

DIN EN 13480-3/A3

ICS 23.040.01

Änderung von
DIN EN 13480-3:2017-12

**Metallische industrielle Rohrleitungen –
Teil 3: Konstruktion und Berechnung;
Deutsche Fassung EN 13480-3:2017/A3:2020**

Metallic industrial piping –
Part 3: Design and calculation;
German version EN 13480-3:2017/A3:2020

Tuyauteries industrielles métalliques –
Partie 3: Conception et calcul;
Version allemande EN 13480-3:2017/A3:2020

Gesamtumfang 36 Seiten

DIN-Normenausschuss Rohrleitungen und Dampfkesselanlagen (NARD)



Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 13480-3:2017/A2:2020) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 267 „Industrielle Rohrleitungen und Fernrohrleitungen“ erarbeitet, dessen Sekretariat von AFNOR (Frankreich) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 082-00-17 AA „Industrielle Rohrleitungen und Rohrfernleitungen; Spiegelausschuss zu CEN/TC 267“ im DIN-Normenausschuss Rohrleitungen und Dampfkesselanlagen (NARD).

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Deutsche Fassung

**Metallische industrielle Rohrleitungen —
Teil 3: Konstruktion und Berechnung**

Metallic industrial piping —
Part 3: Design and calculation

Tuyauteries industrielles métalliques —
Partie 3: Conception et calcul

Diese Änderung A3 modifiziert die Europäische Norm EN 13480-3:2017. Sie wurde vom CEN am 12. Juli 2020 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Änderung 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 CEN-CENELEC-Management-Zentrum oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Änderung 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, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, der Republik Nordmazedonien, Rumänien, Schweden, der Schweiz, Serbien, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, der Türkei, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



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

CEN-CENELEC Management-Zentrum: Rue de la Science 23, B-1040 Brüssel

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	3
1 Änderung zu Abschnitt 2, „Normative Verweisungen“	4
2 Änderung zu 5.2.4, „Stahlguss“	4
3 Änderung zu Anhang A, „Dynamischer Effekt“	4
4 Änderung zu Abschnitt G.3, „Physikalische Eigenschaften von Stählen“	29
5 Einführung eines neuen Abschnitts G.4, „Werkstoffeigenschaften von Kohlenstoffstahl bei hohen Temperaturen“	29
6 Einführung eines neuen Anhangs R, „Überwachung von Bauteilen, die im Zeitstandbereich betrieben werden“	30
7 Änderung zu den Literaturhinweisen	33

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (EN 13480-3:2017/A3:2020) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 267 „Industrielle Rohrleitungen und Fernrohrleitungen“ erarbeitet, dessen Sekretariat von AFNOR gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Februar 2021, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Februar 2021 zurückgezogen werden.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CEN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Dieses Dokument wurde im Rahmen eines Mandats erarbeitet, das die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelsassoziation CEN erteilt haben, und unterstützt grundlegende Anforderungen der EU-Richtlinien.

Zum Zusammenhang mit EU-Richtlinien siehe informativen Anhang ZA, der Bestandteil der EN 13480-3:2017 ist.

Dieses Dokument enthält den Text der Änderung selbst. Die geänderten/korrigierten Seiten von EN 13480-3:2017 werden als Ausgabe 4 der Europäischen Norm veröffentlicht.

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

1 Änderung zu Abschnitt 2, „Normative Verweisungen“

Die folgende normative Verweisung wird hinzugefügt:

„EN 12516-2:2014, *Industriearmaturen — Gehäusefestigkeit — Teil 2: Berechnungsverfahren für drucktragende Gehäuse von Armaturen aus Stahl*“

2 Änderung zu 5.2.4, „Stahlguss“

Unterabschnitt 5.2.4 muss wie folgt lauten:

„5.2.4 Stahlguss

Die zulässigen Spannungen für Stahlguss sind in EN 12516-2:2014 spezifiziert.“

3 Änderung zu Anhang A, „Dynamischer Effekt“

Der vorhandene Anhang A wird durch Folgendes ersetzt:

Anhang A **(informativ)**

Dynamischer Effekt

A.1 Allgemeines

A.1.1 Einleitung

Zusätzlich zu den in 4.2 behandelten statischen Beanspruchungen und den zyklischen Druck- und Temperaturbelastungen können Rohrleitungen verschiedenen dynamischen Beanspruchungen ausgesetzt sein. Dynamische Ereignisse sollten bereits bei der Auslegung der Rohrleitung berücksichtigt werden. Eine eingehende Analyse ist jedoch nicht in jedem Fall, sondern nur bei ausdrücklicher Festlegung erforderlich. Die Auswirkungen signifikanter dynamischer Beanspruchungen sollten bei der Auslegung der Rohrleitung zu den Spannungen infolge ständig wirkender Beanspruchung addiert werden. Kontinuierlich auftretende dynamische Lasten sollten in einer Ermüdungsanalyse untersucht werden.

Analyseverfahren werden in A.2 vorgeschlagen.

Jedoch kann es schwieriger sein, Schwingungen vorherzusagen, und Empfehlungen für Installationen werden auch in einer Konstruktionsleitlinie in A.1.2 bereitgestellt.

Eine Schwingungs-Risikobewertung darf basierend auf den kombinierten Kenntnissen über Schwingungsquellen und die dynamischen Eigenschaften des Rohrleitungssystems (A.2.7) durchgeführt werden.

Die dynamischen Eigenschaften des Rohrleitungssystems dürfen auch angewendet werden, um die dynamische Qualität der Auslegung zu beurteilen, um Maßnahmen bei Schwingungen und Beschädigungen durch Schwingungen zu lokalisieren.

A.1.2 Konstruktionsleitlinie bezüglich Schwingungen

A.1.2.1 Allgemeines

Die folgende Leitlinie darf angewendet werden, um eine Verringerung der Anzahl von Rohrleitungskreisläufen zu erzielen, die hinsichtlich des Schwingungsverhaltens die Annahmekriterien überschreiten.

Drei Gesichtspunkte werden gegenübergestellt, um das Schwingungsverhalten des Rohrleitungssystems zu optimieren:

- die Festlegung des Betriebs der Kreisläufe;
- die Empfehlung für Pumpen, Ventile und Blenden;
- die Verlegung von Rohrleitungen und ihren Halterungen.

A.1.2.2 Betrieb des Kreislaufs

A.1.2.2.1 Funktionsanalyse

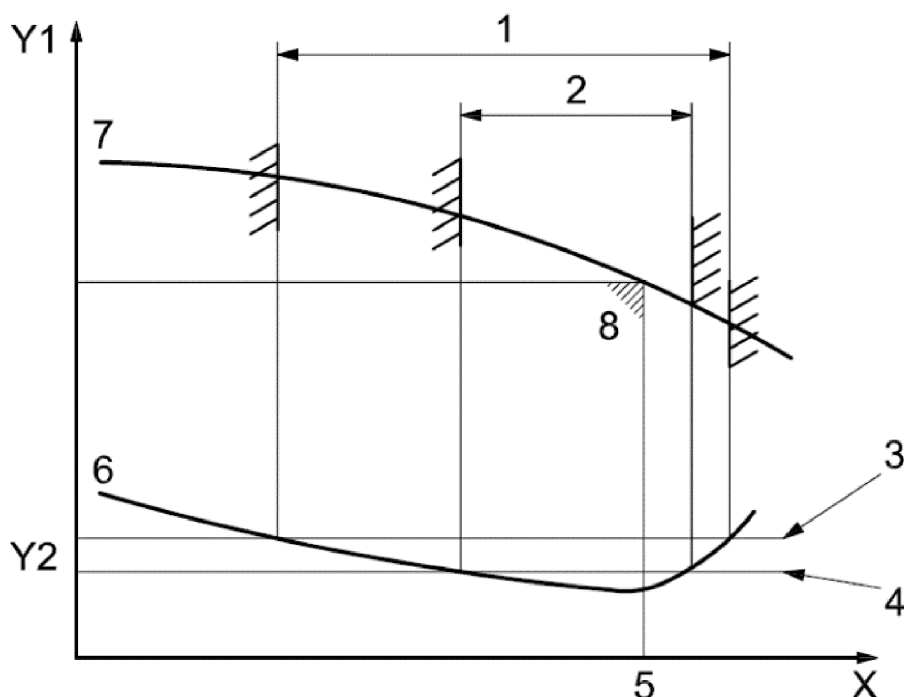
Um die mögliche Rissbildung bei Verbindungen von Rohren mit kleinem Durchmesser mit Rohren oder Ventilen mit großem Durchmesser auf ein Mindestmaß zu verringern, ist es entscheidend, eine vollständige Funktionsanalyse des Systems durchzuführen. Diese sollte insbesondere die regelmäßige Prüfung und Zustandsüberwachung während des Betriebs und die Umgebung bei extremen Bedingungen umfassen.

Dieses Verfahren gilt selbst dann, wenn die Betriebszeiten bei einigen Bauformen gering sind (in der Größenordnung von einigen Minuten je Zyklus).

Es sollte bewertet werden, ob die Ausrüstung und die Installation für jede Änderung des Betriebs angemessen sind.

A.1.2.2.2 Teilstrom- oder Überstrombetrieb

Der Betrieb von Pumpen mit Teilstrom oder Überstrom führt zu beträchtlichen Strömungsschwankungen. Teilstrom oder Überstrom bezieht sich auf einen Betrieb der Pumpen außerhalb des Bereichs des höchsten Wirkungsgrades (Bereiche 1 und 2 in Bild A.1.1.1-1), der in der Theorie dem Nennwert nahekommt (Punkt 8 in Bild A.1.1.1-1) und verglichen mit dem Nennwert zu einer Quelle mit hoher Fluidregung führt (Kurve 6 in Bild A.1.1.1-1).



Legende

X	Durchflussrate	4	grundlegende Schwingungsgrenze
Y1	Förderhöhe	5	Punkt mit dem besten Wirkungsgrad, Durchflussrate
Y2	Schwingung	6	typische Schwingungs-Durchflussraten-Kennlinie, die die höchstzulässige Schwingung zeigt
1	zulässiger Betriebsbereich der Strömung	7	Förderhöhe-Durchflussraten-Kennlinie
2	bevorzugter Betriebsbereich der Strömung	8	Punkt mit dem besten Wirkungsgrad, Förderhöhe und Durchflussrate
3	maximal zulässiger Schwingungsgrenzwert bei der Fließgrenze		

Bild A.1.1.1-1 — Zusammenhang zwischen Strömung und Schwingung

Der Betrieb von Pumpen mit Teilstrom oder Überstrom sollte vermieden werden. Die regelmäßigen Prüfungen sollten möglichst unter den Betriebsbedingungen durchgeführt werden, die hinsichtlich Schwingungen am unschädlichsten sind. Wenn diese Anordnungen nicht erreicht werden können, sollten die Betriebszeiten begrenzt werden.

Pumpen-Bypässe (Rückführung des Förderstroms ins Vakuum oder zum Tank), die mit einer vorgelagerten Verlusteinheit ausgestattet sind, dürfen angewendet werden, wobei dabei jedoch sichergestellt werden

sollte, dass der Durchfluss während des Austrags auf einen Wert nahe beim Nennwert geregelt bleibt. In diesem Fall sollte besonders darauf geachtet werden sicherzustellen, dass die schwingungsbezogene Auslegung dieser Bypass-Leitungen mit den Regeln für Ventile und den Einbau übereinstimmt.

Die im Zusammenhang mit der regelmäßigen Prüfung der Pumpe verwendeten Leitungen mit Nulldurchsatz werden so ausgelegt, dass sie auf einem Betriebsniveau nahe dem Nennwert in Übereinstimmung mit den Regeln für die regelmäßige Prüfung sind.

Die Pumpe sollte einen Durchsatz aufweisen, der über 70 % und unter 110 % ihres Nenndurchsatzes liegt.

Falls die Ausrüstung bekannt ist, darf die Teilvolumenstromrate möglicherweise vom Hersteller festgelegt werden.

A.1.2.2.3 Kavitation

Es ist bekannt, dass Kavitation zu übermäßigen Schwingungen in den Rohrleitungskreisläufen führt (Kavitation von Blenden, Kavitation von Klappen und Blenden unter Vakuum-Bedingungen).

Es ist wichtig zu beachten, dass die Betriebsbedingungen unter Kavitationsbedingungen nicht eingeordnet werden können. Rückmeldungen von Erfahrungen mit Vakuum-Bedingungen oder aus dem Betrieb von Anlagen zeigen tatsächlich, dass Änderungen der Schwingungspegel nicht mit der Vergrößerung oder Verkleinerung von Kavitationsindices aus der Literatur korrelieren.

