, gelten aber auch weitestgehend für unten abgestützte freistehende und horizontal abgestützte Innenrohre. Diese Europäische Norm beschreibt die Anforderungen an die mechanische Festigkeit und Stabilität von Innenrohren entsprechend den allgemeinen Anforderungen nach EN 13084-1.

Innenrohrkonstruktionen bestehen vollständig oder teilweise aus folgenden Teilen:

- Schornsteininnenrohr einschließlich Abgaskanal-Einführung;
- Wärmedämmung;
- Innenrohrabstützung;
- Raum zwischen Innenrohr und Beton-Tragrohr.

Strömungstechnische Berechnungen zur Bestimmung der Innenrohrmaße sind in EN 13084-1 angegeben.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

EN 1052-1, *Prüfverfahren für Mauerwerk — Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit.*

EN 1052-2, *Prüfverfahren für Mauerwerk — Teil 2: Bestimmung der Biegezugfestigkeit.*

EN 13084-1:2000, *Freistehende Schornsteine — Teil 1: Allgemeine Anforderungen.*

EN 13084-5:2005, *Freistehende Schornsteine — Teil 5: Baustoffe für Innenrohre aus Mauerwerk — Produktfestlegungen.*

3 Begriffe und Symbole

3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach EN 13084-1:2000 und die folgenden Begriffe.

3.1.1

unten abgestütztes Innenrohr

Innenrohr, das vertikal nur am Innenrohrboden abgestützt ist

3.1.2

freistehendes Innenrohr

unten abgestütztes Innenrohr ohne andere horizontale Abstützung oder Zwangsführung

3.1.3

horizontal abgestütztes Innenrohr

unten abgestütztes Innenrohr mit horizontalen Zwangsführungen

3.1.4

Etagen-Innenrohr

aus einzelnen Abschnitten bestehendes Innenrohr, das in verschiedenen Höhen vertikal abgestützt ist

3.1.5

Innenrohrabstützung

Bauteile wie Konsolen oder Bühnen, auf denen die einzelnen Abschnitte des Innenrohrs aufgelagert sind

3.1.6

Abgaskanal-Einführung

Abschnitt, in dem die Abgase in das Innenrohr eingeleitet werden

3.1.7

Temperaturgradient

Temperaturdifferenz zwischen der äußeren und inneren Wandoberfläche, bezogen auf die Wanddicke

3.1.8

Temperaturschock

Durch schnelle Wechsel der Abgastemperatur verursachte Einwirkung auf das Innenrohr, die zu Beanspruchungen führt. Diese Einwirkung wird üblicherweise durch unkontrolliertes Herunterfahren, ein Feuer oder das plötzliche Umfahren einer Einrichtung zur Energieerhaltung (z. B. Wärmetauscher) oder Abgasentschwefelung hervorgerufen.

3.1.9

Kompensator

ein System, welches Fugenbewegungen in jeder Richtung unter Beibehaltung der Gasdichtheit ermöglicht

3.2 Symbole

Die in diesem Dokument verwendeten wesentlichen Symbole sind in Tabelle 1 angegeben:

Tabelle 1 — Wesentliche Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit
Sicherheitsbeiwert:		
γ	Teilsicherheitsbeiwert	—
Baustoffeigenschaften:		
f	Festigkeit	N/mm ²
E	Elastizitätsmodul	N/mm ²
σ	Spannung	N/mm ²
α_T	Wärmeausdehnungskoeffizient	K ⁻¹
Einwirkungen:		
T	Wärmeeinwirkungen	—
G	ständige Einwirkungen	—
W	Windeinwirkungen	—
a	Beschleunigung	m/s ²
Maße:		
d	Durchmesser	m
t	Wanddicke	m
Indizes:		
c	Druck	—
t	Zug	—
y	Streckgrenze	—
k	charakteristisch	—
M	Material	

4 Baustoffe

4.1 Allgemeines

Die Wahl des Baustoffes hängt von dem geforderten Betrieb ab.

4.2 Mauerwerk

4.2.1 Allgemeines

Die Art des verwendeten Mauerwerks wird weitestgehend durch den Widerstand von Steinen und Mörtel gegenüber chemischer Beanspruchung bestimmt. Wenn Temperaturschocks zu erwarten sind, erfolgt die Auswahl der Mauersteinarten auf der Grundlage ihrer Beständigkeit gegen Abplatzen und andere dadurch verursachte mechanische Schäden.

Das in diesem Dokument erfasste Mauerwerk besteht aus Steintypen nach EN 13084-5:2005, 5.1 und Mörteltypen nach EN 13084-5:2005: 5.2.

4.2.2 Wärmeeinwirkungen

In Übereinstimmung mit den Anforderungen nach EN 13084-1:2000, 5.2.3.4 muss die Wärmeeinwirkung auf das Mauerwerk besonders in folgender Hinsicht berücksichtigt werden:

- Grenztemperatur der verschiedenen Bauteile;
- Temperaturgradienten innerhalb des Mauerwerks im stationären und instationären Zustand;
- gleichmäßige Temperatur;
- Ausdehnung;
- Temperaturschock.

Berechnungen auf der Grundlage der höchsten Abgastemperatur und der höchsten zu erwartenden Umgebungstemperatur müssen zeigen, dass die zulässigen Temperaturen für die einzelnen Baustoffe nicht überschritten werden.

Zu große Temperaturgradienten können zu Rissen im Innenrohr, insbesondere bei Innenrohren aus Steinen Typ BT1, BT2 und BT3, führen.

Temperaturschock kann Abplatzungen und Risse bei Steinen des Typs BT1, BT2 und BT3 verursachen. Üblicherweise entstehen nur Oberflächenrisse, die jedoch durch den Temperaturgradienten wachsen können.

4.2.3 Klassifizierung und chemische Beanspruchung

4.2.3.1 Allgemeines

Die folgenden Mauerwerksklassen dürfen in Abhängigkeit vom Grad der chemischen Beanspruchung nach EN 13084-1:2000, Tabelle 3 für die Konstruktion von Schornsteininnenrohren verwendet werden:

- Mauerwerk Klasse A: beständig gegen „sehr starke chemische Beanspruchung“;
- Mauerwerk Klasse B: beständig gegen „starke chemische Beanspruchung“;
- Mauerwerk Klasse C: beständig gegen „mittlere chemische Beanspruchung“;

- Mauerwerk Klasse D: beständig gegen „geringe chemische Beanspruchung“;
- Mauerwerk Klasse E: darf keiner „chemischen Beanspruchung“ ausgesetzt werden.

Mörtel Typ MT3 auf der Grundlage von Portlandzement darf nur für die Klassen D und E verwendet werden.

ANMERKUNG Für alle Mauerwerksklassen werden bei Vorhandensein von Alkalien und Temperaturen über 680 °C Steine mit einer geringen Gesamtporosität (maximal 10 %) empfohlen.

4.2.3.2 Mauerwerk Klasse A: beständig gegen „sehr starke chemische Beanspruchung“

Diese Klasse besteht üblicherweise aus:

- Steinen Typ BT1;
- Mörtel Typ MT1 (bei sehr starker chemischer Beanspruchung ausschließlich aufgrund von Säuren: Mörtel Typ MT2).

Die Grenzbetriebstemperatur von Mörtel Typ MT1 muss berücksichtigt werden, wenn außergewöhnliche Temperaturen zu erwarten sind.

Mauerwerk Klasse A, das mit Mörtel Typ MT1 errichtet wird, ist auch gegen alkalische Kondensate beständig.

4.2.3.3 Mauerwerk Klasse B: beständig gegen „starke chemische Beanspruchung“

Diese Klasse besteht üblicherweise aus:

- Steinen Typ BT2;
- Mörtel Typ MT2.

Die Verwendung von Mörtel Typ MT2 ist zulässig bei Temperaturen bis 1000 °C; wenn Temperaturschocks zu erwarten sind, ist die Beständigkeit der Steine gegen Temperaturwechsel von besonderer Bedeutung.

Mauerwerk Klasse B ist nicht beständig gegen alkalische Kondensate.

4.2.3.4 Mauerwerk Klasse C: beständig gegen „mittlere chemische Beanspruchung“

Diese Klasse besteht üblicherweise aus:

- Steinen Typ BT3;
- Mörtel Typ MT2.

Die Verwendung von Mörtel Typ MT2 ist zulässig bei Temperaturen bis 1 000 °C; wenn Temperaturschocks zu erwarten sind, ist die Beständigkeit der Steine gegen Temperaturwechsel von besonderer Bedeutung.

Mauerwerk Klasse C ist nicht beständig gegen alkalische Kondensate.

4.2.3.5 Mauerwerk Klasse D: beständig gegen „geringfügige chemische Beanspruchung“

Diese Klasse besteht üblicherweise aus:

- Steinen Typ BT4;
- Mörtel Typ MT3.

4.2.3.6 Mauerwerk Klasse E: darf keiner chemischen Beanspruchung ausgesetzt werden

Diese Klasse besteht üblicherweise aus:

- Steinen Typ BT4 oder BT5;
- Mörtel Typ MT3.

Mauerwerk Klasse E darf in Innenrohren verwendet werden, die immer sicher oberhalb des (Säure-)Taupunktes betrieben werden.

Steine vom Typ BT5 dürfen nur verwendet werden, wenn mechanische Beanspruchungen wie Erosion oder Abrieb nicht zu erwarten sind.

4.3 Wärmedämmung

Wärmedämmung darf verwendet werden, um den Temperaturgradienten im Innenrohr und im Tragrohr zu verringern und um den Wärmeverlust der Abgase zu reduzieren.

Für diesen Zweck stehen die folgenden Wärmedämmstoffe zur Verfügung:

- Dämmsteine;
- Mineralwolleplatten;
- Schaumglasblöcke;
- Fertigteile aus Vermiculite/Perlite;
- Calciumsilikatblöcke;
- Glaswolleplatten;
- Platten aus keramischer Faser.

Die Festigkeit und Standsicherheit der Wärmedämmstoffe müssen auch im Falle von Schwingungen aufgrund von möglichen pulsierenden Abgasdrücken sichergestellt sein.

5 Entwurf und Bemessung

5.1 Allgemeines

Im Abstand von höchstens 1,0 m vom Boden der untersten Abgaskanal-Einführung entfernt muss eine gasdichte Grundplatte vorhanden sein.

Geeignete Vorrichtungen müssen vorhanden sein, um saure Kondensate an einen sicheren Ort zu leiten.

5.2 Mindestwanddicke

Für die Bestimmung der Mindestwanddicke des Innenrohrs siehe Tabelle 2.

5.3 Innenrohrabstützungen

Abstützungen von Innenrohren aus Mauerwerk müssen eine angemessene Steifigkeit besitzen, um unzulässige ungleichförmige Abstützreaktionen auf das Innenrohr zu vermeiden. Zusätzlich muss bei mehrzügigen Schornsteinen die Verformung der stützenden Bühnen die Einhaltung des erforderlichen Abstandes zwischen dem oberen Ende des Innenrohrs und der oberen Bühne gewährleisten. Abstützungen aus Balkensegmenten, die ihrerseits durch einzelne, aus dem Tragrohr herausragende Konsolen abgestützt werden, müssen durch bewehrte Ortbetonfugen oder andere Mittel Torsionssteifigkeit erhalten.

5.4 Öffnungen

Zur Begrenzung der Auswirkungen unterschiedlicher Temperaturverteilung über den Umfang des Innenrohrs sollten Öffnungen zum Einleiten von Abgasen unterschiedlicher Temperaturen so angeordnet werden, dass ein gutes Durchmischen der einzelnen Abgasströme sichergestellt ist. Sie sollten so dicht wie möglich übereinander angeordnet sein, um das Durchmischen der einzelnen Abgasströme zu verbessern und die Temperaturunterschiede zu verringern, die sonst zu zusätzlichen Beanspruchungen im Mauerwerk führen könnten.

Tabelle 2 — Mindestwanddicken für Innenrohre aus Mauerwerk

	1	2	3	4
	Innendurchmesser <i>d</i> des Innenrohrs m	Mindestwanddicke mm		
		Mauersteine ohne Nut und Feder	Formsteine mit seitlicher Nut und Feder	Formsteine mit umlaufender Nut und Feder
1	$0 < d \leq 4,0$	115	100	64
2	$4,0 < d \leq 6,0$	115	100	80
3	$6,0 < d \leq 8,0$	115	100	100
4	$8,0 < d \leq 10,0$	—	120	120
5	$10,0 < d \leq 12,0$	—	140	140

5.5 Belüftung

Innenrohre aus Mauerwerk werden üblicherweise verwendet, wenn der Abgasdruck geringer als der Umgebungsdruck außerhalb des Mauerwerks auf gleicher Höhe ist. Ein Überdruck von begrenzter Dauer ist zulässig; dieser sollte jedoch bei der Beurteilung der chemischen Belastung berücksichtigt werden.

Wenn die strömungstechnischen Berechnungen zeigen, dass wesentliche Betriebszeiträume zu erwarten sind, in denen der Abgasdruck höher als der Druck in dem Raum zwischen Innenrohr und Tragrohr ist, so wird eine Druckerhöhung im Zwischenraum durch Gebläse und die Anordnung von Kompensatoren erforderlich.

Wird während des Betriebs eines Innenrohrs der Zugang in den Raum zwischen Innenrohr und Tragrohr erforderlich, so muss ausreichende Belüftung vorhanden sein, damit keine Abgase aus dem Innenrohr entweichen. Das Belüftungssystem muss den Anforderungen nach EN 13084-1:2000, 4.5 entsprechen.

Darüber hinaus kann die Belüftung auch zum Kühlen und zum Vermeiden wesentlicher thermischer Beanspruchungen der Innenrohrabstützungen genutzt werden.

5.6 Schutzschichten

Der Schutz der Betonoberflächen innerhalb des Tragrohres darf durch eine geeignete, chemikalienbeständige Beschichtung oder einen dünnen Überzug erfolgen, deren Dauerhaftigkeit und Langzeitbeständigkeit unter feuchten und trockenen Bedingungen im Abgas mit den zu erwartenden Betriebstemperaturen nachgewiesen wurden.

Es muss eine säurebeständige Beschichtung auf alle Teile der Stützkonstruktion aufgetragen werden, die für eine regelmäßige Inspektion und Wartung nur erschwert zugänglich sind. Zusätzlich muss eine säurebeständige Folie zwischen Abstützung und abgestütztem Mauerwerk vorgesehen werden. Diese Folie kann aus Blei oder einer anderen chemisch beständigen Beschichtung bestehen.

Ist ein begehbare Zwischenraum vorhanden, muss die Innenfläche des Tragrohres geschützt werden, insbesondere wenn wesentliche Betriebszeiträume mit Abgasüberdruck zu erwarten sind.

Horizontale Oberflächen von Wartungsvorrichtungen oder Abstützungen (Platten, Balken usw.) müssen über ein System zum Ableiten von Kondensaten verfügen, wenn die Bildung aggressiver Kondensate zu erwarten ist.

5.7 Zusatzeinrichtungen

5.7.1 Fugen

An den Fugen zwischen den Innenrohrabschnitten muss unter Betriebsbedingungen in jeder Richtung ein Abstand von mindestens 30 mm zwischen dem Innenrohr und dem nächsten Innenrohr oder seiner Abstützung sein.

ANMERKUNG Bei „sehr starker“ und „starker“ chemischer Beanspruchung neigt das Mauerwerk im Laufe der Zeit zu einer irreversiblen Ausdehnung infolge der chemischen Reaktion zwischen Mauerwerk und dem sauren Kondensat. Diese irreversible Ausdehnung kann bis zu 0,15 % betragen.

Die Fugen vermindern die Gasdichtheit des Innenrohrs; um ein Ansammeln von Ablagerungen und Kondensat zu verhindern, können die Fugen mit Matten, Schnüren und ähnlichen Materialien, deren Eigenschaften entsprechend den Betriebsbedingungen ausgewählt werden, ausgefüllt werden.

5.7.2 Kompensatoren

Ein Kompensator sollte geeignet sein, die Fugen zwischen den Abschnitten von Innenrohren aus Mauerwerk abzudichten, um die Gasdichtheit des Innenrohrs zu erhöhen (siehe Anhang C).

5.7.3 Einführungskanäle und Gebläse

Die Schwingungen von Einführungskanälen oder Gebläsen außerhalb des Schornsteines können zu Schwingungen des Innenrohres führen. Die Übertragung dieser Schwingungen muss durch geeignete Maßnahmen verhindert werden.

6 Berechnung und Bemessung

6.1 Einwirkungen

6.1.1 Allgemeines

Zu berücksichtigende Einwirkungen sind in EN 13084-1 angegeben. Zusätzlich gelten die folgenden Festlegungen.

6.1.2 Windlasten

Das Innenrohr ist durch das Tragrohr gegen Wind geschützt, so dass bei Etagen-Innenrohren der Wind nur durch die dynamische Reaktion des Beton-Tragrohres wirken kann; d. h., es wird angenommen, dass die Beanspruchung in den Innenrohrabschnitten nur durch die Beschleunigung des Tragrohres in Höhe der Innenrohrabstützungen hervorgerufen wird.

ANMERKUNG 1 Die dynamische Reaktion des Beton-Tragrohres wird nur durch den Teil der zeitlich veränderlichen Windböen hervorgerufen, der den dynamischen Effekt erfasst (im Gegensatz zu dem Teil der Hintergrundturbulenz (background turbulence)). Ferner sind höhere Schwingungsformen der Beton-Tragrohrreaktion hinsichtlich dieser Böen unbedeutend. Folglich müssen nur die durch die Grundschiwingung des Tragrohres hervorgerufenen Beanspruchungen berücksichtigt werden. Ähnliche Betrachtungen gelten für die in Anhang D behandelten, d. h., es gibt keine Resonanzvergrößerung dieser Lasten. Bei typischen Schornsteinen ist die resultierende Spitzenbeschleunigung des Innenrohrs kleiner als $0,05 g$ und kann vernachlässigt werden.

Wenn die einzelnen Abschnitte von Etagen-Innenrohren wesentlich kürzer als die Höhe des Tragrohres sind, wird keine Resonanz durch Windanregung auftreten, und deshalb können Einwirkungen durch Wind vernachlässigt werden, ausgenommen für den gegebenenfalls über das Tragrohr überstehenden Teil des Innenrohres.

ANMERKUNG 2 Es wird empfohlen, den über das Tragrohr überstehenden Teil durch eine gesonderte konzentrisch angeordnete Abschirmung aus Beton oder Mauerwerk zu schützen.

6.1.3 Einwirkungen aus Erdbeben

Einwirkungen aus Erdbeben führen durch die Beschleunigung des Tragrohres in Höhe der Innenrohrabstützung zu Spannungen in den Innenrohrquerschnitten. Die Berechnung der dynamischen Beanspruchung ist in Anhang D enthalten.

6.1.4 Wärmeeinwirkungen

Wärmeeinwirkungen auf das Innenrohr aus Mauerwerk müssen in folgenden Fällen, in denen die Wärmeströmung Temperaturgradienten innerhalb des Innenrohres verursacht, berücksichtigt werden:

- stationäre Wärmeströmung;
- instationäre Wärmeströmung.

Spannungen infolge Wärmeeinwirkungen bei stationärer und bei instationärer Wärmeströmung können nach Anhang F berechnet werden.

Die größte Beanspruchung aus Wärmeeinwirkung bei stationärer Wärmeströmung wird durch die höchste zu erwartende Betriebstemperatur und die niedrigste Umgebungstemperatur verursacht.

Die größte Beanspruchung aus Wärmeeinwirkung bei instationärer Wärmeströmung kann berechnet werden, indem eine erhöhte Temperatur von $1,1 T_0$ oder $(T_0 + 30 \text{ K})$ angenommen wird, wobei der größere Wert gilt und T_0 die höchste Temperatur unter den zu erwartenden Betriebsbedingungen ist.

Wenn ein einzelnes Innenrohr aus Mauerwerk Abgase unterschiedlicher Temperatur aus zwei oder mehr Zügen abführt, kommt es im unteren Innenrohrabschnitt zu zusätzlichen Wärmeeinwirkungen. In diesen Fällen sollten Trennungen, die das Vermischen der Abgase behindern, nicht verwendet werden.

ANMERKUNG Im Allgemeinen sind Turbulenzen an den Abgaskanal-Einführungen, obwohl sie zu örtlichen Druckverlusten führen, nützlich, denn sie verstärken das Durchmischen der Abgasströme und reduzieren auf diese Weise die Temperaturunterschiede, die sonst höhere Spannungen im Mauerwerk verursachen würden.

6.1.5 Innendruck und Explosionen

Gelegentlicher Überdruck während des Betriebes wird im Allgemeinen zu keinen wesentlichen Zugspannungen im Innenrohr führen. Dennoch sollte der Druck abgeschätzt und Mauerwerksspannungen überprüft werden, wenn Überdruck zu erwarten ist (siehe EN 13084-1:2000, 5.2.3.3 und 5.2.4.2).

Wenn ein Pulsieren des Abgasdruckes zu erwarten ist, sollte die Möglichkeit der Resonanz untersucht werden.

6.2 Widerstände

Bezug nehmend auf die in 4.2.3 festgelegte Zusammensetzung des Mauerwerks sind die charakteristischen Werte der mechanischen Eigenschaften nach Tabelle 3 anzunehmen, sofern keine Ergebnisse aus Mauerwerkprüfungen nach EN 1052-1 und EN 1052-2 vorliegen.

Tabelle 3 — Charakteristische Werte mechanischer Eigenschaften von Mauerwerk

Mauerwerks- klasse	Druckfestigkeit f_k	Biegezug- festigkeit f_{x1k} ^a	Elastizitäts- modul E	Poisson- zahl ν	Wärmeausdeh- nungskoeffizient α_T
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²		K ⁻¹
A	25 (15) ^b	3 ^c (2) ^{b,c}	1,5 × 10 ⁴	0,23	6 × 10 ⁻⁶
B	15	2 ^c			
C	15	2 ^c			
D	10	0,4	10 ⁴		
E	6,5	0,4			

a Parallel zu den Lagerfugen.
b Bei Verwendung von Mörtel Typ MT2.
c Darf auch für die Zugfestigkeit f_{x2k} rechtwinklig zu den Lagerfugen angenommen werden, wenn Steine mit umlaufender Nut und Feder verwendet werden.

6.3 Nachweis

6.3.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit

6.3.1.1 Allgemeines

Die Standsicherheit eines Innenrohres aus Mauerwerk ist nachzuweisen, wenn die Höhe h_l der einzelnen Abschnitte größer als 20 m oder die Wanddicke des Innenrohres weniger als 100 mm oder die Schlankheit h_l/d größer als 10 ist, wobei die Schlankheit das Verhältnis der Höhe zum kleinsten Außendurchmesser ist.

Die Tragfähigkeit des Innenrohres muss mit den berechneten Beanspruchungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit verglichen werden. Die Einwirkungen umfassen: Einwirkungen aus Erdbeben oder Wind (einschließlich Reaktionen aus Schwingungen des Tragrohres, sofern wesentlich), ständige Einwirkungen, Wärmeeinwirkungen und Innendruck.