Kavitation sollte verhindert oder zumindest begrenzt werden. Diese Regel wird im Allgemeinen durch die Wahl der Ausrüstung (A.1.2.3) eingehalten. Jedoch ist es für die Betriebsleiter unabdingbar, den Gutachtern die hydraulischen Druckverluste und Durchflussraten für den ungünstigsten Fall zur Verfügung zu stellen. Zu diesem Zweck sollten alle Betriebskonfigurationen (Normalbetrieb, Störbetrieb, gelegentlicher Betrieb, unbeabsichtigter Betrieb, regelmäßige Prüfung) nach A.1.2.2.1 berücksichtigt werden.

Die Installationsregeln für Empfehlungen bei Wasserschlag hinsichtlich der Kavitation sollten angewendet werden.

A.1.2.2.4 Angeschlossene Rohre mit kleinem Durchmesser

Die Verringerung der Anzahl von angeschlossenen Rohren mit kleinem Durchmesser führt direkt zur Verringerung des Risikos von Rissbildung durch Schwingungsermüdung, weshalb die Anzahl funktional angeschlossener Rohre mit kleinem Durchmesser auf ein Mindestmaß verringert werden sollte.

Gefälleumkehr sollte reduziert werden, um die Anzahl angeschlossener Rohre mit kleinem Durchmesser bei Abfluss- und Entlüftungsrohren auf ein Mindestmaß zu verringern.

A.1.2.2.5 Strömungsgeschwindigkeit

Die folgenden Werte werden für die Strömungsgeschwindigkeit empfohlen.

Für Flüssigkeiten:

- normale Geschwindigkeit < 3 m/s
- außergewöhnliche Geschwindigkeit oder Druck von mehr als 50 bar < 5 m/s

Für Luft und Gase:

- Strömungsgeschwindigkeit < 40 m/s

Für Dampf in Abhängigkeit von einem bestimmten Volumen:

- 0,02 m³/kg: 35 m/s bis 45 m/s
- 0,05 m³/kg: 40 m/s bis 50 m/s
- 0,1 m³/kg: 45 m/s bis 55 m/s
- 0,2 m³/kg: 50 m/s bis 60 m/s

A.1.2.3 Ausrüstung

A.1.2.3.1 Pumpen und Kompressoren

Die Rissbildung von angeschlossenen Rohren mit kleinem Durchmesser kann auf übermäßige Schwingungen derartiger Komponenten zurückgeführt werden. Die Beschädigung aufgrund dieser Schwingungen wird verstärkt, wenn diese mit den Schwingungsformen der Rohrleitung übereinstimmen.

Die Regeln für die schwingungsbedingte Auslegung von Pumpen-/Kompressorsystemen sollten berücksichtigt werden, dabei insbesondere die Nichtübereinstimmung der Frequenz zwischen den Pumpen-/Kompressor-Spitzenwerten und den Schwingungsformen der Grundrohr-Anordnungen der Pumpe/des Kompressors.

Die Erregerfrequenzen, die sich aus der Drehzahl der Pumpe und der Anzahl von Schaufeln (bei Kreiselpumpen) ergeben, sollten hinsichtlich ihrer Wirkung auf das Rohrleitungssystem durch Bestimmung der Eigenfrequenzen oder mittels harmonischer Erregung überprüft werden.

Kolbenpumpen und -kompressoren verursachen starke Druckimpulse, die hohe Schwingungen hervorrufen. Rückmeldungen von Erfahrungen zeigen, dass es nach der Installation sehr schwierig ist, die Schwingungen von Grundrohren und angeschlossenen Rohren mit kleinem Durchmesser, die von dieser Komponentenart hervorgerufen werden, zu begrenzen.

Im Allgemeinen sollte die Verwendung von Kolbenpumpen/-kompressoren vermieden werden.

Falls jedoch starke funktionelle Anforderungen die Verwendung dieser Art von Komponenten notwendig machen, sollten validierte Pulsationsdämpfer oder akustische Filter vom Hersteller vorgeschlagen werden.

Im Allgemeinen entspricht das Einbringen von hydraulischen Druckverlusten in einen Kreislauf einer Erhöhung des Ausmaßes von Schwingungsquellen, wodurch der Wirkungsgrad verringert wird und sich daher die Betriebskosten erhöhen.

Die Verwendung von Blenden zur Anpassung der Pumpeneigenschaften an die hydraulischen Druckverluste des Rohrleitungskreislaufs wird nicht empfohlen. Jedoch darf bei einigen Rohrleitungskreisläufen das Öffnen von Ventilen begrenzt werden, um zu verhindern, dass Pumpen außerhalb ihres üblichen Bereiches arbeiten.

Des Weiteren führt die Verringerung des Laufraddurchmessers automatisch zu einer Verringerung der Pumpenleistung und zu einer Verstärkung der entsprechenden hydroakustischen Quelle.

Es wird empfohlen, die Verwendung überdimensionierter Pumpen, die zu einem unnützen Eintrag von hydraulischen Druckverlusten in den Rohrleitungskreislauf führen, möglichst zu vermeiden.

Die Eigenschaften von Pumpen (Förderleistung, Druck) sollten auf der Grundlage einer Funktionsanalyse des Systems spezifiziert werden.

Die Spezifikationen von Pumpeneigenschaften (Förderleistung, Druck) sollten so genau wie möglich auf der Grundlage der Eigenschaften des Rohrleitungskreislaufs und der Betriebsbedingungen abgeschätzt werden.

A.1.2.3.2 Ventile

Erfahrungen zeigen, dass Kavitation bei Steuerventilen, insbesondere bei Absperrklappen, zu hohen Schwingungspegeln in den Rohrleitungskreisläufen führt. Die Umstellung auf Kavitationsbedingungen führt zu einem plötzlichen Anstieg dieser Pegel.

Kavitation sollte bei Steuerventilen, insbesondere bei Absperrklappen, verhindert werden.

Mit Ausnahme von Steuerventilen gibt es bei anderen Ventilen keine Anzeichen dafür, dass Kavitation zu hohen Schwingungspegeln führt. Trotzdem ist es wünschenswert, das Kavitationsrisiko bei den anderen Arten von Ventilen zu begrenzen.

Die Begrenzung der Kavitation und die damit zusammenhängenden Kriterien liegen in der Verantwortung der Ventil-Hersteller, in Übereinstimmung mit der Anwendung aktueller Normen.

A.1.2.3.3 Blenden

Blenden mit Einzelbohrung bergen die Gefahr, dass Luft bei einer höheren Frequenz zwischen einer Wirbelablösung an der Blende und einer akustischen Kavität der Rohrleitung „pfeift“. Abgesehen von einem möglichen akustischen Unbehagen kann diese „pfeifende“ Luft eine Schwingungsquelle mit ziemlich hoher Energie darstellen, die möglicherweise zu einer Beschädigung führt.

Die Frequenz einer Wirbelablösung wird durch die Strouhal-Zahl beschrieben:

$$S_r = \frac{ft}{V}$$

Dabei ist

- S_r ein von der untersuchten Geometrie abhängiger Wert, der für eine Blende mit Einzelbohrung mit einem Verhältnis von $t/D_{\text{hole}} < 1$ im Bereich von 0,2 bleibt;
- f die Wirbelablösefrequenz;
- t die Dicke der Membran;
- V die Strömungsgeschwindigkeit in der Blende;
- D_{hole} der elementare Durchmesser der Blendenbohrung(en).

Für eine Blende mit N Bohrungen gilt:

$$S_r = \frac{\pi D_{\text{hole}}^2 N f t}{4Q}$$

Dabei ist

- Q die Durchflussrate.

Das Beispiel von Blenden mit Einzelbohrung und mit mehreren Bohrungen in einem System, die identische hydraulische Druckverlustbeiwerte aufweisen, zeigt, dass die Vergrößerung der Anzahl von Bohrungen sich geringfügig auf die Frequenz der Wirbelablösung bei $Q = 30 \text{ m}^3/\text{s}$ mit $S_r = 0,2$ auswirkt.

- Blende mit Einzelbohrung $N = 1$, $D_{\text{hole}} = 22,3 \text{ mm}$, $f = 304 \text{ Hz}$;
- Blende mit mehreren Bohrungen $N = 47$, $D_{\text{hole}} = 3 \text{ mm}$, $f = 358 \text{ Hz}$.

Jedoch kommt es bei der Blende mit mehreren Bohrungen nicht zu „pfeifender“ Luft. Diese Beobachtung kann durch das Verhältnis $t/D_{\text{hole}} \gg 1$ erklärt werden, was dazu führt, dass $S_r \gg 0,2$ ist.

Die Blenden mit mehreren Bohrungen ermöglichen außerdem auch eine Verringerung des Grads der Verwirbelung, indem sie die Größenskala der Wirbel verringern und diese dekorrelieren.

Jedoch ermöglicht die Verwendung von Blenden mit mehreren Bohrungen nur eine mittelmäßige Verringerung der Kavitation und ihrer Schwingungswirkungen.

Blenden wie z. B. Blenden mit Einzelbohrung sollten mit Ausnahme von Blenden zur Messung der Durchflussrate unterbunden werden. Es wird empfohlen, Blenden mit mehreren Bohrungen anzuwenden, wobei die Anzahl der Bohrungen mit einem Mindestdurchmesser von einigen Millimeter, jedoch nicht so klein, dass der Durchfluss durch Partikel in der Strömung blockiert wird, möglichst groß zu wählen ist. Spülen und Filter können angewendet werden, um dies zu vermeiden.

Viele einstufige Blenden in Anlagen kavitieren. Die Mehrstufen-Technologie wird in Anlagen weithin angewendet und die Dimensionierungsverfahren der Ventilhersteller wurden validiert.

Durch die Verwendung von mehrstufigen Blenden mit mehreren Blenden hintereinander wird ermöglicht, hydraulische Druckverluste zu verteilen und dabei die Drücke hinter jeder Blende ausreichend hoch zu halten, so dass keine Kavitation verursacht wird. Die kritische Blende ist im Allgemeinen die letzte, da sie einem geringen hydraulischen Druckverlust standhalten sollte und ihre kritische Tullis-Zahl am geringsten ist.

Die Durchflussraten-Blenden weisen im Allgemeinen geringe hydraulische Druckverluste auf, was erklärt, warum Rückmeldungen von Erfahrungen bezüglich der Kavitation bei dieser Art von Komponenten zurückgehen oder sogar überhaupt nicht vorhanden sind. Die Dimensionierung sollte auch dann noch überprüft werden, wenn die Blenden nicht kavitieren. Wenn sie kavitieren, gibt es zwei Lösungen. Entweder wird ihr hydraulischer Druckverlust verringert, oder der Druck hinter ihnen stromabwärts (p_2) wird erhöht, indem die Blenden innerhalb des Rohrleitungskreislaufs bewegt werden. Außerdem kann die Gültigkeit der an den Anschlüssen einer kavitierenden Messblende genommenen Durchflussratenmesswerte hinterfragt werden.

Es wird empfohlen, die Blenden unter Berücksichtigung des Kavitationsrisikos zu dimensionieren. Um dieses Risiko zu verhindern, werden, mit Ausnahme von Blenden zur Messung der Durchflussrate, mehrstufige Blenden mit mehreren Bohrungen angewendet.

Bei Blenden zur Messung der Durchflussrate wird ihr hydraulischer Druckverlustbeiwert verringert, und sie werden, sofern möglich, in einem Bereich des Rohrleitungskreislaufes angeordnet, in dem die Drücke am höchsten sind.

Bei Blenden zur Messung der Durchflussrate (mit Einzelbohrung) sollte die wie folgt festgelegte Thoma-Zahl σ größer oder gleich 5 sein.

Anzugeben sind:

p_1 der Druck stromaufwärts vor der Blende;

p_2 der Druck stromabwärts nach der Blende;

Δp $p_2 - p_1$;

p_v der Flüssigkeits-Dampfdruck bei der Betriebstemperatur.

Für die Bedingungen im ungünstigsten Fall sollte die Thoma-Zahl übereinstimmen mit:

$$\sigma = \frac{p_2 - p_v}{\Delta p} \geq 5$$

Für Blenden mit mehreren Bohrungen sollten die von den Ventil-Herstellern aufgestellten und validierten Dimensionierungsregeln angewendet werden. Wenn es aufgrund der Bedingungen im ungünstigsten Fall nicht möglich ist, einstufige Blenden mit mehreren Bohrungen zu verwenden, sollte die Anwendung von mehrstufigen Blenden mit mehreren Bohrungen in Betracht gezogen werden.

A.1.2.4 Anordnung

A.1.2.4.1 Hauptleitungen (Grundrohre)

Aus Erfahrung und aufgrund der seismischen Anforderungen sollten sich konzentrierte Massen (z. B. Ventile, Pulsationsdämpfer) so nahe wie möglich bei den Halterungen befinden.

Hochleistungspumpen leiten viel Energie ein, weshalb für Rohrleitungskreisläufe mit Pumpensystemen, die eine Leistung ($Q \times TDH$) von mehr als 500 kW haben, empfohlen wird, im Hinblick auf Schwingungen eine Konstruktionsüberprüfung durchzuführen, um die Risiken übermäßiger Schwingungen vor der Inbetriebnahme zu begrenzen.