Die Bemessungskriterien bei Vorhandensein von Öffnungen sind Anhang B zu entnehmen.

6.3.1.2 Einwirkungskombinationen und Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen

6.3.1.2.1 Nachweis in horizontalen Schnitten

Der Bemessungswert der Beanspruchungen in horizontalen Schnitten des Innenrohres muss für folgende Einwirkungskombinationen nach den Gleichungen (1) und (2) und Tabelle 4 berechnet werden.

Für ständige Bemessungssituationen:

$$E_d = \gamma_G \times G_k + \gamma_{Q1} \times Q_{k1} + \sum_{i>1} \gamma_{Qi} \times \psi_{0i} \times Q_{ki} \tag{1}$$

Für außergewöhnliche Bemessungssituationen (Erdbebeneinwirkungen):

$$E_{dE} = G_k + A_{Ed} \tag{2}$$

Dabei ist

- E_d der Bemessungswert der Beanspruchungen (Grundkombination);
- E_{dE} der Bemessungswert der Beanspruchungen aus der Kombination bei Erdbeben (Erdbebeneinwirkungen);
- γ_G der Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen;
- γ_Q der Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Einwirkungen;
- A_{Ed} der Bemessungswert für Erdbeben;
- G_k der charakteristische Wert der ständigen Einwirkungen;
- Q_{k1} der charakteristische Wert der maßgebenden veränderlichen Einwirkung 1;
- Q_{ki} der charakteristische Wert einer nicht maßgebenden veränderlichen Einwirkung i ;
- ψ_{0i} der Kombinationsbeiwert.

Tabelle 4 — Einwirkungskombinationen für ständige Bemessungssituationen^a

Kombination	G_k	Q_{k1}	Q_{k2}
1	G	W	T_{st}
2	G	T_{st}	—
3	G	T_{tr}	—
^a G ständige Einwirkung W Windeinwirkung T_{st} Wärmeeinwirkung infolge größtmöglicher Temperaturgradienten bei stationären Bedingungen T_{tr} Wärmeeinwirkung infolge größtmöglicher Temperaturgradienten bei instationären Bedingungen			

ANMERKUNG Die Werte γ_G , γ_{Qi} und ψ_{0i} im Grenzzustand der Tragfähigkeit für die Anwendung in einem Land sind in seinem nationalen Anhang angegeben. Die empfohlenen Werte für γ_G und γ_{Qi} sind Tabelle 5N zu entnehmen. Der empfohlene Wert für $\psi_{0i} = \psi_{02}$ beträgt 0,6.

Tabelle 5N — Teilsicherheitsbeiwerte γ_G und γ_{Qi} für Einwirkungen

Einwirkung	G	W	T_{st}	T_{tr}
	$\gamma_G = 1,0$	$\gamma_{Qi} = 1,5^a$	$\gamma_{Qi} = 1,3$	$\gamma_{Qi} = 1,3$
^a Für Abschnitte außerhalb des Tragrohrs $\gamma_{Qi} = 1,6$.				

6.3.1.2.2 Nachweis in senkrechten Schnitten

Für die Ermittlung der Beanspruchungen in senkrechten Schnitten des Innenrohres ist die allein zu berücksichtigende Einwirkung der Innendruck, für den ein Teilsicherheitsbeiwert γ_{Q1} anzunehmen ist.

ANMERKUNG Der Wert γ_{Q1} im Grenzzustand der Tragfähigkeit für die Anwendung in einem Land ist in seinem nationalen Anhang angegeben. Der empfohlene Wert für γ_{Q1} beträgt 1,3.

Für den Fall einer Explosion im Innern oder bei wesentlichem Überdruck muss davon ausgegangen werden, dass das Mauerwerk gerissen ist und Stahlbänder oder Vorspannen erforderlich sind (siehe Anhang E).

In kreisförmigen Querschnitten führt der Innendruck lediglich zu Normalkräften, während in nicht-kreisförmigen Querschnitten auch Biegemomente zu berücksichtigen sind.

Wenn der Abgasunterdruck sehr hoch ist, können die Biegemomente aufgrund der Abweichung des Innenrohres von der Kreisform zu Rissen bis hin zum Einsturz führen. Eine Sicherheitsüberprüfung sollte an einem nicht kreisförmigen Innenrohr oder an einem kreisförmigen Innenrohr, dessen Form die in 7.2 angegebenen Toleranzen überschreitet, durchgeführt werden.

6.3.1.3 Teilsicherheitsbeiwerte für Baustoffe

Teilsicherheitsbeiwerte γ_M für Mauerwerk sind im Grenzzustand der Tragfähigkeit anzusetzen.

ANMERKUNG Die Werte γ_M im Grenzzustand der Tragfähigkeit für die Anwendung in einem Land sind in seinem nationalen Anhang angegeben. Die empfohlenen Werte für γ_M sind in Tabelle 6N zu entnehmen.

Tabelle 6N — Teilsicherheitsbeiwerte γ_M für Mauerwerk

Beanspruchung	γ_M
Druck	3,0
Zug	1,3

6.3.2 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

6.3.2.1 Verformung

Die Verformung durch Wärmeeinwirkung ist durch Festlegen von Abständen (Spiel) bei der höchsten Betriebstemperatur zu berücksichtigen. Verformung durch chemische Einwirkungen kann nicht genau vorherbestimmt werden und ist durch sorgfältige Wahl der Baustoffe zu vermeiden.

Verformung infolge mechanischer Beanspruchung und Durchbiegung dauerhaft vorhandener Abstützkonstruktionen muss unter Lastbedingungen berücksichtigt werden.

Mögliche Rissbildung muss bei der Berechnung von Verformungen der Abstützkonstruktionen berücksichtigt werden.

6.3.2.2 Rissbildung

Vertikale Rissbildung des Mauerwerks kann durch den Temperaturgradienten über die Wanddicke, durch Temperaturschocks, Überdruck und durch Biegebeanspruchung des nicht kreisförmigen Innenrohres unter Innendruck verursacht werden.

Zur Begrenzung der Rissbreite ist nachzuweisen, dass die Biegezugbeanspruchungen die Biegezugfestigkeit des Mauerwerks nach Tabelle 3 nicht überschreiten.

Für den Nachweis der Biegezugbeanspruchungen im Gebrauchszustand müssen folgende Einwirkungen als unabhängig voneinander wirkend betrachtet werden:

P größter Überdruck;

T größter Temperaturgradient;

M Biegung durch Innendruck bei nicht kreisförmigen Innenrohren.

6.3.2.3 Teilsicherheitsbeiwerte

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit sind die Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen, γ_F , und für Baustoffe, γ_M , anzusetzen.

ANMERKUNG Die Werte γ_F und γ_M im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit für die Anwendung in einem Land sind in seinem nationalen Anhang angegeben. Der empfohlene Wert für γ_F und γ_M beträgt 1,0.

6.3.3 Berechnung der Beanspruchungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit

6.3.3.1 Allgemeines

Die Druck- und Zugbeanspruchungen müssen für die in 6.3.1.2 angegebenen Einwirkungen oder Einwirkungskombinationen berechnet werden.

Die Bemessungswerte der resultierenden Beanspruchungen dürfen die Bemessungswerte der Widerstände, abgeleitet durch Division der charakteristischen Festigkeiten nach 6.2, durch den entsprechenden Teilsicherheitsbeiwert γ_M , nicht überschreiten.

Beanspruchungen aus Wärmeeinwirkungen dürfen nach Anhang F ermittelt werden.

6.3.3.2 Beanspruchungen in horizontalen Schnitten

Die Beanspruchungen für Mauerwerk der Klassen A, B und C bei Verwendung von Steinen mit umlaufender Nut und Feder sind unter der Annahme zu berechnen, dass horizontale Fugen Zugbeanspruchungen, die die Bemessungswerte der Biegezugfestigkeit nach 6.3.3.1 nicht überschreiten, aufnehmen können. Wenn die resultierenden Zugbeanspruchungen die genannten Grenzwerte überschreiten, müssen die Beanspruchungen erneut unter der Annahme berechnet werden, dass die Fugen keine Zugbeanspruchungen aufnehmen können (d. h., sie öffnen sich unter Zug). In diesem Fall dürfen sich die Fugen nicht mehr als über den halben Umfang öffnen.

Die Beanspruchungen für Mauerwerk der Klassen A, B und C bei Verwendung von Steinen ohne umlaufende Nut und Feder sowie für Mauerwerk der Klassen D und E sind unter der Annahme zu berechnen, dass horizontale Fugen keine Zugbeanspruchungen aufnehmen können (d.h. sie öffnen sich unter Zug). Die Fugen dürfen sich nicht mehr als über den halben Umfang öffnen.

Örtliche Beanspruchungen durch Wärmeeinwirkung sind zu den im gesamten Querschnitt wirkenden globalen Beanspruchungen zu addieren. Besonders berücksichtigt werden müssen die Beanspruchungen in den horizontalen Fugen in der Nähe des oberen Endes des Innenrohrs, wo Beanspruchungen aus Wärmeeinwirkung durch Randeffekte verstärkt werden und die Haftfähigkeit des Mörtels verringert ist.

Für die Ermittlung der Beanspruchungen aus Wärmeeinwirkung darf der Elastizitätsmodul Tabelle 3 entnommen werden, sofern nicht Werte aus der Prüfung nach EN 1052-2 zur Verfügung stehen.

6.3.3.3 Beanspruchungen in vertikalen Schnitten

Die Beanspruchungen sind für die in 6.3.1.2.2 angegebenen Einwirkungen unter der Annahme, dass die vertikalen Schnitte Zugbeanspruchungen, die die Bemessungswerte der Biegezugfestigkeit nach 6.3.3.1 nicht überschreiten, zu berechnen. Wenn die resultierenden Zugbeanspruchungen die genannten Grenzwerte überschreiten, müssen die Beanspruchungen erneut unter der Annahme berechnet werden, dass die Fugen keine Zugbeanspruchungen aufnehmen können (d. h. sie öffnen sich unter Zug). In diesem Fall dürfen sich die Fugen nicht mehr als über die halbe Wanddicke öffnen

6.3.4 Elastische Stabilität

Instabilität eines Innenrohrs kann durch Knicken oder durch lokales Beulen aufgrund der Eigenlasten verursacht werden.

Die Gesamtstabilität eines Innenrohrs aus Mauerwerk wird stark verringert, wenn sich lange vertikale Risse gebildet haben. Praktisch wird jedes Innenrohr unsicher, wenn sich so viele Risse gebildet haben, dass das Mauerwerk aus Pfeilern, die einzeln zwischen den Rissen stehen, besteht.

Eine Verbesserung kann durch das Anbringen von Stahlbändern oder Bewehrung des Innenrohrmauerwerks erreicht werden (siehe Anhang E).

Bei Einhaltung der in 7.2 festgelegten Toleranzen tritt örtliches Beulen in der Regel nicht auf.

Angaben zu unten abgestützten freistehenden und horizontal abgestützten Innenrohren sind in Anhang A enthalten.

7 Ausführung

7.1 Imperfektionen

Bauliche Imperfektionen wie örtliche Unrundheit der kreisförmigen Querschnitte, Abweichungen von der die zylindrische oder konische Form erzeugenden Geraden, Abweichungen der Innenrohrachse von der Vertikalen, unzureichender Abstand zwischen Innenrohr und Abstützungen usw. führen zu außerplanmäßigen Belastungen, die auch den Einsturz des Innenrohrs aus Mauerwerk verursachen können. Die in 7.2 festgelegten Toleranzen müssen in den Konstruktionszeichnungen angegeben und während des Baus vollständig eingehalten werden.

7.2 Toleranzen

Die radiale Abweichung vom idealen Kreis, gemessen über eine Bogenlänge $(d \times t)^{0,5}$ darf 1 % des Durchmessers oder 20 % der Wanddicke nicht überschreiten, wobei jeweils der kleinere Wert gilt.

Dabei ist

d der Durchmesser in der betrachteten Höhe;

t die Wanddicke.

Abweichungen des Mauerwerks von der die zylindrische oder konische Form erzeugenden Geraden dürfen nicht den jeweils kleineren Wert von 40 mm oder 0,15 d überschreiten.

Abweichungen der Innenrohrachse von der Vertikalen dürfen nicht größer als 0,2 % der Höhe sein.

8 Inspektion und Instandhaltung

8.1 Allgemeines

Inspektion und Instandhaltung sollten aus den folgenden Schritten bestehen:

- a) Einsehen von Angaben aus früheren Inspektionen und Reparaturen;
- b) Vorbereiten der Inspektion durch Feststellen besonders gefährdeter Bereiche, Festlegen der für die Messungen erforderlichen Maßnahmen und Entnahme von Proben;
- c) Auswerten der gesammelten Angaben in einem Bericht mit den folgenden Einzelheiten:
 - Allgemeineindruck;
 - Erläuterung der Messwerte;
 - Schlussfolgerungen aus Sichtprüfungen;
 - Schlussfolgerungen aus Laboratoriumsprüfungen;
 - Bewerten des Alterungsgrades;
 - Festlegen der erforderlichen Reparaturarbeiten;
- d) Angaben der folgenden Informationen soweit Zugänglichkeit und Zeit es ermöglichen:
 - wahrscheinliche Ursache des Schadens;
 - angenommene Schadensentwicklung;
 - Vorschlag von Maßnahmen mit Einzelheiten;
- e) Reparaturen; sobald beschlossen ist, das Innenrohr aus Mauerwerk zu reparieren, sollten mindestens das Verfahren, der Umfang und die Güte der Reparaturarbeiten in einem Bericht deutlich beschrieben werden, der eine Checkliste enthält.

8.2 Anwendungsbereiche der Inspektion

8.2.1 Innenrohr aus Mauerwerk

- a) Reduzierung der Wanddicke, vor allem bedingt durch:
 - Temperaturschocks;
 - chemische Beanspruchungen;
 - Erosion und Abnutzung;
 - Frosteinwirkung.
- b) Risse, die eingeteilt werden können in:
 - lokale Mikrorisse und häufig als Folge Makrorisse;
 - Risse, die große Bereiche des Innenrohrs aus Mauerwerk erfassen.

- c) Einschränkung der freien Beweglichkeit von Innenrohrabschnitten, vor allem infolge von:
- chemischen Reaktionen zwischen Kondensaten und Mauerwerk, die zu einer irreversiblen Ausdehnung und folglich zum Blockieren der Dehnungsfugen führen;
 - verminderter Wirksamkeit der Fugen infolge fester Ablagerungen;
 - fehlendem Abstand zwischen dem(n) Innenrohr(en) und den Abstützungen.

8.2.2 Wärmedämmung

- a) Eine Beschädigung der Wärmedämmung kann auftreten infolge von:
- Minderung der physikalischen oder chemischen Eigenschaften durch Hitze oder chemische Beanspruchungen;
 - teilweisem oder vollständigem Einsturz von Abschnitten.
- b) Maßnahmen zur Beseitigung der Mängel an der Wärmedämmung sollten ergriffen werden.

8.3 Häufigkeit

Die Häufigkeit der Inspektions- und Wartungsarbeiten wird bedingt durch:

- Brennstofftyp: die Verwendung von Heizöl erfordert eine größere Häufigkeit als Kohle oder Gas;
- intermittierenden oder Dauerbetrieb: ersterer erfordert eine größere Häufigkeit der Arbeiten;
- Wärme- und chemische Einwirkungen: Betriebsbedingungen unterhalb des Taupunktes können zu bedeutenden chemischen Beanspruchungen führen und erfordern eine größere Häufigkeit der Arbeiten;
- Temperaturschocks infolge plötzlicher Temperaturänderung während des Betriebes und/oder zu schnelles Hoch- oder Abfahren. Dies erfordert eine größere Häufigkeit der Arbeiten.

8.4 Durchführung

- a) Die Inspektion im Inneren eines Schornsteininnenrohres aus Mauerwerk kann mit folgenden Verfahren durchgeführt werden:
- Einsatz einer wärmebeständigen Kamera, so dass der Schornstein nicht außer Betrieb genommen werden muss;
 - Einsatz einer beweglichen Bühne oder einer ferngesteuerten Kamera, nachdem der Schornstein außer Betrieb genommen wurde.

Während des Herunterfahrens muss die Temperaturabsenkung überprüft werden, um Beanspruchungen aus Wärmeeinwirkung im Mauerwerk infolge des Temperaturgradienten zu vermeiden.

- b) Die Unversehrtheit der Wärmedämmung hat einen großen Einfluss auf die Lebensdauer des Innenrohres aus Mauerwerk.

Die Inspektion und Reparatur der Wärmedämmung werden erleichtert, wenn Schornsteine mit begehbarem Zwischenraum vorgesehen sind und sichere Arbeitsbedingungen vorliegen.

- c) Die Reparatur von Innenrohren aus Mauerwerk erfordert eine beträchtliche Zeit für den Aufbau und den Abbau der benötigten Einrichtung, so dass Reparaturen sorgfältig geplant und, so weit wie möglich, kleinere Reparaturen vermieden werden sollten. Bevorzugt werden sollte der Austausch vollständiger Innenrohrabschnitte.

Während der Rekonstruktion von Innenrohrabschnitten sollten die Abstützungsstrukturen und die verschiedenen Beschichtungen überprüft und repariert, die Fugen zwischen den Abschnitten gereinigt werden, um die Wärmeausdehnung zu ermöglichen, und Kompensatoren sollten, falls vorhanden, repariert oder ausgetauscht werden.

Anhang A (informativ)

Berechnung und Bemessung von unten abgestützten Innenrohren

A.1 Allgemeines

Einwirkungen aus Wind und Erdbeben bedingen unterschiedliche Berechnungs- und Bemessungsannahmen für freistehende und horizontal abgestützte Innenrohre aus Mauerwerk.

Ein unterschiedliches Herangehen ist erforderlich für:

- Freistehende Innenrohre aus Mauerwerk

Die Verformung des Tragrohrs sollte die Verformung des Innenrohres aus Mauerwerk nicht behindern.

Hinsichtlich Einwirkungen aus Wind ist nur der Anteil des gegebenenfalls vorhandenen überstehenden Innenrohrabschnittes zu berücksichtigen.

- Horizontal abgestützte Innenrohre aus Mauerwerk

Die Verformung des Tragrohrs ruft entsprechende Einwirkungen auf das Mauerwerk in Höhe der horizontalen Abstützungen hervor.

Wenn

- der Abstand zwischen den Abstützungen,
- die maßgebende Masse,
- das maßgebende Trägheitsmoment,
- der Elastizitätsmodul

gegeben sind, ist es unter Berücksichtigung der Anteile an statischen und dynamischen Verformungen des Trag- und Innenrohres möglich, die Beanspruchungen in jeder Höhe der Abstützung des Innenrohres aus Mauerwerk zu berechnen.

Hinsichtlich Einwirkungen aus Wind wird nur der am oberen Ende überstehende Teil zu einer Verformung des Innenrohres aus Mauerwerk beitragen.

Einzellasten sollten angemessen verteilt sein.

A.2 Elastische Stabilität

A.2.1 Allgemeines

Örtlich begrenztes Beulen tritt bei freistehenden Innenrohren in der Regel nicht auf.

Die hinsichtlich der Knicksicherheit zulässige Höhe des Innenrohrs kann unter Berücksichtigung folgender Annahmen berechnet werden.

A.2.2 Elastische Stabilität des ungerissenen Rohres

Das Knicken eines freistehenden vertikalen Zylinders unter Einwirkung seines Eigengewichts wird in der einschlägigen Literatur beschrieben.

Die kritische Höhe, h_{crit} , kann mit Gleichung (A.1) berechnet werden:

$$q \times h_{\text{crit}} = 7,8 \frac{EI}{h_{\text{crit}}^2} \quad (\text{A.1})$$

Dabei ist

q das Eigengewicht je Längeneinheit;

für ein zylindrisches Innenrohr aus Mauerwerk mit der Wanddicke t :

$$q = \rho \times g \times t \times 2 \pi r;$$

EI die Biegesteifigkeit des vertikalen Rohres;

E der Elastizitätsmodul des Mauerwerks = 10^{10} N/m²;

I das Flächenmoment 2. Grades = $\pi r^3 \times t$;

ρ die Rohdichte = 2 000 kg/m³;

g die Erdbeschleunigung = 9,81 m/s²;

r der mittlere Radius, in Meter;

t die Wanddicke in Meter;

Durch Substitution in Gleichung (A.1) ergibt sich:

$$h_{\text{crit}}^3 = \frac{7,8 \times 10^{10} \times \pi r^3 t}{2\,000 \times 9,81 \times t \times 2 \pi r} = 1,99 \times 10^6 \times r^2 \quad (\text{A.2})$$

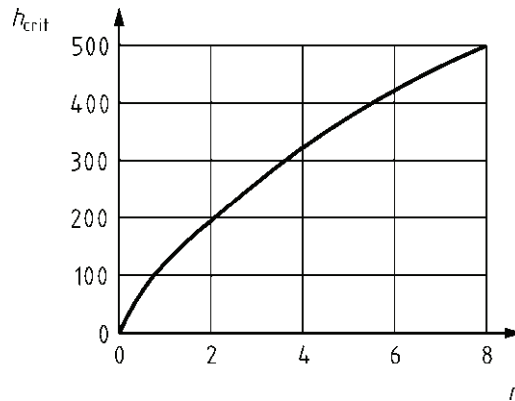
$$h_{\text{crit}} = 125 r^{2/3} \quad (\text{A.3})$$

Dabei ist

h_{crit} die kritische Höhe, in Meter;

r der mittlere Radius, in Meter.

D. h., die kritische Höhe eines Zylinders ist unabhängig von der Wanddicke.



Legende

- h_{crit} kritische Höhe eines freistehenden Innenrohrs aus Mauerwerk
 r mittlerer Radius eines freistehenden Innenrohrs aus Mauerwerk

Bild A.1 — Kritische Höhe eines freistehenden, ungerissenen Innenrohrs aus Mauerwerk

Wenn die Wanddicke am unteren Ende größer ist als am oberen Ende, ist die kritische Höhe größer als die mit Gleichung (A.3) berechnete; die Zunahme beträgt jedoch höchstens 10 %. Die Beziehung zwischen h_{crit} und r in Gleichung (A.3) ist in Bild A.1 dargestellt.

A.2.3 Elastische Stabilität freistehender vertikaler Pfeiler

Der Teil eines Innenrohrs zwischen zwei vertikalen, nicht mehr als ein oder zwei Meter voneinander entfernten Rissen kann wie eine freistehende ebene Wand angesehen werden.