- Q ist die Durchflussrate (m^3/s).
- TDH ist der dynamische Gesamtdruck (kPa).

Es wird empfohlen, die „Schwingungsbrücken“ zwischen Rohrleitungshalterungen zu begrenzen. Falls dies nicht möglich ist, sollte die Steifigkeit der gemeinsamen Halterungen erhöht werden.

Es wird empfohlen, Halterungen so anzuordnen, dass sie höchstens drei Rohrbiegungen stromaufwärts vor oder stromabwärts nach einer möglichen Schwingungsquelle (z. B. einer Teilstrompumpe) positioniert sind. Die Rohrhalterungen, auf die hier verwiesen wird, sind Halterungen ohne Spiel.

Die Turbulenz nach einem Ventil oder einer Blende kann sich selbst stromabwärts in der Rohrleitung fortpflanzen. Diese Regel ermöglicht es, die direkte Erregung des Rohrleitungskreislaufes durch die Turbulenz zu begrenzen. Unabhängig von schwingungsbezogenen Problemen wird empfohlen sicherzustellen, dass die geraden Längen stromaufwärts vor und stromabwärts nach Druckverlusteinrichtungen angemessen sind.

Um Schwingungsprobleme zu begrenzen, sollte zwischen der isolierten hydraulischen Druckverlust-Komponente und der ersten Rohrbiegung oder der ersten Änderung der Richtung stromabwärts ein Mindestabstand von 5 DN (Nenn Durchmesser), empfohlen werden 7 DN, aufrechterhalten werden.

A.2 Analyse durch Berechnung

A.2.1 Allgemeines

Die wesentlichen verschiedenen Verfahren für die Berechnung der Auswirkung dynamischer Ereignisse sind:

- a) vereinfachte statische Ersatzanalyse;
- b) quasistatische Ersatzanalyse;
- c) Modalanalyse der Reaktionsspektren;
- d) Kraftverlaufsanalyse.

Erfahrungen haben gezeigt, dass bei ordnungsgemäß unterstützten Rohrleitungssystemen die vereinfachten Verfahren im Allgemeinen zu annehmbaren technischen Lösungen zur Schadensverhütung bei dynamischen Ereignissen führen. Ist eine komplexe Analyse erforderlich, so sollte die Auswahl geeigneter Programme und konsistenter Daten für die Ableitung der Kräfte und zulässigen Lasten mit Bedacht erfolgen.

Eine Verifizierung von Rohrleitungen und ihren Bauteilen darf auch mit vollmaßstäblichen oder maßstäblich verkleinerten Modellen durchgeführt werden, die Schwingungszuständen ausgesetzt werden, die den erwarteten dynamischen Beanspruchungen vergleichbar sind.

A.2.2 Seismische Ereignisse

A.2.2.1 Allgemeines

Seismische Ereignisse erzeugen Schwingungsbewegungen im Boden, die durch das Tragwerk auf Rohrleitungen und andere Anlagenteile übertragen werden. In der Folge erfahren Tragwerk und Anlagenteile Beschleunigungen und Verschiebungen, deren Betrag von ihrer Steifigkeit und ihren Eigenfrequenzen abhängt.

Die Analyse der Wechselwirkung von Tragwerken und seismischen Kräften ist nicht Bestandteil der Auslegung von Rohrleitungen; entsprechende Angaben zu den betreffenden Reaktionen werden üblicherweise vom Käufer oder Anlagenbetreiber nach einer Untersuchung der Erdbebengefährdung und der Auslegungsanalyse des vorgeschlagenen Tragwerks vorgelegt.

Die Analyse der Rohrleitung sollte die größten Kräfte und Momente aufzeigen, die als Folge der Tragwerksreaktion auf die voraussichtliche Beanspruchung durch Erdbeben in der Rohrleitung entstehen können; dabei werden die Kräfte kombiniert, die sich aufgrund ihrer Wirkrichtung zu den statischen Lasten addieren. Bei Verschiebungen ist jedoch besondere Sorgfalt geboten, da für Planung und Auslegung der Rohrhalterungen sowohl die positiven wie auch die negativen Bewegungen von Bedeutung sein können.

Form und Umfang der dem Rohrleitungskonstrukteur vorzulegenden seismischen Daten hängen vom jeweiligen Berechnungsverfahren ab.

A.2.2.2 Vereinfachte statische Ersatzanalyse

Bei diesem Analyseverfahren wird die Schwankungsbreite der Tragwerksreaktion bei unterschiedlichen Frequenzen und Dämpfungen vernachlässigt, und die Verschiebungen und Kräfte in der Rohrleitung werden durch eine einzige äquivalente statische Beschleunigungskraft in jeder Hauptrichtung der seismischen Bewegungen berechnet. Der Wert dieser Beschleunigung beruht auf dem durch das Erdbeben verursachten höchsten Beschleunigungswert. Die Angabe für den Konstrukteur kann entweder in Form eines Reaktionsspektrums in Bodenhöhe, als Berechnung für jede Ebene des Tragwerks oder als Angabe eines Satzes von Reaktionen erfolgen, der als Einhüllende sämtlicher verschiedenen Reaktionen der Rohrleitung angesehen wird.

Stehen keine Beschleunigungswerte für das betreffende Tragwerk zur Verfügung, so sollte der Konstrukteur den Spitzenwert der Bodenbeschleunigung als maximale Beschleunigung a_i verwenden.

Die äquivalente statische Beschleunigung, a_{cqi} , für die Richtung i wird wie folgt berechnet:

$$a_{cqi} = k_i a_i \quad (\text{A.2.1-1})$$

Dabei ist

a_i die maximale Beschleunigung für die jeweilige Ebene in Richtung i ;

k_i ein Beiwert, für den gilt:

$k_i = 1$ wenn die Eigenfrequenzen der Rohrleitung nachweislich zu weniger als 10 % mit den Schwingungsfrequenzspitzen im Reaktionsspektrum des Tragwerks übereinstimmen;

$k_i = 1,5$ wenn keine Überprüfung für die Übereinstimmung des Schwingverhaltens von Rohrleitung und Tragwerk vorgenommen wurde.

A.2.2.3 Quasistatische Ersatzanalyse

Bei diesem Berechnungsverfahren wird eine einzige statische Beschleunigung in jeder Richtung der Bodenschwingung verwendet, die gleich der größten Beschleunigung im Reaktionsspektrum des Tragwerks ist, die die Rohrleitung in Schwingung versetzen kann. Für dieses Verfahren sollten die signifikanten Eigenfrequenzen der Rohrleitung berechnet werden.

Die äquivalente quasistatische Beschleunigung $a_{qe\ i}$ in Richtung i wird wie folgt berechnet:

$$a_{qe\ i} = \bar{k}_i a_{fi} \quad (\text{A.2.1-2})$$

Dabei ist

- a_{fi} die größte Beschleunigung im Schwingungsspektrum am Boden oder in der darüber liegenden Ebene bei Frequenzen größer oder gleich der ersten Eigenfrequenz der Rohrleitung;
- \bar{k}_i ein Faktor zur Berücksichtigung der Einflüsse von mehreren Eigenfrequenzen auf die Gestaltung der Rohrleitung.

Der Faktor \bar{k}_i sollte Tabelle A.2.1-1 entnommen werden. Sofern ihre Zulässigkeit nachgewiesen wurde, können auch niedrigere Werte für diesen Faktor verwendet werden.

Tabelle A.2.1-1 — Werte für \bar{k}_i

Modell	\bar{k}_i
mehrfach in gleichen Abständen aufgelagerter gerader Träger	1,0
einseitig aufgelagerter Träger	1,0
beidseitig aufgelagerter Träger (Höchstkräfte müssen an jedem Querschnitt angreifen können)	1,0
ebene Systeme, z. B. Rahmen, Flächentragwerk, Rohrleitung in einer Ebene	1,2
dreidimensionale Systeme mit komplexen Formen	1,5

Bei starren Rohrleitungen (d. h. Rohrleitungssystemen, deren niedrigste Eigenfrequenz größer oder gleich der Grenzfrequenz des Bodenschwingungsspektrums ist) kann für \bar{k}_i der Wert 1,0 verwendet werden.

Für die Ermittlung der Reaktionen von Rohrhalterungen kann für \bar{k}_i der Wert 1,0 verwendet werden, gleichgültig welches der in Tabelle A.2.1-1 angegebenen Modelle betrachtet wird.

A.2.2.4 Modalanalyse der Reaktionsspektren

A.2.2.4.1 Allgemeines

Für eine Modalanalyse der Reaktionsspektren benötigt der Rohrleitungskonstrukteur die Angabe eines Reaktionsspektrums für jede Ebene/jeden Ort innerhalb des Tragwerks oder eines Spektrums, das als Einhüllende der Tragwerksreaktionen betrachtet werden kann. Dieses Schwingungsreaktionsspektrum wird aus den durch das Erdbeben bei unterschiedlichen Frequenzen über einen entsprechenden Zeitraum verursachten Höchstbeschleunigungen und ihren Wechselwirkungen mit dem Tragwerk abgeleitet. Durch eine Schwingungsanalyse der Rohrleitung sollten die Verschiebungen, Momente und Kräfte für die eintretenden Beschleunigungen bei jeder signifikanten Frequenz im Schwingungsspektrum ermittelt werden.

A.2.2.4.2 Modalkombination

Die Gesamtreaktion der Rohrleitung (Verschiebungen, Momente, Kräfte) in jeder Richtung sollte durch Kombination aller Spitzenwerte der Schwingungsreaktion nach einem geeigneten Superpositionsverfahren ermittelt werden:

Superposition der Absolutwerte der Summe (ABS) (en: absolute sum superposition):

$$R_i = \pm \sum_{j=1}^n |R_{ji}| \quad (\text{A.2.1-3})$$

Quadratwurzel aus der Summe der Quadrate (SRSS) (en: square root of the sum of the squares):

$$R_i = \pm \sqrt{\sum_{j=1}^n R_{ji}^2} \quad (\text{A.2.1-3})$$

Vollständige quadratische Kombination (CQC) (en: complete quadratic combination):

$$R_i = \pm \sqrt{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n R_{ji} \rho_{jk} R_{ki}}$$

dabei ist

$$\rho_{ij} = \frac{8\zeta^2(1+r)r^{3/2}}{(1-r^2)^2 + 4\zeta^2r(1+r)^2},$$

$$r = \frac{\omega_j}{\omega_i}, \zeta: \text{Dämpfung} \quad (\text{A.2.1-4})$$

Höchstwert-Superposition (MAX) (en: maximum value superposition):

$$R_i = \pm \max_{j=1}^n |R_{ji}| \quad (\text{A.2.1-5})$$

Dabei ist

- R_i die Gesamtreaktion in der Hauptrichtung i ;
- R_{ji} die Spitzenreaktion aufgrund des Eigenvektors j in der Hauptrichtung i ;
- n die Anzahl signifikanter Eigenvektoren.

Die Absolutwertkombination kann stets angewendet werden, wobei sie jedoch in vielen Situationen überkonservativ sein kann. Wenn die Reaktionskomponenten als statistisch unkorreliert betrachtet werden können, kann das SRSS-Verfahren angewendet werden. Für Situationen mit vielen nahe beieinander liegenden Eigenvektoren (mit ähnlicher Frequenz) ist das CQC-Verfahren am geeignetsten. Die MAX-Superposition sollte nur in Fällen angewendet werden, wenn das gleichzeitige Wirken der Komponenten sehr unwahrscheinlich ist und Wechselwirkungen vernachlässigt werden können.

A.2.2.4.3 Fehlende Masse

Um die nicht an den Eigenschwingformen, die bis zu einer gegebenen Frequenzgrenze während der Analyse berechnet wurden, beteiligte Restmasse zu berücksichtigen, sollte die verbleibende Masse unter Anwendung

einer statischen Beschleunigung, die dem Höchstwert des Reaktionsspektrums über der Frequenzgrenze (höchste berechnete Eigenfrequenz) entspricht, beschleunigt werden. Dieses Ergebnis wird als „Rest-Eigenvektor“ (en: residual mode) bezeichnet und sollte mit der modalen Reaktion durch Anwendung eines geeigneten Superpositionsverfahrens (üblicherweise SRSS) kombiniert werden.

A.2.2.4.4 Beiträge von Bauwerken

Wenn das Rohrleitungssystem an verschiedene Bauwerke angeschlossen ist, die während eines seismischen Ereignisses unabhängig voneinander Bewegungen ausführen, sollte der Beitrag jedes Bauwerks und jeder Richtung gesondert berechnet werden. Diese Bauwerks-Beiträge sollten mit der modalen Reaktion durch Anwendung eines geeigneten Superpositionsverfahrens (üblicherweise SRSS) kombiniert werden.

A.2.2.4.5 Räumliche Kombination

Die drei Raumrichtungen sollten mit der modalen Reaktion durch Anwendung eines geeigneten Superpositionsverfahrens kombiniert werden.