Die kritische Höhe h_{crit} eines derartigen Mauerwerkspfeilers kann mit Gleichung (A.1) und den folgenden Substitutionen berechnet werden:

$$q = \rho \times g \times t \times b$$

Dabei ist

- g die Erdbeschleunigung = 9,81 m/s²;
 ρ die Rohdichte = 2 000 kg/m³;
 b der Abstand zwischen den Rissen in Meter (1 m bis 2 m);
 t die Wanddicke in Meter;

$$I \quad \text{das Flächenmoment 2. Grades} = \frac{b t^3}{12};$$

$$E \quad \text{der Elastizitätsmodul des Mauerwerks} = 10^{10} \text{ N/m}^2.$$

Mit diesen Werten ergibt sich:

$$h_{crit}^3 = \frac{7,8 \times 10^{10} \times \frac{b}{12} t^3}{2000 \times 9,81 \times b \times t} = 3,3 \times 10^5 t^2 \quad (\text{A.4})$$

$$h_{\text{crit}} = 69 t^{2/3} \tag{A.5}$$

Dabei ist

h_{crit} die kritische Höhe, in Meter;

t die Wanddicke, in Meter.

Die äquivalente Dicke einer sich linear ändernden Wanddicke darf angenähert werden mit:

$$t = 0,2 (4 t_{\text{base}} + t_{\text{top}})$$

Dabei ist

t_{base} die Wanddicke am unteren Ende des Innenrohres;

t_{top} die Wanddicke am oberen Ende des Innenrohres.

Einige Werte für h_{crit} sind in Tabelle A.1 aufgeführt. Dabei wurde der Einfluss der Krümmung des Rohrsegmentes vernachlässigt.

Tabelle A.1 — Kritische Höhe in Abhängigkeit von der Wanddicke

Wanddicke t m	Kritische Höhe h_{crit} m
0,05	9
0,10	15
0,15	20
0,20	24
0,25	27

A.2.4 Elastische Stabilität eines halben Rohres

Ein Innenrohr mit zwei vertikalen Rissen kann wie zwei von einander unabhängige vertikale halbe Rohre angesehen werden. Die Stabilität eines durch zwei vertikale Linien aufgeschnittenen Rohres ist ein sehr kompliziertes analytisches Problem. Aus diesem Grunde wurde die Stabilität von zwei Halbrohren durch ein numerisches Verfahren ermittelt.

In diesem Fall wird von der Annahme ausgegangen, dass die kritische Höhe, h_{crit} , von dem Radius, r , und der Wanddicke, t , abhängig ist:

$$q \times h_{\text{crit}} = c_1 \frac{E r^3 t}{h_{\text{crit}}^2} + c_2 \frac{E t^3 r}{h_{\text{crit}}^2} \tag{A.6}$$

Definitionen und Einheiten der Variablen siehe A.2.2

Die Werte von c_1 und c_2 lassen sich durch ein numerisches Verfahren bestimmen:

Durch Substitution von $q = \rho \times g \times t \times \pi \times r$ wird

$$h_{\text{crit}}^3 = 0,44 \times 10^5 \times r^2 + 110 \times 10^5 \times t^2 \quad (\text{A.7})$$

oder

$$h_{\text{crit}} = \left(0,44 \times 10^5 r^2 + 110 \times 10^5 t^2\right)^{1/3} \quad (\text{A.8})$$

Dabei ist

- h_{crit} die kritische Höhe, in Meter;
- r der mittlere Radius des Innenrohrs, in Meter;
- t die Wanddicke, in Meter.

Ein Vergleich der Koeffizienten dieser Gleichung mit den Koeffizienten der Gleichungen (A.3) und (A.5) zeigt, dass die kritische Höhe sehr viel geringer ist als die des ungerissenen Zylinders, jedoch sehr viel höher als die eines schmalen Mauerwerkspfegers (d.h. ein Zylinder mit vielen Rissen).

Der erste Ausdruck in Gleichung (A.8) ist in der Regel der wichtigere. Die äquivalente Dicke einer sich linear ändernden Wanddicke kann angenähert werden durch:

$$t = 0,2 (4 t_{\text{base}} + t_{\text{top}})$$

Dabei ist

t_{base} und t_{top} wie in A.2.3 definiert.

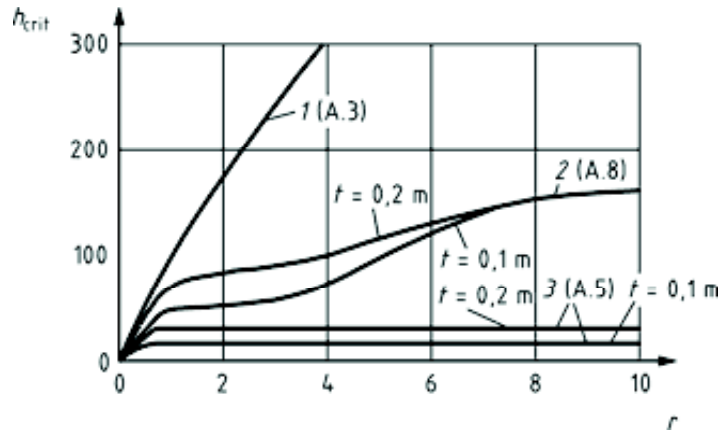
Als ein Beispiel sind die Abmessungen der Halbrohre und die Berechnungsergebnisse in Tabelle A.2 angegeben.

Tabelle A.2 — Berechnungsergebnisse bei vorgegebenen Innenrohrmaßen

Radius r m	Wanddicke t m	Kritische Höhe h_{crit} m
4,0	0,10	93
4,0	0,20	105

A.2.5 Vergleich der drei Berechnungsverfahren und Schlussfolgerungen

Die drei Gleichungen zur Ermittlung der kritischen Höhe (A.3), (A.5) und (A.8) können für vorgegebene Werte von t und r miteinander verglichen werden. In Bild A.2 wird ein Vergleich für $t = 0,1$ m und $t = 0,2$ m durchgeführt.



Legende

- 1 ungerissen
- 2 zwei Risse
- 3 viele Risse

Bild A.2 — Kritische Höhe von gerissenen und ungerissenen Innenrohren aus Mauerwerk

Die kritische Höhe wird durch die Rissbildung wesentlich verringert. Bei einem Innenrohr mit vielen vertikalen Rissen beträgt die kritische Höhe nicht mehr als 15 m bis 25 m. Aus Sicherheitsgründen sollte in der Praxis nur die Hälfte der berechneten kritischen Höhe angenommen werden.

Größere Innenrohre sollten verstärkt sein. Dieses kann auf einfache Weise mit an der Außenseite angebrachten horizontalen Stahlbändern oder durch bewehrtes Mauerwerk erfolgen (siehe Anhang E).

Die oben angegebenen kritischen Höhen wurden ohne Sicherheitsbeiwert berechnet. Es wurde nur der Einfluss von Rissen berücksichtigt. Insbesondere die Stabilität beeinflussende Faktoren sind:

- die Wanddicke;
- der Elastizitätsmodul;
- die Festigkeit der Mörtelfugen.

Diese Größen können durch chemische Beanspruchungen wesentlich verringert werden. Ein Sicherheitsabstand ist erforderlich, wenn das Innenrohr nicht mit Stahlbändern verstärkt wurde.

Die in A.2.2, A.2.3 und A.2.4 berechneten kritischen Höhen sollten verringert werden.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass ausreichende elastische Stabilität eines Innenrohrs oder Innenrohrabschnittes gegeben ist, wenn die Abmessungen des Innenrohrs oder des Innenrohrabschnittes innerhalb der in Tabelle A.3¹⁾ angegebenen Grenzen liegen.

1) Die Bedingungen für die Festigkeit müssen ebenfalls erfüllt werden.

Tabelle A.3 — Größte Höhe des Innenohrs und kleinste Wanddicke in Abhängigkeit vom Durchmesser

Durchmesser d des Innenrohrs m	Größte Höhe des Innenrohrs max. l m		kleinste Wanddicke des Mauerwerks min. mm		
	durch Stahlbänder verstärkt	nicht durch Stahlbänder verstärkt	ohne Nut und Feder	Formsteine mit seitlicher Nut und Feder	Formsteine mit umlaufender Nut und Feder
$1 < d \leq 2$	30	20	115	100	64
$2 < d \leq 4$	60	25	115	100	64
$4 < d \leq 6$	90	30	115	100	80
$6 < d \leq 8$	120	40	115	100	100
$8 < d \leq 10$	150	45	175	120	120
$10 < d \leq 12$	180	55	200	140	140
$d > 12$	200	60	250	200	200

ANMERKUNG Für Einzelheiten siehe CICIND-Model-Code for Concrete Chimneys — Part B: Brickwork linings.

Anhang B **(normativ)**

Öffnungen

Die Anordnung der Öffnungen muss folgenden Grundsätzen entsprechen:

Wenn die horizontale Bogenlänge einer Öffnung oder, im Falle mehrerer Öffnungen in einer Höhe, die Summe der horizontalen Bogenlängen der Öffnungen nicht größer als 50 % des Innendurchmessers des Innenrohrs in Höhe der Öffnung ist, darf folgender Nachweis der Beanspruchungen durchgeführt werden.

Der horizontale Querschnitt muss für den Restquerschnitt bemessen werden, zur Bemessung der Stürze müssen die resultierenden Spannungen in den Schnitten unmittelbar oberhalb und unterhalb der Stürze berücksichtigt werden und die Stürze als frei drehbare, an zwei Punkten gestützte Träger unter einer gleichförmigen Belastung betrachtet werden. Eine Ermittlung der Beanspruchung durch eine finite Elementmethode wird vor allem für Öffnungen mit einer Breite, die größer als der halbe Innendurchmesser des Innenrohrs ist, oder im Falle mehrerer Öffnungen empfohlen.

Die Länge des Sturzes oberhalb und unterhalb einer Öffnung muss an jeder Seite mindestens um ein Drittel der Öffnungsbreite hinausragen. Bei einer großen Öffnung (Breite gleich oder größer als der halbe Innendurchmesser) und im Falle mehrerer Öffnungen muss ein bewehrter geschlossener Rahmen verwendet werden.

Anhang C (informativ)

Kompensatoren

In Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen können die folgenden Kompensatortypen verwendet werden:

a) Mehrschichtkompensatoren

die aus folgenden Teilen bestehen:

- einer Temperatursperre (mit Geflecht aus nichtrostendem Stahl umwickelte Keramikfasermatte);
- einer chemischen Sperre (in der Regel ein sehr dünnes Gewebe, mit Tetrafluorethylen oder Fluorelastomer getränkte Folien);
- einer Abdichtung (z. B. eine Schicht aus Silikonkautschuk).

Diese Kompensatoren sind für trockene Abgase mit mittlerer oder hoher Temperatur geeignet.

b) Kompensatoren auf Polymerbasis

(mit Glas- und Aramidfasern und zusätzlich geeigneten Füllstoffen verstärktes Fluorelastomer).