Für die meisten Rohrleitungssysteme können bei der Kombination der Reaktionen der Rohrleitung in den drei Hauptrichtungen die folgenden Annahmen zugrunde gelegt werden:

- die Rohrleitungsreaktionen auf verschiedene Schwingungsspitzen des Tragwerks treten nicht gleichzeitig ein;
- Reaktionsspitzen treten nicht gleichzeitig in den drei Hauptrichtungen ein.

Folglich darf die maximale Reaktion des Systems berechnet werden, indem das MAX- oder SRSS-Verfahren auf die Höchstwerte in den drei orthogonalen Richtungen angewendet wird.

A.2.2.5 Analyse des Kraftverlaufs über die Zeit

Sind seismisch bedingte Verschiebungen des Tragwerks über die Zeit bekannt, so kann das dynamische Reaktionsverhalten des Rohrleitungssystems ermittelt werden. Dazu wird ein geeignetes Modell der Rohrleitung, das die Steifigkeit und Massen der Rohrleitung sowie entsprechende dynamische Dämpfungsfaktoren enthält, an den Stütz- und Endpunkten mit den Beschleunigungen bzw. Verschiebungen nach einem vorgegebenen Muster beaufschlagt. Die resultierenden Spannungen aus den Verschiebungen der Rohrleitung lassen sich durch eine Reihe von Berechnungen in diskreten Zeitabständen ermitteln.

Für die Lösung dynamischer Probleme stehen verschiedene Rechenprogramme zur Verfügung, und der Konstrukteur sollte sicherstellen, dass die gewählten Modelle und Analyseverfahren geeignet sind.

Durch geeignete Wahl der Zeitintervalle sollte vermieden werden, dass signifikante kurzzeitige Erregungen nicht erfasst werden, und durch eine entsprechende Anzahl der Stufen sollte sichergestellt werden, dass alle wesentlichen Verschiebungen in der Analyse berücksichtigt werden.

Die seismischen Spannungen in jeder der drei Hauptrichtungen sollten nach dem SRSS-Verfahren für jedes Zeitintervall kombiniert werden, und die daraus resultierenden Höchstwerte des seismischen Ereignisses sollten dann zu den ständig wirkenden Lasten addiert werden, um die Gesamtspannungen für die Auslegung zu ermitteln.

A.2.2.6 Dämpfungen

Schwingungen in Rohrleitungen und Tragwerken unterliegen einem Energieverlust bzw. einer Dämpfung. Ursachen dieser Dämpfung sind u. a. inelastisches Werkstoffverhalten, Verbindungen zwischen Bauteilen, Gleitreibung usw. Da eine quantitative Untersuchung der Dämpfung komplex und fallspezifisch ist, sollten, sofern keine anderen geeigneten und gesicherten Daten vorliegen, für den Zweck dieses Anhangs die Dämpfungswerte in Tabelle A.2.1-2 oder Bild A.2.1-1 für die lineare statische Ersatzanalyse, die lineare

Analyse von Reaktionsspektren und die lineare Analyse des Kraftverlaufs über die Zeit von Rohrleitungssystemen verwendet werden.

Tabelle A.2.1-2 — Dämpfungswerte für Rohrleitungssysteme

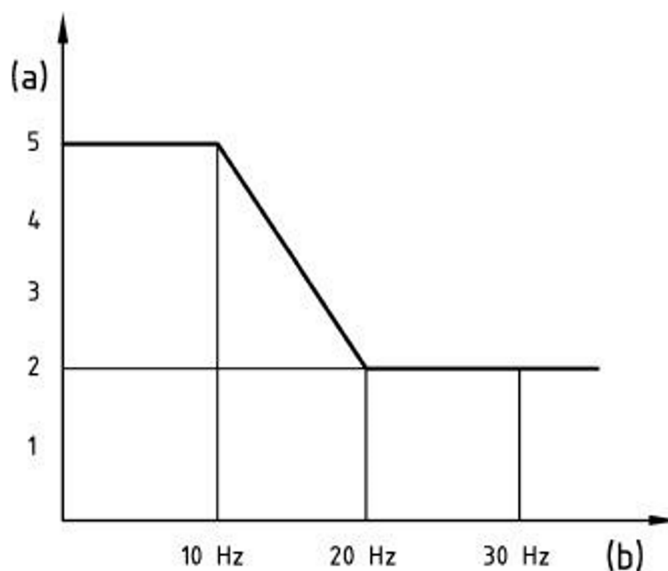
Kategorie	Dämpfungswert	
	SSE	OBE > SSE/3
Rohrleitungssysteme	4 %	3 %

ANMERKUNG 1 Der SSE-Dämpfungswert (Sicherheitserdbeben, en: Safe Shut-down Earthquake) für die lineare dynamische Analyse von Tragwerken wurde auf der Grundlage gewählt, dass die Lastkombinationen einschließlich SSE in den Tragwerken zu Spannungen führen, die nahe bei den zulässigen Spannungsgrenzwerten liegen. Die Beurteilung der Spannungen kann somit unter Anwendung von $k = 1,8$ aus 12.3.3 durchgeführt werden. Dieses Niveau entspricht üblicherweise der Anforderung an die Standsicherheit NCR (en: No-Collapse Requirement) nach EN 1998-1.

ANMERKUNG 2 Sofern es erforderlich ist, ein OBE (Betriebserdbeben, en: Operational Basis Earthquake)/DBE (Bemessungserdbeben, en: Design Basis Earthquake) zu analysieren, kann der Dämpfungswert für die lineare dynamische Analyse von Tragwerken für wahrscheinlichere Erdbeben verwendet werden. Die Beurteilung der Spannungen kann somit unter Anwendung von $k = 1,2$ aus 12.3.3 durchgeführt werden. Dieses Niveau entspricht üblicherweise der Anforderung an die Schadensbegrenzung DLR (en: Damage Limitation Requirement) nach EN 1998-1.

ANMERKUNG 3 Bei der Erzeugung der (Beschleunigungs)-Reaktionen des Bauwerks unabhängig davon, ob statische Reaktionen oder Reaktionsspektren, sollte die dämpfungscompatible Tragwerksreaktion für SSE oder OBE angewendet werden.

ANMERKUNG 4 Für den Hintergrund und die letztendliche Verwendung der frequenzabhängigen Dämpfung, siehe NUREG Reg. Guide 1.6 Rev. 1 2007 sowie NUREG CR-6919 [28].



Legende

Für alle Rohrgrößen:

- (a) kritische Dämpfung in %
- (b) Frequenz in Hz

Bild A.2.1-1 — Dämpfung bei seismischen Ereignissen

A.2.2.7 Verschiebung von Rohrhalterungen durch seismische Einflüsse

Die Auswirkungen der relativen Bewegungen von Rohrhalterungen und Festpunkten bei seismischen Ereignissen sollten bei der Berechnung der Gesamtspannungen berücksichtigt werden. Für Rohrleitungshalterungen, die in derselben Ebene eines Gebäudes liegen, mögen diese Auswirkungen zwar nur gering sein; die relativen Verschiebungen können jedoch erheblich sein, wenn Teile des Tragwerks nicht miteinander verbunden sind.

In solchen Fällen sollte der Konstrukteur die Absolutwerte der Summe der Verschiebungen an den Festpunkten in jeder der drei Hauptrichtungen (ungeachtet der Vorzeichen) verwenden. Alternativ können die maximalen relativen Verschiebungen und die resultierenden Spannungen durch eine eingehende Analyse des Kraftverlaufs im Tragwerk über die Zeit ermittelt werden. Dabei ist anzumerken, dass es sich bei diesen Spannungen aufgrund relativer Bewegungen um selbstbegrenzende Sekundärspannungen handelt.

A.2.3 Schlagartiges Schließen von Ventilen

A.2.3.1 Allgemeines

Wenn der Fluidstrom in einem Rohrleitungssystem durch das schlagartige Schließen eines Ventils in Fließrichtung hinter der Quelle unterbrochen wird, kann darin eine Druckwelle entstehen, die vom Ventil zur Quelle zurückwandert. Eine derartige Welle tritt in Wechselwirkung mit der Rohrleitung, wird von der Quelle reflektiert und erzeugt dadurch ein komplexes Druckwellenmuster im Rohrleitungssystem. In verzweigten Rohrleitungssystemen werden diese Druckwellenmuster darüber hinaus dadurch beeinflusst, dass in den Rohren wandernde Wellen phasenverschoben aufeinandertreffen. Durch Druckunterschiede der Wellen werden Schwingungen im System erzeugt, die wiederum ungleichgewichtige Kräfte in der Rohrleitung verursachen, die erst nach mehreren Sekunden abgebaut sind. Dieses Phänomen wird als Wasserschlag bezeichnet.

Es tritt nur auf, wenn das Schließen des Ventils in kürzerer Zeit erfolgt, als eine Welle benötigt, um im Fluid mit Schallgeschwindigkeit vom Ventil zur Quelle zu wandern und von dort zum Ventil reflektiert zu werden. Diese Art des Ventilschließvorgangs wird als „schlagartig“ bezeichnet.

Der Schließvorgang selbst hängt vom Ventiltyp ab. Es wird allgemein angenommen, dass die Geschwindigkeit, mit der der Durchflussquerschnitt reduziert wird, über einen großen Teil des Ventilhubes konstant ist und dann in der Endphase des Schließvorgangs abnimmt, um Schäden am Ventilsitz zu minimieren. Ein derartiges Auslaufen der Schließkurve erhöht die Gesamtschließzeit, wodurch die Wirkung des Wasserschlags im Allgemeinen herabgesetzt wird.

Es sollte jedoch beachtet werden, dass der Fluiddurchsatz nicht den gleichen charakteristischen Verlauf aufweist, sondern proportional höher als die Querschnittsabnahme zum selben Zeitpunkt ist. Das bedeutet, dass das Ventil über einen großen Teil seines Querschnitts schließen kann, ohne den Fluiddurchsatz erheblich zu verringern. Folglich erfordern die Berechnungen zur modellmäßigen Darstellung der Schließcharakteristik des Ventils besondere Beachtung dieses Aspekts.

Der Druckanstieg sollte berechnet werden, so dass die Rohrleitung der Summe aus kontinuierlichen und druckstoßinduzierten Spannungen sicher standhält. Darüber hinaus sollte der Betrag der ungleichgewichtigen Kräfte ermittelt und bei der Auslegung der Rohrleitung berücksichtigt werden, um die Spannungen in den Rohren und Stützen sowie an den Verbindungen zu Rohrhalterungen und Tragwerk zu berechnen.

Zusätzlich zur Berechnung der Kräfte im System sollte der Konstrukteur die Bewegungen der Rohrleitung durch die erzwungene Schwingung ermitteln, um ausreichendes Spiel sicherzustellen.

Es sollte beachtet werden, dass zusätzlich zur Druckwelle entgegen der Strömungsrichtung hinter dem schließenden Ventil eine Verdünnungswelle erzeugt werden kann, deren Unterdruckwirkung untersucht werden sollte.

ANMERKUNG Außerdem sind die Auswirkungen von schlagartigem Ventilöffnen zu beachten. In Fließrichtung vor dem Ventil lassen sich aufgrund einer Front niedrigeren Drucks, die sich in der Rohrleitung rückwärts bewegt, ähnliche Effekte feststellen wie beim Schließen des Ventils. Aufgrund dessen Wirken in der Rohrleitung in Fließrichtung hinter dem Ventil mit der Bewegung des Fluids bzw. seiner Druckfront ungleichgewichtige Momente und Druckkräfte auf jeden geraden Rohrleitungsabschnitt ein.

A.2.3.2 Vereinfachte statische Ersatzanalyse schlagartiger Ventilschließvorgänge

Bei diesem Verfahren wird nur der anfängliche Druckanstieg im System nach dem Schließen des Ventils betrachtet und angenommen, dass die dadurch verursachten Spannungen die Maximalspannungen sind, die im System auftreten. Wechselwirkungen und Dämpfung der Wellen sowie die dynamische Reaktion des Systems auf die Schwingungen bleiben unbeachtet. Diese Analyse führt zu konservativen Ergebnissen und damit gegebenenfalls zu einer Überdimensionierung der Rohrleitung, die mit den thermischen oder anderen Auslegungskriterien nicht vereinbar ist.

a) Untersuchung des Druckanstiegs

Der Schließvorgang ist als schlagartig anzusehen, wenn die folgende Gleichung erfüllt ist:

$$T < \frac{2L}{v_s} \quad (\text{A.2.2-1})$$

Dabei ist

- L die Länge des Rohrleitungssystems;
- T die effektive Ventilschließzeit;
- v_s die Schallgeschwindigkeit im Fluid.

Der anfängliche Druckanstieg dP wird wie folgt berechnet:

$$dP = v_s v \rho \quad (\text{A.2.2-2})$$

Dabei ist

- v die Geschwindigkeit des Fluids;
- ρ die Dichte des Fluids unter den Berechnungsbedingungen.