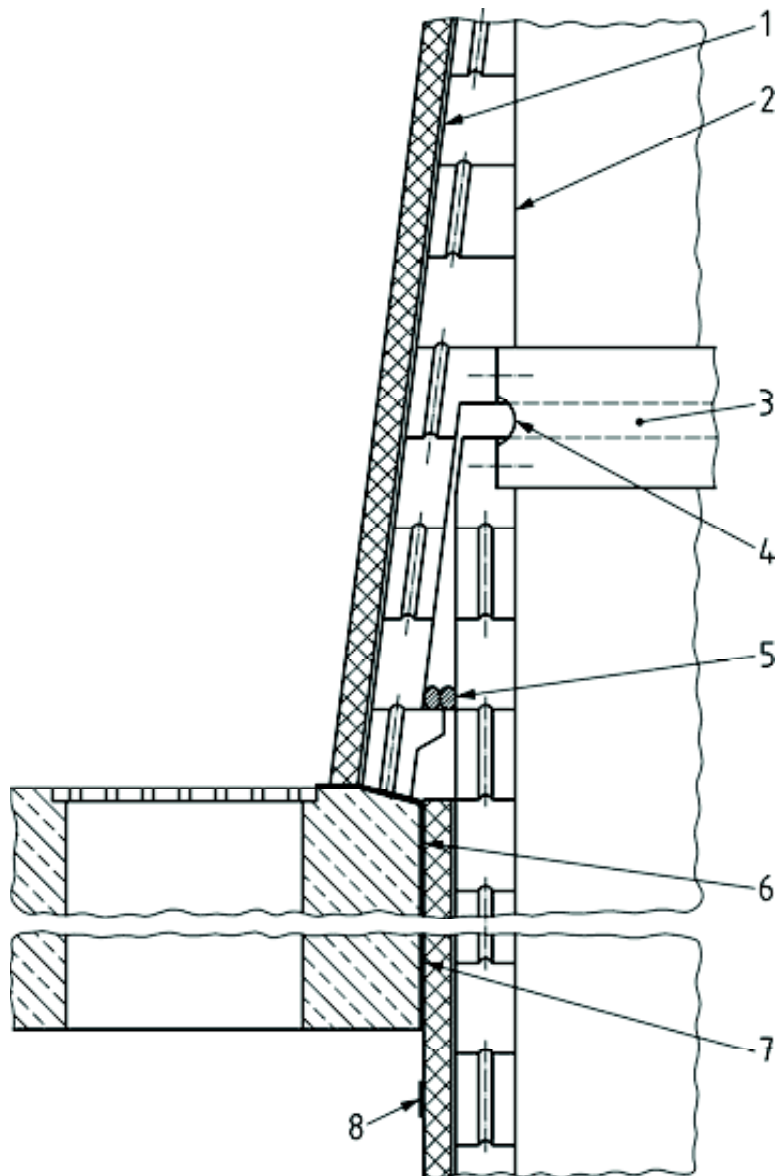
Diese Kompensatoren sind für nasse Abgase bei mittlerer, starker und sehr starker chemischer Beanspruchung geeignet.

Für diese Betriebsbedingungen ist auch Polytetrafluorethylen (PTFE) geeignet.

Die zulässige Temperatur beträgt für Fluorelastomer 200 °C (kurzzeitig 300 °C) und für Polytetrafluorethylen 250 °C (320 °C).

Kompensatoren werden in der Regel mit Stahlplatten am Mauerwerk angeschraubt, und zwar so, dass die textilen Stoßverbindungen zusammengedrückt werden. Besonders sollte auf die Dichtheit zwischen Kompensator und Mauerwerk geachtet werden durch Auswahl eines zuverlässigen Befestigungssystems und Wahl einer geeigneten Stelle für den Kompensator, damit keine Kondensate hinter ihn gelangen können.

Bild C.1 zeigt eine typische Lösung.



Legende

- 1 Luftspalt
- 2 keramische Steine mit umlaufender Nut und Feder, in Kaliwasserglaskitt verlegt
- 3 Dehnungsfuge
- 4 Kompensator, mit verdübelten Streifen verbunden
- 5 Dichtungsschnüre
- 6 Bleifolie auf Korrosionsschutzschicht
- 7 Farbanstrich, drei Schichten
- 8 Ringstreifen, nichtrostender Stahl/Glasfaser

Bild C.1 — Beispiel einer Innenrohrfuge mit Kompensator

Anhang D (informativ)

Dynamische Einflüsse

Das Beton-Tragrohr und das Etagen-Innenrohr bilden ein gekoppeltes System, wobei die Beschleunigung des Innenrohrs an den Abstützungspunkten gleich den Beschleunigungen des Tragrohrs an diesen Punkten ist.

Nach der Schalentheorie ergibt sich folgender Ausdruck für die resultierende größte vertikale Spannung am unteren Ende des Innenrohrabschnitts infolge einer horizontalen Beschleunigung des Tragrohrs am Fuße des Innenrohrs:

$$\sigma_z = \frac{a \times \rho \times h_\ell^2 \times K}{r} \quad (\text{D.1})$$

Dabei ist

- a die horizontale Beschleunigung des Tragrohrs in Höhe der Innenrohrabstützung;
- ρ die Rohdichte des Innenrohrbaustoffes;
- h_ℓ die Höhe des Innenrohrabschnittes;
- r der mittlere Radius des Innenrohrs in Auflagerhöhe;
- K der dynamische Vergrößerungsfaktor

$$K = \frac{1}{1 - \left(\frac{f_s}{f_\ell}\right)^2}$$

- f_s die Eigenfrequenz der Grundschiwingung des Tragrohrs;
- f_ℓ die Eigenfrequenz des Innenrohrs für die in Bild D.1 dargestellte Schwingungsform nach Gleichung (D.2):

$$f_\ell = \frac{\gamma r}{h_\ell^2} \times \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\text{D.2})$$

Dabei ist

- γ nach Bild D.2;
- E der Elastizitätsmodul des Mauerwerks.

Es wird angenommen, dass das Tragrohr eine Schlankheit h/d hat, die so groß ist, dass die Konstruktion als Balken mit veränderlichem Querschnitt betrachtet werden kann. Es wird angenommen, dass horizontale Querschnitte unter der Belastung eben bleiben und die Theorie dünner Schalen nicht gilt. Die Eigenfrequenz der Grundschiwingung des Tragrohrs ist dann näherungsweise durch Gleichung (D.3) gegeben:

$$f_s = 400 \times \left(\frac{t_{\text{base}}}{t_{\text{top}}} \right)^{0,22} \times \left(\frac{r_{\text{base}}}{r_{\text{top}}} \right)^{1,1} \times \frac{r_{\text{top}}}{h^2} \times \sqrt{\frac{E_c}{\rho_e}} \quad (\text{D.3})$$

Dabei ist

h die Höhe des Tragrohrs;

t_{top} die Wanddicke des Tragrohrs am Kopf;

r_{top} der mittlere Radius des Tragrohrs am Kopf;

t_{base} die Wanddicke des Tragrohrs am Fuß;

r_{base} der mittlere Radius des Tragrohrs am Fuß;

E_c der Elastizitätsmodul des Beton-Tragrohrs;

ρ_e die äquivalente Dichte des Tragrohrs, unter Einbeziehung des Innenrohrgewichtes = $(W_s + W_t)/W_s \times \rho_c$

Dabei ist

W_s das Gewicht des Tragrohres;

W_t das Gewicht des Innenrohres;

ρ_c die Rohdichte des Beton.

Die nach Gleichung (D.2) ermittelte Eigenfrequenz der einzelnen Abschnitte beträgt in der Regel das 5- bis 10fache der Grundeigenfrequenz des Tragrohrs. Deshalb werden in diesen Fällen die Beanspruchungen des Innenrohres aufgrund einer Anregung durch das in der Grundswingungsform schwingende Tragrohr nicht vergrößert ($K = 1,0$), und es ist nicht erforderlich, Tragrohr und Innenrohr für diese Schwingungsform als gekoppeltes System zu betrachten. Höhere Schwingungsformen des Tragrohrs können unter Umständen Resonanz hervorrufen, deshalb sollten Beanspruchungen durch die ersten drei Schwingungsformen des Beton-Tragrohrs berücksichtigt werden. Bei höheren Schwingungsformen als der der Grundswingung kann K größer als 1 sein.

Daher ergibt sich die größte vertikal wirkende gesamte Zug- und Druckspannung am Fuß des Innenrohres infolge horizontaler Beschleunigung zu:

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_{z1}^2 + \sigma_{z2}^2 + \sigma_{z3}^2} \quad (\text{D.4})$$

Dabei sind σ_{z1} , σ_{z2} und σ_{z3} die durch die 1., 2. und 3. Schwingungsform der Tragrohrschwingung hervorgerufenen Spannungen.

σ_{z1} , σ_{z2} und σ_{z3} werden mit Gleichung (D.1) und den jeweils zugehörigen Werten von K berechnet, und die Werte der ersten drei Beschleunigungen für die einzelnen Schwingungsformen können nach der folgenden Gleichung bestimmt werden:

$$a_i(z) = u_i(z) \times (2\pi f_{si})^2 \quad (\text{D.5})$$

Dabei ist

$a_i(z)$ die Beschleunigung im Tragrohr in Höhe z , in der i -ten Schwingungsform;

$u_i(z)$ die Auslenkung des Tragrohres in Höhe z , in der i -ten Schwingungsform;

f_{si} die i -te Eigenfrequenz des Tragrohres;

z die Höhe der Innenrohrabstützung.

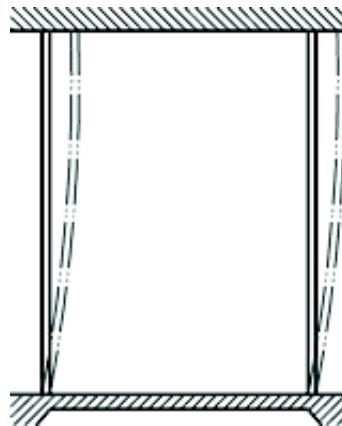


Bild D.1 — Niedrigste maßgebende Schwingungsform des Innenrohres

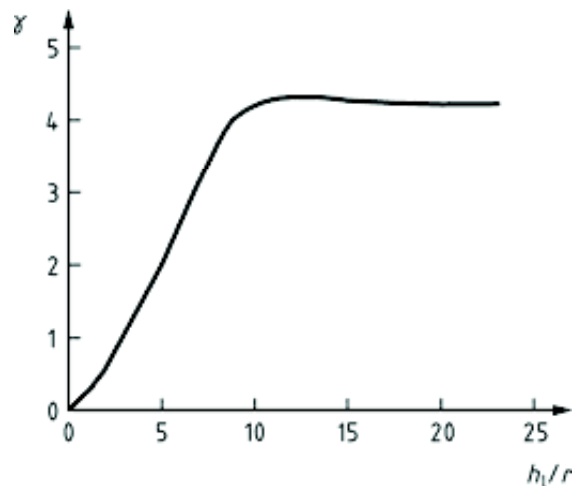


Bild D.2 — Verhältnis zwischen h_l/r und γ

Anhang E (informativ)

Verstärken — Bewehrtes Mauerwerk

E.1 An der Außenseite des Innenrohrs angebrachte Stahlbänder

E.1.1 Spannungen im Innenrohr

Horizontale Stahlbänder können am Innenrohr angebracht werden, um das Innenrohr gegen mögliche Rissbildung zu stabilisieren oder um die Rissbildung möglichst zu begrenzen.

Während des Betriebes treten in der Innenrohrwand Temperaturgradienten über ihre Wanddicke auf. Diese Temperaturgradienten führen zu thermischen Beanspruchungen, die Zugspannungen an der Außenseite und Druckspannungen an der Innenseite der Wand hervorrufen. Im stationären Zustand ergeben sich diese Beanspruchungen σ_T an der Innen- und an der Außenseite der Wand aus Gleichung (E.1):

$$\sigma_T = \frac{1}{2} \times \frac{E \times \alpha_T \times \Delta T}{1 - \nu} \approx 0,65 \times E \times \alpha_T \times \Delta T \quad (\text{E.1})$$

Dabei ist

- E der Elastizitätsmodul des Mauerwerkes;
- α_T der Wärmeausdehnungskoeffizient des Mauerwerkes;
- ν die Poissonzahl;
- ΔT die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenseite der Wand.

Wenn Innenrohre nicht wärmedämmend sind oder die Wärmedämmung unzureichend ist, können Risse an der Außenseite entstehen. Diese Risse werden breiter und dringen tiefer in die Wand des nicht verstärkten Innenrohrs ein, wenn der Schornstein mehrfach abgekühlt und aufgeheizt wird.

Zusätzlich sollte ein Innenrohr in der Lage sein, einem vorübergehenden Überdruck in der Regel bis zu etwa 0,02 MPa standzuhalten, der zu folgenden Zugbeanspruchungen σ_T im Mauerwerk führt:

$$\sigma_T = 0,02 \times \frac{r}{t} \text{ in N/mm}^2 \quad (\text{E.2})$$

Dabei ist

- r der mittlere Radius des Innenrohrs, in Meter;
- t die Wanddicke, in Meter.

Stahlbänder können das Öffnen und Ausbreiten von bereits gebildeten Rissen verhindern und können unter bestimmten Bedingungen das Innenrohr vorspannen und somit die Rissbildung begrenzen.

E.1.2 Flachstahlbänder

Flachstahlbänder bestehen aus einzelnen Abschnitten, die durch geschraubte Stöße, an denen die Vorspannung aufgebracht wird, miteinander verbunden sind. Die Verbindungen liegen in Höhe der Bandoberfläche, um ungünstige Außermittigkeiten zu vermeiden.

Zum Vermeiden der Rissbildung muss die Vorspannung die Zugspannung in der Innenrohrwand auf den zulässigen Wert reduzieren. Da dadurch die Druckspannung, σ_c , erhöht wird, sind Nachweise zu führen, um sicherzustellen, dass die Druckfestigkeit nicht überschritten wird.

Vorgespannte Stahlbänder können wie folgt beurteilt werden:

Vorteil	Nachteil
— hohe Akzeptanz der bekannten Technologie	— hoher Stahlverbrauch und Kosten für die Verbindungen
— geringe Kosten für den Korrosionsschutz	— großer Aufwand für Installationen erforderlich
	— Aufbringen zusätzlicher Kräfte auf das Innenrohr

Die Erfahrung hat gezeigt, dass Flachstahlbänder, wenn sie gut passend um das Innenrohr in kaltem Zustand angebracht wurden, die Rissbildung begrenzen und, falls Rissbildung auftritt, die Gesamtstabilität sicherstellen.

a) Bei Überbeanspruchung durch Wärmeeinwirkung

Beim Aufheizen des Innenrohrs wird das Stahlband gespannt und übt einen Druck auf das Mauerwerk aus. Mit Blick auf die Schwierigkeiten der genauen Bestimmung der relativen Ausdehnung zwischen Stahl und Mauerwerk und unter Berücksichtigung irreversibler Veränderungen, die während des ersten Hochfahrens auftreten können, kann diese Auswirkung nicht berechnet werden.

Ausgehend jedoch von Erfahrungen müssen Bänder Maße von etwa 75 mm × 10 mm aufweisen und in einem Abstand von bis zu 1,3 m für Mauerwerksdicken von 200 mm und darüber und von 0,4 r für geringere Wanddicken angeordnet sein.

b) Bei Überbeanspruchung durch vorübergehenden Überdruck

Zur Begrenzung von Beanspruchungen in Stahl und Mauerwerk während einer Einwirkung aus Überdruck ist die Stahlbandquerschnittsfläche, A_s , wie folgt zu berechnen:

$$A_s = \frac{p \times r \times s}{f_y} \quad (\text{E.3})$$

Dabei ist

- p der Überdruck;
- r der mittlere Innenrohrradius;
- s der Abstand zwischen den Bändern;
- f_y die Streckgrenze des Stahlbandes.

E.1.3 Stahlbänder mit Federn

Es ist nicht möglich, die Spannung in den in E.1.2 beschriebenen FLachstahlbändern zu bestimmen. Wenn eine genauere Ermittlung der Verringerung von thermischen Zugbeanspruchungen erforderlich ist, können Federn in die Bandkonstruktion eingebaut werden, um das Innenrohr vorzuspannen. Federn können auch, falls erforderlich, zur Begrenzung der Stahl- und Mauerwerksspannungen eingesetzt werden.

Bild E.1 zeigt eine typische Konstruktion mit Federn. Die Länge der Feder sollte ausreichend bemessen sein, um ihre Spannungsänderung auf weniger als 20 % zu begrenzen, wenn die Temperatur des Innenrohrs zwischen niedrigen und hohen Werten wechselt.

Die Vorspannung in den Federbändern führt zu Druck- und Biegebeanspruchungen in der Innenrohrwand. Die Biegebeanspruchung verursacht eine weitere Druckbeanspruchung an der Außenseite der Wand in der Nähe des Bandes. Die gesamte hervorgerufene Druckbeanspruchung reduziert die größte Zugbeanspruchung in dem Mauerwerk.

Die in der Wand hervorgerufenen Druck- und Biegespannungen verringern sich mit zunehmendem Abstand vom Stahlband entsprechend der folgenden Beziehung:

$$\sigma_{cx} = \frac{1,5 \times p_b \times e^{-\lambda x}}{r \times t^3 \times \lambda^3} \times (\cos \lambda x + \sin \lambda x) \pm \frac{1,5 \times \nu \times p_b \times e^{-\lambda x}}{\lambda \times t^2} \times (\cos \lambda x - \sin \lambda x) \quad (\text{E.4})$$

Dabei ist

σ_{cx} die Druckspannung in der Innenrohrwand, vertikaler Abstand x vom Band;

p_b die durch das Band hervorgerufene radiale Druckkraft, je Längeneinheit des Umfangs;

ν die Poissonzahl.

$$\lambda = \frac{\left[3(1-\nu^2) \right]^{0,25}}{\sqrt{r \times t}} \quad (\text{E.5})$$

t die Wanddicke

Die größte Schubbeanspruchung im Mauerwerk, τ_b , tritt am Band auf und ermittelt sich zu:

$$\tau_b = \frac{p_b}{2 \times t} \quad (\text{E.6})$$

Die maximale Biegezugspannung in Längsrichtung, σ_y , die vertikal in einer horizontalen Ebene wirkt und durch die Federn auf das Innenrohr aufgebracht wird, ist durch die folgende Gleichung gegeben:

$$\sigma_y = \frac{1,1 N}{\sqrt{r \times t^3}} \quad (\text{E.7})$$

Dabei ist

N die Federkraft.

Die Federkraft unter Betriebsbedingungen ist unter Berücksichtigung der folgenden Annahmen zu ermitteln:

- a) Es wird genügend Druckspannung in Umfangsrichtung in die Außenfläche des Mauerwerks in der Mitte zwischen den Bändern eingeleitet, um die durch den Temperaturgradienten an dieser Stelle verursachte Zugspannung in Umfangsrichtung zu überdrücken.

ANMERKUNG Wenn der Abstand zwischen den Bändern $2 \times \sqrt{r \times t}$ oder weniger beträgt, wird der in die Wand über den Umfang eingeleitete Druck über die gesamte Höhe zwischen den Bändern nahezu konstant sein.

Die Berechnung erfolgt unter der Annahme eines 50 %-Verlustes der Bandspannung in der Mitte zwischen den Federn aufgrund einer Kombination von Reibung und Kriechen.

- b) Um die Biegezugspannung in Längsrichtung im Mauerwerk an der Innenseite auf $\sigma_{y,adm} = 1,0 \text{ N/mm}^2$ und die Stahlspannung auf einen zulässigen Wert zu begrenzen, sind die folgenden Gleichungen zu erfüllen:

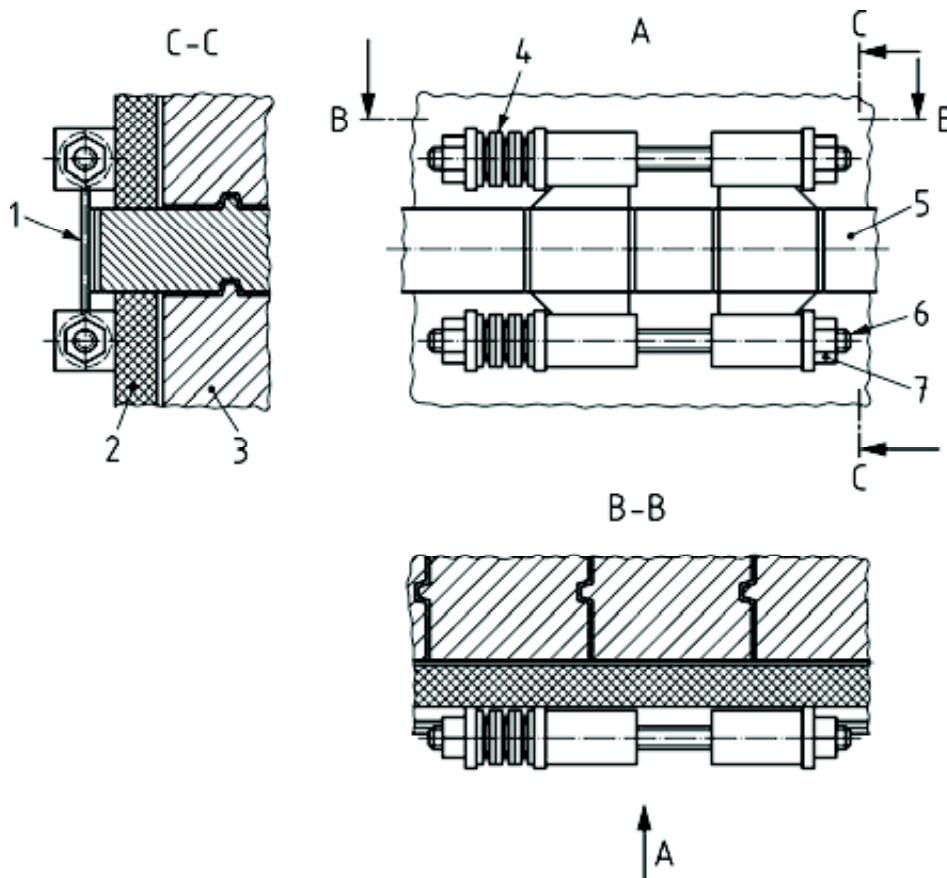
$$N \leq 0,9 \times \sigma_{y,adm} \times \sqrt{r \times t^3} \quad (\text{E.8})$$

$$A_s \geq 1,5 \times \frac{N}{f_y} \quad (\text{E.9})$$

Dabei ist

A_s die Querschnittsfläche des Bandes;

f_y der charakteristische Wert der Fließgrenze des Stahls im Band.



Legende

- 1 Ausdehnungsring mit Spannverschluss
- 2 Wärmedämmung
- 3 Innenrohr
- 4 Federring

- 5 Stahlband
- 6 Gewindestange
- 7 Sechskantmutter

Bild E.1 — Stahlbänder mit Federn

E.2 Bewehrtes Mauerwerk

E.2.1 Allgemeines

Die Bildung von Trennrissen im Mauerwerk des Innenrohrs kann durch die Verwendung von bewehrtem Mauerwerk behindert werden. In diesem Fall wird die Bewehrung in gesonderte horizontale Nuten im Mauerwerk eingefügt, die sich nahe der Außenseite der Wand befinden. Hierdurch werden die Innenrohre stabilisiert und vor dem Verlust der Dichtheit geschützt.

E.2.2 Bemessung

Die Funktionsweise von bewehrtem Mauerwerk ist vergleichbar mit der Funktion von Stahlbeton. Die Zugspannungen im Querschnitt werden von der Bewehrung, die Druckspannungen vom Mauerwerk aufgenommen.