ANMERKUNG Dies ist die Joukowsky-Formel.

Die Schallgeschwindigkeit lässt sich wie folgt berechnen:

$$v_s = \sqrt{\frac{k}{\rho}} \quad (\text{A.2.2-3})$$

Dabei ist

- k der Kompressionsmodul des Fluids.

Für Rohrleitungen mit hoher Elastizität kann die Gleichung wie folgt abgewandelt werden:

$$v_s = \sqrt{\frac{1}{\rho \left(\frac{1}{k} + \frac{D_o}{e E} \right)}} \quad (\text{A.2.2-4})$$

Der Konstrukteur sollte sicherstellen, dass die Rohrleitung hinsichtlich der Mindestwanddicke so bemessen ist, dass sie der Summe aus Betriebsdruck und maximalem dynamischen Druckanstieg dP standhält.

b) Statische Untersuchung dynamischer Beanspruchungen

Auswirkungen von Ungleichgewichten oder Druckstößen auf das Rohrleitungssystem lassen sich untersuchen, indem gerade Rohrabschnitte an den Böden oder an Abbiegungen mit einem berechneten Differenzdruck beaufschlagt werden. Dieser Differenzdruck ist der Anteil des über die betrachtete Rohrlänge entwickelten Spitzendrucks und wird als auf den inneren Rohrquerschnitt wirkend angenommen. Bei der Berechnung der resultierenden Kräfte sollten die Änderung der Schließgeschwindigkeit über den Ventilhub und der dynamische Verlauf der tatsächlichen Belastungen durch entsprechende Faktoren berücksichtigt werden.

Die größte unausgeglichene Kraft F in einem Rohr der Länge L kann wie folgt berechnet werden:

— für starre Rohrleitungen gilt:

$$F = 2 \frac{M}{A} \frac{L}{\lambda} dP \pi \frac{D_i^2}{4} \quad (\text{A.2.2-5})$$

— für elastische Rohrleitungen gilt:

$$F = 4 \frac{M}{A} \frac{L}{\lambda} dP \pi \frac{D_i^2}{4} \quad (\text{A.2.2-6})$$

$$\lambda = v_s T \quad (\text{A.2.2-7})$$

$$\frac{L}{\lambda} \frac{M}{A} \leq 1 \quad (\text{A.2.2-8})$$

Dabei ist

λ die Wellenlänge der Druckwelle;

M die maximale Verringerungsgeschwindigkeit des Ventilquerschnitts;

A die aus der Gesamtschließzeit ermittelte mittlere Schließgeschwindigkeit.

A.2.3.3 Verbesserte Berechnungsverfahren

Merkmale und Auswirkungen der durch schlagartige Ventilschließvorgänge erzeugten Druckwelle können auch durch eine Analyse des Kraftverlaufs über die Zeit oder eine Modalanalyse ermittelt werden.

Die Entwicklung des Druckstoßes im Rohrleitungssystem kann durch mathematische Modelle der Ereignisse wiedergegeben werden; werden diese Drücke in einer hohen Anzahl von Zeitintervallen betrachtet, so können die Kräfte an Rohrenden oder Richtungsänderungen ermittelt werden. Die so ermittelten Kräfte können als wesentlicher Faktor in einer Analyse der aus diesen Kräften resultierenden Schwingungen der Rohrleitung verwendet werden.

Im Fall einer Modalanalyse sollte der Konstrukteur sicherstellen, dass keine signifikant höheren Eigenvektoren aufgrund der Wechselwirkung von Wellen in der Rohrleitung über der oberen Grenzfrequenz liegen, da sich das System bei diesen Frequenzen verhältnismäßig unelastisch verhalten kann.

Diese verbesserten Verfahren können Kopplungswirkungen zwischen dem Fluid und der Rohrleitung einschließen und damit die Dämpfung der Druckwelle durch die Energieübertragung auf die relativ starre Rohrleitung berücksichtigen. Bei Dampf oder ähnlichen Fluiden, bei denen die Fluidmasse im Verhältnis zur Masse der Rohrleitung vernachlässigt werden kann, sind die Vorteile dieser Analyse gegenüber herkömmlichen Verfahren gering.

Während diese Verfahren unter Umständen genauere und damit weniger konservative Lösungen für das Problem schlagartiger Ventilschließvorgänge ergeben, lassen sich mit Hilfe der verbesserten Verfahren zur Analyse des Ventilschließvorgangs sehr genaue Ergebnisse für die Modelldarstellung der Fluidquelle, die Ventilmerkmale, die Rohrhalterungen und das Strömungsverhalten des Fluids erzielen. Der Konstrukteur sollte Eignung und Genauigkeit der mathematischen Modelle für alle aufgeführten Aspekte sorgfältig prüfen.

A.2.4 Strömungsinduzierte Schwingungen

A.2.4.1 Allgemeines

Der instationäre Strom von Fluiden in Rohrleitungssystemen kann Schwingungen in der Rohrleitung hervorrufen. Langzeitschwingungen führen zu Ermüdungsschäden, vorausgesetzt, dass die Schwingung bezüglich der Empfindlichkeit des Systems (siehe A.2.7) und des Werkstoffes stark genug ist.

Das Schwingungsrisiko verringert sich, wenn die Strömungsgeschwindigkeit für das gegebene Fluid innerhalb der in A.1.2.2.5 empfohlenen Grenzen gehalten wird. Ein Rohrleitungssystem kann gleichzeitig der Einwirkung verschiedener Schwingungserreger ausgesetzt sein, deren Auswirkungen und Einflüsse auf die Rohrleitung nur durch eine komplexe Analyse ermittelt werden können.

Konstruktionsleitlinien, wie in A.1.2 erläutert, verringern das Schwingungsrisiko ebenfalls. Es wird berücksichtigt, dass die Schwingungspegel im Effektivwert (en: Root Mean Square, RMS) eine korrekte grobe Schätzung des Risikos sind.

Während der Konstruktionsphase bietet das theoretische Modell die folgenden Vorteile:

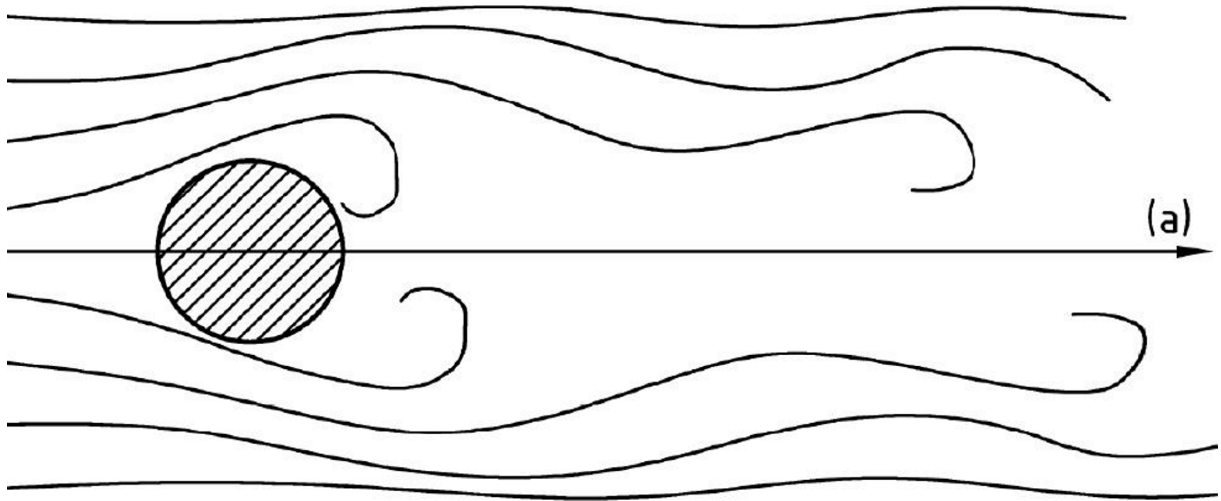
- Hilfe beim Verstehen einer Erscheinung, bezogen auf den jeweiligen Teil des Kreislaufs;
- in der Lage zu sein, die Auswirkungen mehrerer Lösungen miteinander zu vergleichen. Beispielsweise das Hinzufügen einer Rohrhalterung; die Untersuchung einer angezapften Leitung und der Einfluss davon; und auch die Berücksichtigung akustischer Quellen;
- kann einen Schwingungsqualitäts-Indexwert DS ergeben, wenn nach A.2.7 berechnet.

Diese Elemente sollten durch Messungen vor Ort validiert werden, wodurch sich modale Informationen und eine Rückstellung des Modells ergeben. Diese Analysen sind hilfreich, um Analyseergebnisse zu erhalten, die realen Ergebnissen besser entsprechen. Diese zu erhalten ist während der Konstruktionsphase laut Definition unmöglich, wobei jedoch trotzdem ermöglicht wird, den Einfluss einer Änderung in einer vorhandenen Installation zu quantifizieren.

A.2.4.2 Wirbelablösung

Wird in ein strömendes Fluid ein Körper eingebracht, entstehen hinter diesem Körper Wirbel, die auf beiden Seiten des Körpers in Form regelmäßiger Muster ausgebildet werden. Dieses Phänomen tritt sowohl im Innern durch die Rohrleitung selbst als auch an der Außenseite durch an der Rohrleitung vorbeiströmende Fluide (einschließlich Wind) auf. Bild A.2.3-1 zeigt das typische Wirbelmuster, das von einem zylindrischen Körper im Fluidstrom erzeugt wird. Ein derartiges Muster kann durch einen in die Strömung eingebrachten

rohrförmigen Körper, z. B. ein Thermometer oder ein anderes Messinstrument, hervorgerufen werden. Ähnliche Wirbelmuster können durch mehrere in der Strömung angeordnete Gruppen rohrförmiger Körper oder Objekte mit anderen Formen, z. B. Platten (in Absperklappen), entstehen.



Legende

(a) Strömung

Bild A.2.3-1 — Typisches Wirbelmuster

Diese Wirbel erzeugen am Körper eine schwingende Kraft senkrecht zur Strömung und eine kleinere oszillierende Kraft in Richtung der Strömung.

Die Frequenz f_F der Hauptkraft F lässt sich für einen zylindrischen Körper nach folgender Gleichung berechnen:

$$f_F = S \frac{v}{D} \quad (\text{A.2.3-1})$$

Dabei ist

v die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids;

D der Durchmesser des Zylinders;

S die geeigneten Quellen zu entnehmende Strouhal-Zahl.

$S = 0,2$ kann für Fluide mit einer Reynolds-Zahl zwischen 10^3 und 2×10^5 verwendet werden.

Die Größe der Kraft F lässt sich wie folgt berechnen:

$$F = C J \frac{1}{2} v^2 D L \sin(2\pi f_F T) \quad (\text{A.2.3-2})$$

Dabei ist/sind

L die Länge des Systems;

C, J und f_F Funktionen der Reynolds-Zahl, die für die Fluideigenschaften aus der entsprechenden Literatur oder durch Versuche ermittelt werden müssen.

Stimmt die Frequenz der Wirbelkraft zu etwa $\pm 25\%$ mit der Eigenfrequenz des Körpers in der Strömung überein, so können sich die beiden Frequenzen synchron überlagern und eine Resonanzschwingung mit

großer Amplitude erzeugen. Die Stärke der Übertragung dieser Schwingungen auf die Rohrleitung hängt von der Verbindung des Körpers mit dem Fluid und der Rohrwand ab.

In der Praxis wird die Stärke der Auswirkungen der Wirbelablösung durch Turbulenzen um den Körper, durch eine die gleichmäßige Fluidströmung beeinträchtigende Oberflächenrauheit, durch kegelförmige Gestaltung des Körpers oder durch Anstellen des Körpers in der Strömung reduziert. Auch durch Einbringen anderer Körper in die Strömung in der Nähe des ersten kann die Ausbildung starker Schwingungen unterbunden werden.

A.2.4.3 Pumpeninduzierte Pulsation des Fluids

Pumpen erzeugen in der Regel keinen völlig gleichmäßigen Förder- oder Saugdruck. Die Art der Druckschwankungen im Fluid hängt von den Merkmalen der Pumpe und den Betriebsbedingungen ab.

Der Konstrukteur sollte Rohrleitungen im Bereich von Pumpen möglichst so auslegen, dass die Energie der Druckimpulse abgebaut und scharfe Richtungsänderungen und Schwingungsübertragungen in der Rohrleitung vermieden werden. Ist das Frequenzspektrum der Fluidpulsation am Pumpenausstritt bekannt, so lässt sich die Reaktion der Rohrleitung auf diese Erregung im Modell nachbilden und nach einem der angegebenen dynamischen Analyseverfahren untersuchen. Bei diesen Berechnungen sollte der Konstrukteur sicherstellen, dass die Daten und mathematischen Modelle die tatsächlichen Bedingungen genau wiedergeben.

A.2.4.4 Strömungsverläufe

Eine äußere laminare stabile Strömung durch ein Rohr kann aufgrund einer Wirbelablösung Schwingungen verursachen, siehe A.2.4.2.

In Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl kann die interne Strömung in laminare und turbulente Strömung unterteilt werden. Eine laminare Strömung führt nicht zu Schwingungen, sondern Störungen, da Ventile und Rohrbiegungen Turbulenzen verursachen können, siehe auch A.2.4.2.

Eine turbulente Strömung überträgt durch das Schlagen gegen die Wand Energie auf die Rohrwand. Je höher die Reynolds-Zahl ist, desto höher ist die Energie. Die Erregungswirkung einer turbulenten Strömung ist höher bei Rohrleitungsschwingungen mit niedriger Frequenz.

Neben den diskutierten Strömungsarten für einphasige Strömung gibt es eine Reihe von Strömungsarten für gemischte Fluide, z. B. eine zweiphasige Strömung wie Flüssigkeit und Gas oder ungemischte Flüssigkeiten mit verschiedenen Eigenschaften. Die Strömungsverläufe hängen bei einer zweiphasigen Strömung z. B. von der relativen Geschwindigkeit zwischen den Fluiden und der Ausrichtung des Rohrs wie z. B. horizontal oder vertikal ab. Siehe einschlägige Literatur.

Viele der Daten, die erforderlich sind, um die Rohrbewegung vorherzusagen, werden aus experimentellen Arbeiten abgeleitet und beziehen sich auf bestimmte Bedingungen und eine bestimmte Geometrie. Wenn verlässliche Tragwerksdaten zur Verfügung stehen und Rohrleitungsmodelle erstellt werden, kann eine Berechnung der Eigenschwingungsformen und Spannungen angewendet werden, um dynamische Eigenschaften aufzuzeigen, die eine Anleitung hinsichtlich der Empfindlichkeit gegenüber Ermüdung geben, siehe nächster Unterabschnitt.

Wenn keine verlässlichen und geeigneten Daten und mathematischen Modelle verfügbar sind, sollte der Konstrukteur die allgemeinen Mechanismen und Probleme berücksichtigen, die sich durch die signifikanteren Quellen strömungsbezogener Schwingungen bei der Konstruktion der Rohrleitung stellen, und sollte darauf vorbereitet sein, Änderungen vorzunehmen, wenn im Betrieb Probleme festgestellt werden.

A.2.5 Öffnen von Sicherheitsventilen

A.2.5.1 Allgemeines

Die Druckentlastung beim Öffnen eines Sicherheitsventils bewirkt eine Reaktionslast an der angeschlossenen Rohrleitung. Das anfängliche schlagartige Öffnen des Ventils erzeugt eine unter Umständen beträchtliche dynamische Kraftkomponente.

Dieser Effekt sollte als örtlich begrenztes Ereignis betrachtet werden, das an dem Stutzen, der das Ventil mit der Rohrleitung verbindet, eine Punktlast erzeugt, und er sollte bei der Auslegung von Rohrleitung und Rohrhalterung berücksichtigt werden. Enthält ein Hauptrohr mehrere Ventile, so sollte der Konstrukteur auch die Reaktionswirkungen der Kombination mehrerer Ventilöffnungsvorgänge berücksichtigen.

Es ist zwar möglich, die Charakteristik des Öffnungsvorgangs in ein mathematisches Modell von Ventil und Ablassrohr zur Ermittlung der Reaktionskraft aufzunehmen, im Allgemeinen genügt aber bei Ventilen, die in die Atmosphäre öffnen, eine einfache statische Analyse für den stationären Zustand, in der die dynamische Belastung durch einen entsprechenden Faktor berücksichtigt wird.

A.2.5.2 Einfache statische Analyse

Die ständig wirkende Reaktionskraft F_r beim Ablassvorgang in ein Ablassrohr oder in die Atmosphäre lässt sich wie folgt berechnen:

$$F_r = R v_e + (p_e - p_a) A \quad (\text{A.2.4-1})$$

Dabei ist

- p_e der berechnete Druck am Austrittspunkt;
- p_a der atmosphärische Druck;
- A die Querschnittsfläche der Austrittsöffnung;
- R der Durchsatz der abgelassenen Fluidmasse;
- v_e die berechnete Austrittsgeschwindigkeit.

Die anfängliche dynamische Kraft F_{dr} sollte wie folgt berechnet werden:

$$F_{dr} = F_r DLF \quad (\text{A.2.4-2})$$

Dabei ist

DLF der dynamische Lastfaktor.

Der dynamische Lastfaktor DLF sollte auf die Öffnungszeit des Ventils bezogen werden; zu seiner Ermittlung wird zunächst eine Sicherheitsventilperiode T wie folgt berechnet:

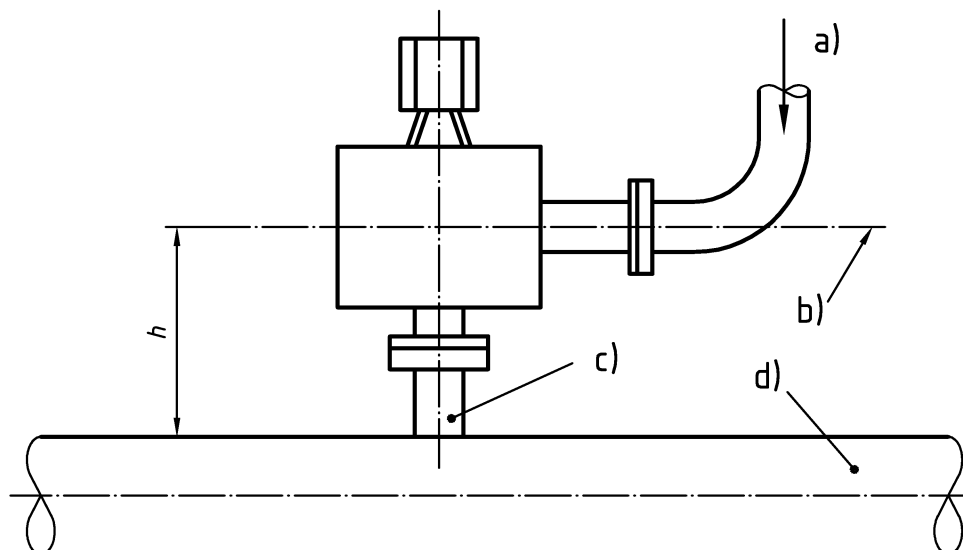
$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{W h^3}{E I}} \quad (\text{A.2.4-3})$$

Dabei ist

- h der Abstand in mm zwischen der Oberfläche des Hauptrohrs und der Mittellinie des Ventilaustrittsrohrs, siehe Bild A.2.4-1;
- I das Flächenträgheitsmoment der Querschnittsfläche des Ventileintrittsrohrs;
- W die Masse von Sicherheitsventil, Flanschen usw.

Aus dem Verhältnis von Sicherheitsventil-Öffnungszeit (von ganz geschlossen bis ganz geöffnet) und berechneter Sicherheitsventilperiode sollte in Verbindung mit Bild A.2.4-2 der dynamische Lastfaktor ermittelt werden.

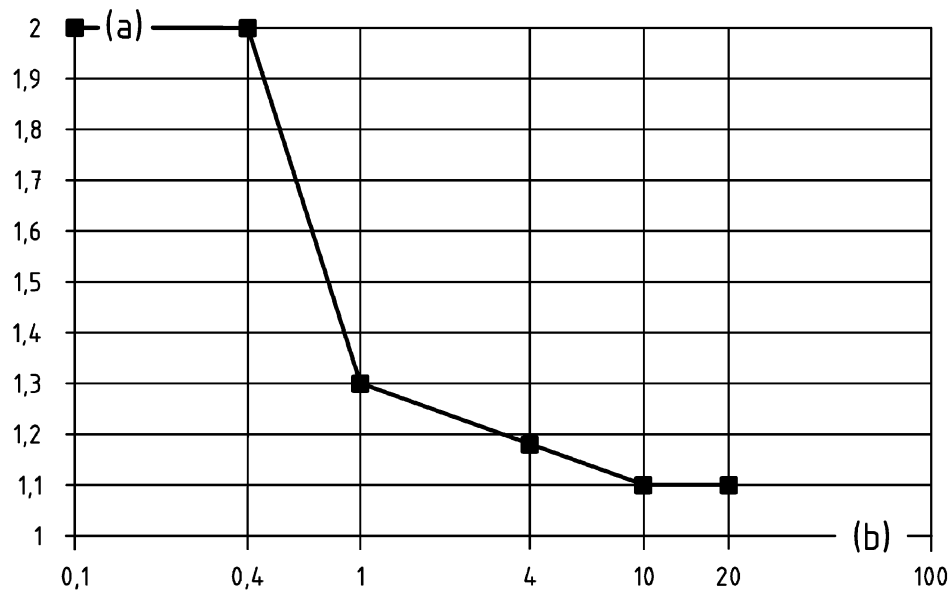
Andere Werte für den dynamischen Lastfaktor können verwendet werden, wenn sie durch experimentelle Daten ausreichend gestützt sind.



Legende

- a) Reaktionslast
- b) Mittellinie des Ventilaustrittsrohrs
- c) Ventileintrittsstutzen
- d) Hauptrohr

Bild A.2.4-1 — Typische Anordnung eines Sicherheitsventils



Legende

- (a) dynamischer Lastfaktor
- (b) Verhältnis Ventilöffnungszeit/Ventilperiode

Bild A.2.4-2 — Dynamischer Lastfaktor

A.2.6 Zulässige Spannungen

A.2.6.1 Während dynamischer Ereignisse auftretende Druckspitzen sollten durch die in den Abschnitten 6 bis 10 angegebenen druckrelevanten Auslegungsanforderungen abgedeckt sein.

A.2.6.2 Bei Anwendung der einfachen und quasistatischen Analyseverfahren sollten die in 12.3 angegebenen Grenzwerte für Primär- und Sekundärspannungen verwendet werden.

A.2.6.3 Für die eingehende dynamische Analyse sollten die Primärspannungen auf den Wert der Mindeststreckgrenze des Werkstoffs bei Betriebstemperatur und die Summe aus Primär- und Sekundärspannung auf das Doppelte dieses Wertes begrenzt werden.

A.2.7 Strukturbedingte Schwingungseigenschaften

A.2.7.1 Allgemeines

Eine interessierende dynamische Eigenschaft zur Beurteilung von Schwingungen von Rohrleitungssystemen ist die sogenannte dynamische Suszeptibilität oder kürzer DS. Der Wert wird für jede Eigenschwingungsform des untersuchten Rohrleitungsmodells berechnet als $DS = \text{maximale Wechselbiegebeanspruchung} / \text{maximale Schwingungsgeschwindigkeit}$.

Der Begriff „dynamische Suszeptibilität“ wurde zuerst von Dr. Ron T. Hartlen, PED, Ontario, Kanada, und in einem technischen Artikel von SST Systems Inc., 1994 beschrieben.

Um eine dimensionslose und normalisierte Eigenschaft zu erreichen, kann der Faktor DS mit einer Konstante multipliziert werden, die auf den Maßen der Rohrleitung basiert, siehe den nachfolgenden Unterabschnitt zum „modalen Schwingungsfaktor“, wie in einem Bericht von ÅFORSK R&D, Schweden, 2017 hergeleitet.

A.2.7.2 Anwendung von DS oder MVF

Der DS-Wert erweist sich als nützlich für die Beurteilung der dynamischen Qualität von Rohrleitungssystemen hinsichtlich des Ermüdungsrisikos. Jedoch sagt er nicht vorher, ob Schwingungen auftreten. Es ist praktisch, wenn das Rohrleitungsprogramm DS oder MVF berechnet.

Die Schwingungsgeschwindigkeit ist der relevanteste Parameter für die Beurteilung der Schwingungen von Rohrleitungen, zumindest im Frequenzbereich von 10 Hz bis 1 000 Hz. Für niedrigere Frequenzen wird mitunter die Verschiebung genutzt.

Eine Schwingungsart mit einem hohen DS oder MVF weist auf eine komplexe Rohrleitung mit schwachen Rohrabschnitten oder Rohren, konzentrierten und ungestützten Massen, geraden Rohren, die axial verschiebbar sind, usw. hin.

Bis dokumentierte Erfahrungen verfügbar sind, gibt es keine direkten Empfehlungen für die Anwendung des DS. Grundsätzlich ergibt eine gemessene Schwingungsgeschwindigkeit für eine eindeutige Eigenschwingungsform und Eigenfrequenz multipliziert mit dem entsprechenden DS-Wert eine Spannungsamplitude, die mit der Spannung und den Zyklen in einem Ermüdungsdiagramm für den entsprechenden Werkstoff verglichen werden kann.