Es sollten Festigkeitsberechnungen der vertikalen Innenrohrabschnitte durchgeführt werden, wobei angenommen wird, dass mindestens das Zwangsbiegemoment im Zustand der Rissbildung (Rissmoment) unter Berücksichtigung der aussteifenden Wirkung der Zugspannungen im Mauerwerk in allen Querschnitten wirkt. Der Widerstand des Mauerwerkquerschnitts im Grenzzustand der Tragfähigkeit sollte unter Vernachlässigung der Zugfestigkeit berechnet werden.

E.2.3 Baustoffe

E.2.3.1 Steine

Abhängig vom Grad der chemischen Beanspruchung sollten Steine des Typs BT1, BT2, BT3 und BT4 nach EN 13084-5:2005, 5.1 verwendet werden. Steine des Typs BT5 dürfen nicht verwendet werden.

E.2.3.2 Mörtel

Abhängig vom Grad der chemischen Beanspruchung und der Wärmebeanspruchung sollten Mörtel des Typs MT1 (Kunstharzmörtel), MT2 (Kaliwasserglaskitt) und MT3 (Mörtel auf der Basis von hydraulischem Zement), wobei letzterer nur in Verbindung mit CEM III Zement verwendet werden darf, nach EN 13084-5:2005, 5.2 verwendet werden.

Bezüglich der Verwendung von Kunstharzmörtel des Typs MT1 sollte auf einen entsprechend hohen Glaspunkt geachtet werden.

E.2.3.3 Bewehrungsstahl

Es dürfen nur gerippte Stähle mit einem Durchmesser von mindestens 8 mm verwendet werden.

E.2.4 Korrosionsschutz

Korrosionsschutz ist erforderlich, um die Korrosion der in den Mörtel verlegten Bewehrung zu verhindern. Spezielle Verfahren sind:

- Feuerverzinkung (nur, falls kein chemischer Angriff vorhanden ist);
- Kunststoffbeschichtung (Epoxidharz mit einem entsprechend hohen Glaspunkt);
- Verwendung von nichtrostendem Stahl.

Bei der Verwendung von Beschichtungen sollte sichergestellt sein, dass

- die Eigenschaften der Beschichtung, insbesondere hinsichtlich des Verbundes, unter Temperatureinwirkung aufrechterhalten bleiben (kein „softening“),
- eine ausreichende Dicke der Beschichtung bezüglich der Anforderungen bei chemischer Beanspruchung besteht,
- die effektive Rippenhöhe des gerippten Stahls durch eine örtlich übermäßige Dicke der Beschichtung nicht verringert wird.

E.2.5 Ausführung

Die für die Aufnahme der Bewehrung vorgesehenen Nuten sollten nahe der Außenseite der Wand angeordnet werden (siehe Bild E.2).

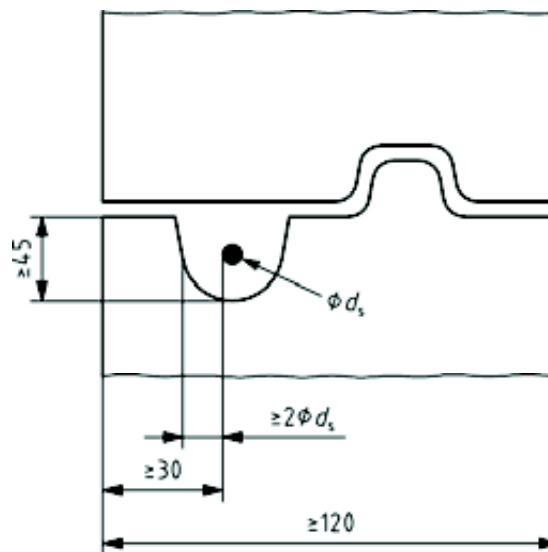
Die Überdeckung der Bewehrung gegenüber der Wandaußenseite sollte mindestens 30 mm und gegenüber der Wandung in den Formsteinen mindestens den zweifachen Stabdurchmesser d_s (siehe Bild E.2) betragen.

Die prozentuale Mindestbewehrung, bezogen auf den gesamten Querschnitt, muss 0,2 % betragen.

Übergreifungsstöße der einzelnen Stäbe sind nicht zulässig,

Die Mindestdicke des Mauerwerks muss 120 mm betragen.

Alle Fugen im Mauerwerk müssen vollständig verfüllt sein.



Legende

d_s Durchmesser des Bewehrungsstahles

Bild E.2 — Bewehrter Mauerwerksquerschnitt mit Formsteinen

Anhang F (informativ)

Wärmeeinwirkungen

Spannungen infolge Wärmeeinwirkungen

Die Spannungen infolge Wärmeeinwirkungen im Mauerwerk außerhalb des Kopf- und Fußbereiches eines Innenrohrschnitts können durch folgende Gleichungen ermittelt werden:

Stationäre Wärmeströmung:

$$\sigma_{T,\text{out}} = \sigma_{T,\text{in}} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{1-\nu} \times E \times \alpha_T \times \Delta T \quad (\text{F.1})$$

Instationäre Wärmeströmung:

$$\sigma_{T,\text{out}} = \frac{1}{1-\nu} \times E \times \alpha_T \times (T_m - T_{\text{out}}) \quad (\text{F.2})$$

$$\sigma_{T,\text{in}} = \frac{1}{1-\nu} \times E \times \alpha_T \times (T_{\text{in}} - T_m) \quad (\text{F.3})$$

In allen Fällen sollten die Bemessungswerte der Spannungen, $\sigma_{T,\text{out}}$ und $\sigma_{T,\text{in}}$, infolge Wärmeeinwirkungen kleiner als die Bemessungswerte der entsprechenden Festigkeiten sein.

Dabei ist

$\sigma_{T,\text{out}}$ die Spannung aus Wärmeeinwirkungen an der Wandaußenseite infolge Temperaturdifferenzen;

$\sigma_{T,\text{in}}$ die Spannung aus Wärmeeinwirkungen an der Wandinnenseite infolge Temperaturdifferenzen;

E der Elastizitätsmodul des Mauerwerkes;

ν die Poissonzahl;

α_T der Wärmeausdehnungskoeffizient des Mauerwerkes;

ΔT die Temperaturdifferenz zwischen der Außen- und der Innenseite der Wand;

T_m die mittlere Wandtemperatur = $1/t \int T(x)dx$;

$T(x)$ die Wandtemperatur als Funktion der Koordinate x über die Wanddicke;

t die Wanddicke;

T_{out} die Temperatur an der Außenseite der Wand;

T_{in} die Temperatur an der Innenseite der Wand.

ANMERKUNG Am oberen Ende der Innenrohrabschnitte führt eine fehlende Halterung zu einer Zunahme der Spannungen aus Wärmeeinwirkungen (üblicherweise etwa 35 % bis 40 %). Diese Zunahme verringert sich jedoch sehr schnell: in einem Abstand von etwa $z = 3,8 \sqrt{t \times r}$ vom freien Ende, wobei r der mittlere Radius und t die Wanddicke am oberen Ende ist, ist der Wert null. Darüber hinaus wird der Temperaturgradient durch die Überlappung zwischen benachbarten Abschnitten begrenzt.

Anhang G (informativ)

Trocknen und Hochfahren

G.1 Neue Innenrohre

G.1.1 Allgemeines

Das Hochfahren sollte bei einem neuen Innenrohr aus Mauerwerk den folgenden Anforderungen genügen:

- ausreichendes Aushärten des Mörtels, um die mechanische Stabilität, den Verbund des Mauerwerks und die chemische Beständigkeit sicherzustellen;
- Ableiten der freien Feuchtigkeit, um die Gefahr einer schnellen Verdampfung zu vermeiden, die zum Abplatzen und Reißen des Mauerwerks führen könnte;
- Einhalten der Temperaturbeanspruchungen infolge des Temperaturgradienten über die Dicke der Innenrohrwand innerhalb der zulässigen Grenzwerte.

Mörtel auf der Basis von Kunstharzen (Typ MT1) härten üblicherweise innerhalb weniger Stunden nach dem Verarbeiten aus und sind nach mindestens 7 Tagen beständig gegenüber chemischen Beanspruchungen. Deshalb verzögern diese Mörtel nur selten das Hochfahren. Es ist wichtig, die Anweisungen des Mörtelherstellers hinsichtlich des Hochfahrens zu beachten, sie könnten strenger gefasst sein als die im Folgenden genannten.

Die Temperatur von Kaliwasserglaskitt (Typ MT2) sollte für die Dauer von mindestens 7 Tagen nach Errichten des Mauerwerks nicht unter 10 °C abfallen. Nach diesem Zeitraum sollten Festigkeit und chemische Beständigkeit so weit ausgebildet sein, dass mit dem Hochfahren begonnen werden kann.

G.1.2 Außen wärmegeämmte Innenrohre

Wenn in das Mauerwerk nahe sowohl der Innen- als auch der Außenseite der Wand eingelassene Thermolemente vorhanden sind, sollte die Aufheizgeschwindigkeit regelmäßig überprüft werden, um die Temperaturbeanspruchungen im Mauerwerk in zulässigen Grenzen zu halten (jeder Temperaturunterschied von 10 K zwischen der Innen- und Außenseite der Wand führt zu Zug- und Druckspannungen von 0,45 N/mm²).

Wenn der Temperaturgradient nicht gemessen werden kann, kann folgendes Verfahren angewendet werden. Es hat sich gezeigt, dass damit zufrieden stellende Ergebnisse bei Innenrohren mit äußerer Wärmedämmung und säurebeständigem Mauerwerk erreicht werden.

- Kontinuierliche Zunahme der Abgastemperatur bis zu 100 °C innerhalb von 18 h.
- Halten der Abgastemperatur bei 100 °C für 12 h.
- Zunahme der Abgastemperatur bis zur Betriebstemperatur mit einer konstanten Geschwindigkeit von 8 K/h.

G.1.3 Nicht wärme gedämmte Innenrohre

Die Geschwindigkeit des Temperaturanstiegs bei nicht wärme gedämmten Innenrohren aus Mauerwerk sollte auf 60 % der in G.1.2 genannten Werte reduziert werden. Es können die gleichen Zeiträume für die konstant oder fast konstant gehaltene Temperatur angenommen werden.

G.2 Alte Innenrohre aus Mauerwerk

Der erste Absatz von G.1.2 gilt entsprechend. Wenn keine Thermolemente im Mauerwerk vorhanden sein sollten, kann wie folgt verfahren werden:

- a) Alte Innenrohre aus Mauerwerk, die länger als 3 Monate außer Betrieb waren und für längere Zeit Regen oder Schnee ausgesetzt waren:
 - Kontinuierliche Zunahme der Abgastemperatur bis zu 100 °C innerhalb von 6 h;
 - Halten der Abgastemperatur bei 100 °C für 6 h;
 - Zunahme der Abgastemperatur bis zur Betriebstemperatur mit einer konstanten Geschwindigkeit von 10 K/h.
- b) Alte Innenrohre aus Mauerwerk, die zwischen 3 Tagen und 3 Monaten außer Betrieb waren oder die keinem wesentlichen Regen oder Schnee ausgesetzt waren:
 - Zunahme der Abgastemperatur mit einer konstanten Geschwindigkeit von 12 K/h.
- c) Alte Innenrohre aus Mauerwerk, die innerhalb des zyklischen Betriebes für weniger als 3 Tage außer Betrieb waren:
 - sofern das Innenrohr keinem wesentlichen Regen oder Schnee ausgesetzt war, darf die Temperaturzunahme 20 K/h bis 25 K/h erreichen.

ANMERKUNG Bei nicht wärme gedämmten Innenrohren oder bei Mauerwerk aus Steinen Typ BT2 (b) nach EN 13084-5:2005, Tabelle 2 sollte die Geschwindigkeit der Temperaturzunahme auf 60 % der oben genannten Werte reduziert werden.