Eine mögliche Verwendung des DS- oder MVF-Wertes ist:

- Konstruktionsphase: Feststellen und Beheben möglicher Schwingungsformen mit höherem Risiko auf der Grundlage einer Analyse, vorzugsweise kombiniert mit Kenntnissen über Schwingungsquellen und die Stellen, an denen diese die Rohrleitung beeinträchtigen;
- Inbetriebnahme und Betrieb: Identifizierung der Bereiche innerhalb eines Rohrleitungssystems mit kombiniertem hohem Risiko auf der Grundlage einer Analyse und von Schwingungsquellen, um Stellen zu behandeln, die für Inspektionen von besonderem Interesse sind;
- Messung: Erlangung von Informationen darüber, wo Messungen durchzuführen sind, welche Frequenzen ein höheres Risiko ergeben und Ermöglichung einer Skalierung gemessener Werte von einer Messgerätposition auf eine bevorzugte Position;
- Festlegen von (Geschwindigkeits)-Untersuchungspegeln.

A.2.7.3 Dynamische Suszeptibilität

Die Herleitung basiert auf der Energieerhaltung für ein Tragwerk in harmonischer Schwingung, bei der die Energie zwischen ausschließlich kinetischer Energie, bei maximaler Geschwindigkeit, und ausschließlich Dehnungsenergie am Umkehrpunkt, mit maximaler Verschiebung schwankt. Es kann nachgewiesen werden, dass die höchste Spannung proportional zur Höchstgeschwindigkeit ist (siehe ANSI/ASME OM3 Code, 1982). Es ist zu beachten, dass die Stelle der höchsten Spannung innerhalb der Rohrleitung sehr häufig nicht mit der Stelle der höchsten Geschwindigkeit übereinstimmt.

DS wurde in psi/ips (Pfund je Quadratinch/Inch je Sekunde) angegeben, kann aber durch Multiplikation mit $0,2714 \cdot 10^6$ leicht in $\text{Pa/m}\cdot\text{s}^{-1}$ angegeben werden.

Die Spannung aus dem Rohrleitungsprogramm sollte Spannungserhöhungsfaktoren (SIF) enthalten.

A.2.7.4 Modaler Schwingungsfaktor

Bei der Untersuchung der Theorie für DS wurde festgestellt, dass DS für alle Eigenschwingungsformen bei einem beliebigen beidseitig drehbar gelagerten Träger (oder Rohr) konstant ist, und die Konstante (die je Rohrabmessung konstant ist) wurde als FDS bezeichnet:

$$DS \text{ (für den elementaren Fall)} = FDS = \frac{\sqrt{EI}m}{Z} \quad (\text{A.2.6-1})$$

Dabei ist

- E der Elastizitätsmodul, Pa;
- I das Flächenträgheitsmoment, m⁴;
- m die Masse je Länge des Trägers, kg/m;
- Z das Widerstandsmoment, m³.

Der Faktor FDS legt eine proportionale Korrelation zwischen der größten modalen Spannung und der modalen Geschwindigkeit fest. Wiederum ist zu beachten, dass die Einheit des proportionalen Faktors FDS eine „Spannung je Geschwindigkeit“ ist.

Um eine Basislinie für die dynamische Suszeptibilität festzulegen und die Einheiten zu normieren, wird der modale Schwingungsfaktor MVF als DS/FDS festgelegt.

$$\text{Modaler Schwingungsfaktor MVF} = \frac{DS}{FDS} \quad (\text{A.2.6-2})$$

FDS ist in einem etwas (geringeren) Umfang davon abhängig, welche Rohrabmessung ihm zugrunde liegt, wobei empfohlen wird, das größte gewöhnliche Rohr im Modell zu verwenden. Eine Überprüfung der folgenden drei Normal- oder Hochdruckrohre (Außendurchmesser × Wanddicke, mm):

- 114,3 × 6;
- 323,9 × 17,5; und
- 609,6 × 31

führte bei allen jeweils zu einem FDS von etwa 58,9 MPa/(m/s).

Bei der Verwendung des MVF ist der berechnete MVF-Wert etwa gleich 1, wenn das Rohrleitungssystem mit dem Elementarfall vergleichbar ist, oder (wahrscheinlich) höher, wenn Spannungserhöhungsfaktoren (SIF) berücksichtigt werden und wenn reale Rohrleitungssysteme mit verschiedenen Maßen, konzentrierten Massen usw. berechnet werden.

A.2.7.5 Fehlerabschätzung

Allgemeine Erfahrungen zeigen, dass es zwischen der Analyse von Eigenfrequenzen und den gemessenen Eigenfrequenzen Widersprüche gibt. Es gibt außerdem auch eine Vielzahl von Fehlerquellen sowohl hinsichtlich des Modells und der Analyse als auch hinsichtlich der Messungen und des Umgangs mit Daten.

Leitlinien sowohl zur dynamischen Analyse als auch zur Messung sollten dazu beitragen, dass die Abweichung zwischen dem theoretischen Modell und der gemessenen „Realität“ geringer wird. Bis derartige Leitlinien zur Verfügung stehen, sollte mit Bedacht vorgegangen werden.

Jedoch ist für die Berechnung der Werte des DS und MVF eine Elementlänge von nicht viel mehr als zwei Rohrleitungsdurchmessern erforderlich.

A.3 Alternative Nachweisverfahren

A.3.1 Vergleichende Untersuchungen

Der Nachweis für die Auslegung eines Rohrleitungssystems darf durch Vergleich mit einem bereits bestehenden Rohrleitungssystem geführt werden, für das durch Berechnung, Prüfung oder Betriebsnachweis gezeigt wurde, dass es den vorgeschlagenen Auslegungsbedingungen standhalten kann. Wird dieser Ansatz gewählt, so sollte jedoch sorgsam darauf geachtet werden sicherzustellen, dass die verglichenen Rohrleitungssysteme in allen wesentlichen Merkmalen übereinstimmen. Besondere Aufmerksamkeit sollte der Konstrukteur der Form der Rohrleitungen, den Eingangserregungen, den mechanischen Verbindungen sowie Druck, Temperatur und Strömungsverhältnissen widmen.

A.3.2 Prüfung am vollmaßstäblichen Modell

Der Nachweis der Auslegung kann auch durch eine Prüfung des vollmaßstäblichen Modells geführt werden. Dies mag zwar bei großen Rohrleitungssystemen nicht zweckmäßig sein, eine Prüfung nach dem Einbau oder unter Laborbedingungen kann jedoch für Auslegungen in Betracht gezogen werden, die für eine Serienfertigung vorgesehen sind.

Der Konstrukteur sollte sicherstellen, dass die Prüfbedingungen mit den vorgesehenen Auslegungsbedingungen übereinstimmen. Werden künstlich Schwingungen des Systems hervorgerufen, so sollten sie alle wesentlichen Frequenzen und Amplituden enthalten.

Werden Prüfungen nur an Bauteilen oder Abschnitten des Rohrleitungssystems vorgenommen, so sollte der Konstrukteur sicherstellen, dass die Gültigkeit der Prüfergebnisse nicht aufgrund von unterschiedlichen Endbedingungen in der Prüfung und im Einbauzustand beeinträchtigt wird.

A.3.3 Prüfung am maßstäblich verkleinerten Modell

Die Prüfung am maßstäblich verkleinerten Modell darf dazu dienen, die Verhaltensmerkmale eines Systems zu ermitteln oder die Richtigkeit der für die Auslegungsberechnungen verwendeten mathematischen Modelle nachzuweisen.

Der Modellmaßstab sollte nicht kleiner als 1 : 10 sein, und die Regeln zum Nachweis der Ähnlichkeit sollten genau festgelegt sein. Die Merkmale der überlagerten Schwingungen sollten so angemessen gewählt werden, dass die Gültigkeit der ermittelten Daten zum Reaktionsverhalten der Rohrleitung sichergestellt ist.

A.4 Validierung (Messung)

Bei der Inbetriebnahme einer neuen Rohrleitung oder bei einer größeren Ausführung eines neuen Bauteils, sollten eine Überprüfung und Besichtigung stattfinden. Eine Schwingungvalidierungsmessung sollte durchgeführt werden, um spezielle Anforderungen und weitere Schwingungsbeobachtungen zu validieren, deren Beurteilung ergeben hat, dass sie ein Risiko eines Schwingungsbruchs darstellen.

In der Projekt- oder Konstruktionsphase sollte das Risiko eines Problems mit Schwingungen zusammen mit geeigneten/repräsentativen Stellen in der Rohrleitung für die Schwingungvalidierungsmessung festgelegt werden.

Annehmbare Schwingungsprüfpegel der Rohrleitung werden zusammen mit dem Frequenzbereich bis zu einem gewissen Grad in Leitlinien und Normen behandelt.

Wenn es bei oder nach der Inbetriebnahme zu einem Schwingungsproblem kommt, sind Verfahren zur Problembehandlung hinsichtlich Schwingungen wie z. B. eine experimentelle Modalanalyse oder eine Betriebsschwingungsanalyse in der Betriebsumgebung der Rohrleitung hilfreiche Messwerkzeuge zur Charakterisierung der Schwingungsamplituden und dynamischen Bewegungen des Rohrleitungssystems.

Darüber hinaus könnten dynamische Druck- (oder Pulsations)-Messungen in der Rohrleitung die Diagnose ergänzen, indem die Schwingungsquelle, d. h. die Pulsationsamplituden, Frequenzen und die akustische Erregung, quantifiziert wird.

Für die Verifizierung zur Vermeidung von Ermüdung aufgrund von gemessenen Schwingungen kann eine dynamische Simulation nach der Finite-Elemente-Methode genutzt werden, die auf die vorhergehende Schwingungsdiagnose abgestimmt wurde, um den Spannungsbereich zu berechnen, der mit den Ermüdungsdiagrammen verglichen wird.“

4 Änderung zu Abschnitt G.3, „Physikalische Eigenschaften von Stählen“

Der erste Satz von G.3 muss wie folgt lauten:

„Die physikalischen Eigenschaften können unter Verwendung von Gleichung (G.3-1) polynomisch berechnet oder aus den Bildern G.3-1 bis G.4-1 abgelesen werden.“

5 Einführung eines neuen Abschnitts G.4, „Werkstoffeigenschaften von Kohlenstoffstahl bei hohen Temperaturen“

Der neue Abschnitt G.4 muss wie folgt lauten:

„G.4 Werkstoffeigenschaften von Kohlenstoffstahl (Baustahl) bei hohen Temperaturen

Für Rohrhalterungsbauteile aus Kohlenstoffstahl (Baustahl) nach EN 10025 (S235, S275, S355) darf die Streckgrenze nach Gleichung (G.4-1) und Gleichung (G.3-1) polynomisch berechnet oder aus Bild G.4-1 abgelesen werden. Die Temperatur t sollte 350 °C nicht überschreiten.

$$R_{eHt} = Z_{ReH} R_{eH} \quad (G.4-1)$$

Dabei ist

Z_{ReH}	der Temperaturabminderungsfaktor (siehe Bild G.4-1)	–
R_{eH}	der Wert der oberen Streckgrenze bei Raumtemperatur	MPa (N/mm ²)
R_{eHt}	der Wert der oberen Streckgrenze bei der Temperatur t	MPa (N/mm ²)
t	die Berechnungstemperatur	°C

Für $t \leq 100$ °C: $Z_{ReH} = 1,0$

Für 100 °C $< t \leq 350$ °C:

Tabelle G.4-1 — Polynomkoeffizienten für die Streckgrenze Z_{eH}

Stahl	Koeffizienten für Polynome	
	c_0	c_1
S235, S275, S355	1,193 47	–1,934 7E-3

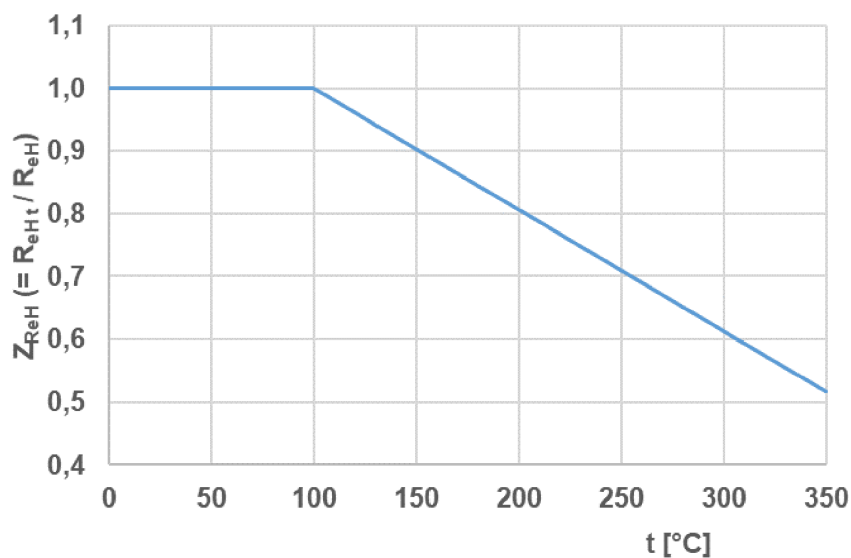


Bild G.4-1 — Temperaturabminderungsfaktor Z_{ReH} zur Bestimmung der Streckgrenze in Abhängigkeit von der Temperatur t

Für die Zugfestigkeit im Temperaturbereich $t \leq 350$ °C wird kein Temperaturabminderungsfaktor benötigt.“

6 Einführung eines neuen Anhangs R, „Überwachung von Bauteilen, die im Zeitstandbereich betrieben werden“

Der neue Anhang R muss wie folgt lauten: „

Anhang R (informativ)

Überwachung von Bauteilen, die im Zeitstandbereich betrieben werden

R.1 Allgemeines

Die Konstruktion von Bauteilen unter Innendruck, die im Zeitstandbereich betrieben werden, kann mit einem Sicherheitsbeiwert von mindestens $Sf_{cr} = 1,25$ unter Verwendung der Mittelwerte der Zeitstandfestigkeit für die festgelegte Lebensdauer durchgeführt werden. Das bedeutet, dass die Sicherheit gegenüber dem Mindestwert der Zeitstandfestigkeit bei der Berechnungstemperatur und der festgelegten Lebensdauer gleich 1,0 ist. In diesen Fällen ist eine Überwachung der Bauteile erforderlich.

ANMERKUNG Die untere Grenze des Streubereiches für die Zeitstandfestigkeit entspricht dem 0,8fachen des Mittelwerts. Umgekehrt ergibt der Mittelwert dividiert durch 1,25 den Wert der unteren Grenze des Streubereiches.

R.2 Aufzeichnung von Betriebsdaten

Betriebstemperatur, Betriebsdruck und insbesondere die Häufigkeit und Größe von Lastschwankungen unterscheiden sich von den Annahmen, die für die Auslegung getroffen wurden. Bei üblichen Betriebsbedingungen sind Temperatur und Druck gewöhnlich niedriger als die Temperatur und der Druck, auf denen die Auslegung basiert. Üblicherweise führt dies zu einer Verlängerung der Bauteillebensdauer, was durch Maßnahmen zur Überwachung der Bauteile verifiziert werden sollte. Dies darf als Entscheidungshilfe verwendet werden, ein Bauteil im Hinblick auf Ermüdungsrisse oder Kriechporen durch das Abdruck- oder ein anderes geeignetes Verfahren zu prüfen [32]. Eine genaue Aufzeichnung von Betriebsdaten (p , T , t) [23] verbessert die Genauigkeit der Berechnung der theoretischen Betriebslebensdauer und unterstützt die Optimierung der Prüfintervalle von erforderlichen zerstörungsfreien Prüfungen.

Die gemessene (tatsächliche) Wanddicke der Bauteile sollte bei den Berechnungen verwendet werden, d. h. dass jegliche Waddickenverringerung berücksichtigt wird, die möglicherweise aufgrund von Korrosion oder Erosion während der Betriebslebensdauer bis zum Zeitpunkt der Analyse aufgetreten ist.

Für Überwachungszwecke sollten die Bauteile mit der höchsten Beanspruchung gewählt werden.

R.3 Berechnung der Zeitstanderschöpfung oder der theoretischen Restlebensdauer

Die Berechnung der Zeitstanderschöpfung ist ein Verfahren, das rückblickend die früheren Betriebszustände berücksichtigt. Sie wird für hochbeanspruchte Bauteile auf der Basis der gemessenen Betriebstemperaturen und Betriebsüberdrücke durchgeführt.

Die theoretische Lebensdauer T_{al} sollte für jede Temperatur-/Druck-Klasse berechnet werden. Nach Bild R.1 wird T_{al} am Schnittpunkt der Spannungsgeraden f_{op} (Membranspannung) mit der unteren Grenzkurve der Streubandbreite der Zeitstandfestigkeit ($= 0,8 S_{RTt}$) bei der entsprechenden Betriebstemperatur t_o bestimmt.

Auf der Grundlage der aufgezeichneten Betriebsdaten (direkt oder klassifiziert) werden die Zeitstanderschöpfung nach Gleichung (R.3-1), Gleichung (R.3-2) und Gleichung (R.3-3) und die theoretische Restlebensdauer berechnet. \check{S}_{RT_1t} und \check{S}_{RT_2t} sind die Mindestwerte der Zeitstandfestigkeit (0,8 mal die Mittelwerte) bezüglich der entsprechenden Zeiten T_1 und T_2 (Bild R.1).

$$D_c = \sum_i \sum_k \Delta D_{ci\ k} \quad (\text{R.3-3})$$

T_{op}	die Betriebszeit bei Betriebsbedingungen in h ;
T_{al}	die Zeit bis zum theoretischen Kriechbruch in h ;
D_{c}	die Zeitstanderschöpfung;
$\Delta D_{\text{ci k}}$	der Nutzungsanteil der Zeitstanderschöpfung.

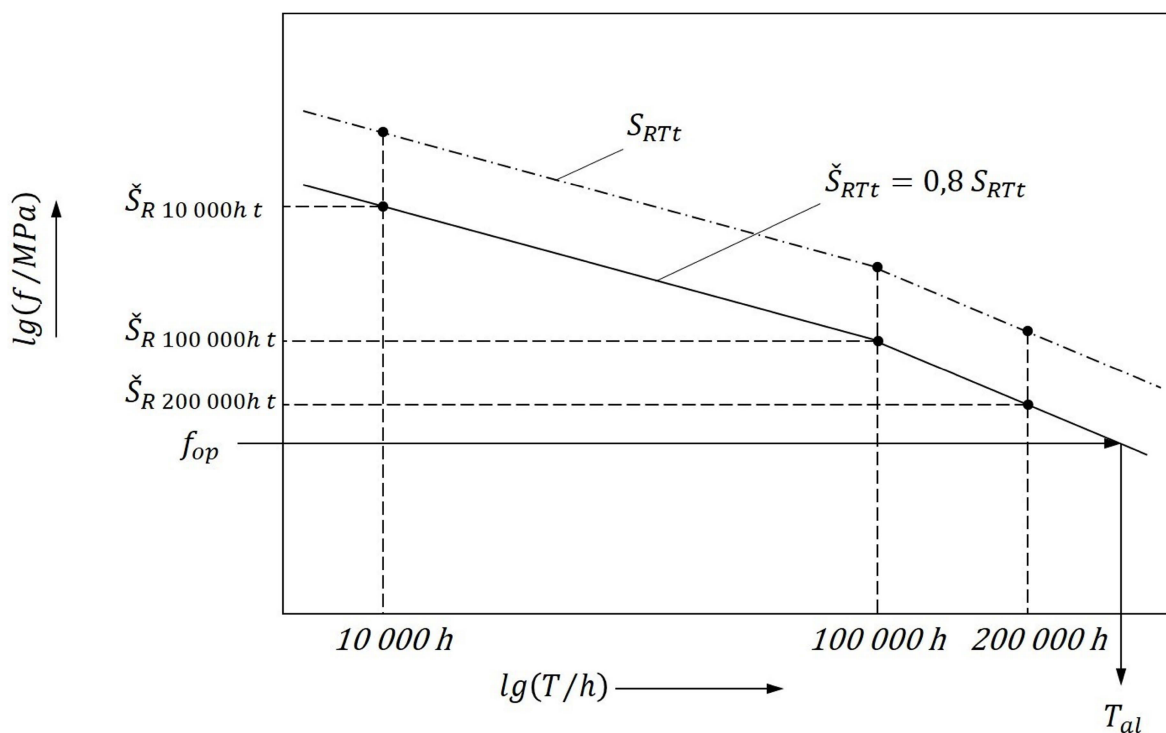


Bild R.1 — Diagramm für die Bestimmung von T_{al}

Um die Zeitstanddehnung zu verfolgen, können mehrere Verfahren in Betracht gezogen werden. Zylinder- oder kugelförmige Bauteile dehnen sich unter Innendruck infolge Kriechens zunehmend aus. Die Kriechgeschwindigkeit kann bei Revisionen der Anlage durch Messung des Durchmessers oder des Umfangs entfernt von etwaigen Störstellen bestimmt werden. Die Zeitstanddehnung kann aus dem gemessenen Anstieg des Außendurchmessers des zylindrischen oder kugelförmigen Teils abgeleitet werden. Online-Messungen der Dehnung bei Betrieb sind ebenfalls möglich, jedoch sehr teuer.

R.5 Überprüfung und Reparatur von Rissen

Zeitstandrisse der Bewertungsklasse 4 und Bewertungsklasse 5 nach [24] dürfen ausgeschliffen werden, wenn dadurch die Mindestwanddicke aufrechterhalten wird. Nach der Feststellung nicht reparierbarer Risse sollte das Bauteil ausgetauscht werden.

R.6 Kriechen und Ermüdung

Wenn ein Bauteil Zeitstanddehnung und Ermüdung ausgesetzt ist, sollten beide Wirkungen beurteilt werden. Es wird als konservativ angesehen, die Zeitstanderschöpfung und die Ermüdungerschöpfung zu addieren, da in fast allen Fällen nicht beide an der gleichen Stelle eines Bauteiles auftreten.

$$D_{\text{Total}} = D_c + D_F \quad (\text{R.6-1})$$

Falls erforderlich, dürfen genauere Verfahren angewendet werden, siehe BS 7910 [25]. Da die beiden Arten der Erschöpfung üblicherweise an verschiedenen Stellen des Bauteils auftreten, sollte das Bauteil nicht unbedingt ausgetauscht werden, wenn die berechnete Gesamterschöpfung den Wert 1,0 überschreitet. In diesem Fall sollten geeignete zusätzliche Maßnahmen im Rahmen einer zerstörungsfreien Prüfung durchgeführt werden [23].

Ermüdung ist ein Phänomen von Werkstoffversagen, das infolge wiederholter Spannungsschwankungen auftritt. Ein mögliches Verfahren zur Berechnung der Ermüdungerschöpfung D_F ist in EN 12952-4 [23] unter Berücksichtigung von EN 12952-3 [26] beschrieben.

R.7 Maßnahmen bei Erreichen bestimmter Erschöpfungsgrade

Wenn eine Gesamterschöpfung von $D_{\text{Total}} = 60 \%$ oder $D_F = 50 \%$ erreicht wird, sollten zusätzliche geeignete Maßnahmen im Rahmen einer zerstörungsfreien Prüfung durchgeführt werden. Ein anerkanntes Verfahren ist die Beurteilung des Mikrogefüges auf der Grundlage der „VGB-Diagramme zur Beurteilung des Mikrogefüges und der Zeitstanderschöpfung“ [24].

Wenn $D_{\text{Total}} = 100 \%$ oder $\varepsilon_{\text{cr}} = 1 \%$ ohne Werkstoffschädigung erreicht wird, sollte der Umfang der zerstörungsfreien Prüfung vergrößert und/oder die Prüfperioden sollten verkürzt werden.

Spätestens wenn $\varepsilon_{\text{cr}} = 2 \%$ erreicht wird, sollte das Bauteil spätestens ausgetauscht werden.“

7 Änderung zu den Literaturhinweisen

Die folgenden Verweisungen werden zu den Literaturhinweisen hinzugefügt:

- [23] EN 12952-4, *Wasserrohrkessel und Anlagenkomponenten — Teil 4: Betriebsbegleitende Berechnung der Lebensdauererwartung*
- [24] *Richtreihen zur Bewertung der Gefügeausbildung und Zeitstandschädigung warmfester Stähle für Hochdruckrohrleitungen und Kesselbauteile*, VGB – TW 507e, 2. Ausgabe 2005
- [25] BS 7910, *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*, British Standardization Institute, London, UK
- [26] EN 12952-3, *Wasserrohrkessel und Anlagenkomponenten — Teil 3: Konstruktion und Berechnung für drucktragende Kesselteile*

- [27] EN 1998-1, *Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben — Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten*
- [28] NUREG Reg Guide 1.6 rev 1 2007 and NUREG CR-6919, *Recommendations for Revision of Seismic Damping Values in Regulatory Guide 1.61 — U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research*
- [29] SST SYSTEMS. INC. Technical Articles “*Dynamic Susceptibility*” *Method for Piping Vibration*
<http://www.sstusa.com/pipe-stress-article-dynamic-susceptibility.php>
- [30] Report on ÅFORSK agreement 16-579 — Vibration damage in piping systems and their prevention using velocity based criteria — Part 2 — Report ID: 6088305-001 REV. 02
<https://aforsk.com/en/ResearchReports>
- [31] ANSI/ASME OM3 Code, 1982 Edition, September 30, 1982 — *REQUIREMENTS FOR PREOPERATIONAL & INITIAL START UP* (Note: superseded by ASME OM 2017 Edition, May 31, 2017 — *Operation and Maintenance of Nuclear Power Plants*)
- [32] VGB Standard, *Inhalte wiederkehrender Prüfungen an Rohrleitungen und deren Komponenten in Wärmekraftwerken*, VGB-S-509-00-2019-11-DE