

DIN EN 13480-3/A3

ICS 23.040.01

Entwurf

Einsprüche bis 2019-04-22
Vorgesehen als Änderung von
DIN EN 13480-3:2017-12

**Metallische industrielle Rohrleitungen –
Teil 3: Konstruktion und Berechnung;
Deutsche und Englische Fassung EN 13480-3:2017/prA3:2019**

Metallic industrial piping –
Part 3: Design and calculation;
German and English version EN 13480-3:2017/prA3:2019

Tuyauteries industrielles métalliques –
Partie 3: Conception et calcul;
Version allemande et anglaise EN 13480-3:2017/prA3:2019

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2019-02-22 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nard@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Rohrleitungen und Dampfkesselanlagen (NARD), 10772 Berlin, Saatwinkler Damm 42/43, 13627 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 66 Seiten

DIN-Normenausschuss Rohrleitungen und Dampfkesselanlagen (NARD)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 13480-3:2017/prA3:2019) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 267 „Industrielle Rohrleitungen und Fernrohrleitungen“ erarbeitet, dessen Sekretariat von AFNOR (Frankreich) gehalten wird.

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

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Metallische industrielle Rohrleitungen — Teil 3: Konstruktion und Berechnung

Tuyauteries industrielles métalliques — Partie 3 : Conception et calcul

Metallic industrial piping — Part 3: Design and calculation

ICS:

Deskriptoren

Dokument-Typ: Europäische Norm
Dokument-Untertyp: Änderung
Dokument-Stage: CEN-Umfrage
Dokument-Sprache: D

STD Version 2.9p

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	3
1 Änderung zu Abschnitt 2, <i>Normative Verweisungen</i>	4
2 Änderung zu 5.2.4, <i>Stahlguss</i>	4
3 Änderung zu 13.11.4, <i>Bestimmung der Bauteilabmessungen</i>	4
4 Änderung zu Anhang A, <i>Dynamische Analyse</i>	4
5 Änderung zu Unterabschnitt G.3, <i>Physikalische Eigenschaften von Stählen</i>	28
6 Einführung eines neuen Abschnitts G.4, <i>Werkstoffeigenschaften von Kohlenstoffstahl bei hohen Temperaturen</i>	28
7 Einführung eines neuen Anhangs R, <i>Überwachung von Bauteilen, die im Zeitstandbereich betrieben werden</i>	30
8 Änderung zu den Literaturhinweisen	33

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (EN 13480-3:2017/prA3:2019) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 267 „Industrielle Rohrleitungen und Fernrohrleitungen“ erarbeitet, dessen Sekretariat von AFNOR gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wurde im Rahmen eines Normungsauftrages erarbeitet, den die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelszone CEN erteilt haben, und unterstützt grundlegende Anforderungen der EU-Richtlinien.

Zum Zusammenhang mit EU-Richtlinien siehe informativen Anhang ZA, der Bestandteil dieses Dokuments ist.

Dieses Dokument enthält den Text der Änderung selbst. Die geänderten/korrigierten Seiten von EN 13480-3:2017 werden als Ausgabe 2 der Europäischen Norm veröffentlicht.

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 13.11.4, Bestimmung der Bauteilabmessungen

Der 3. Satz in 13.11.4.1 muss wie folgt lauten:

„Für eine weitere Anleitung, siehe Abschnitt G.4, Anhang I, Anhang J, Anhang K, Anhang L und Anhang M.“

4 Änderung zu Anhang A, Dynamische Analyse

Der vorhandene Anhang A wird durch Folgendes ersetzt:

„Anhang A (informativ)

Dynamische Wirkung

A.1 Allgemeines

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 bei der Auslegung der Rohrleitung berücksichtigt werden. Jedoch erfordert eine solche Berücksichtigung möglicherweise, sofern nichts anderes festgelegt ist, keine eingehende Analyse. 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 betrachtet werden.

Analyseverfahren werden in Abschnitt A.2 vorgeschlagen.

Jedoch kann es schwieriger sein, Schwingungen vorherzusagen, und Empfehlungen für Installationen werden auch in einer Konstruktionsleitlinie in A.1.1 bereitgestellt.

Eine Schwingungs-Risikobewertung darf basierend auf den kombinierten Kenntnissen über Schwingungsquellen und die dynamischen Eigenschaften des Rohrleitungssystems (A.2.6) 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.1.1 Konstruktionsleitlinie bezüglich Schwingungen

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, Ventilen und Blenden;
- die Verlegung von Rohrleitungen und ihren Halterungen.

A.1.1.1 Betrieb des Kreislaufs

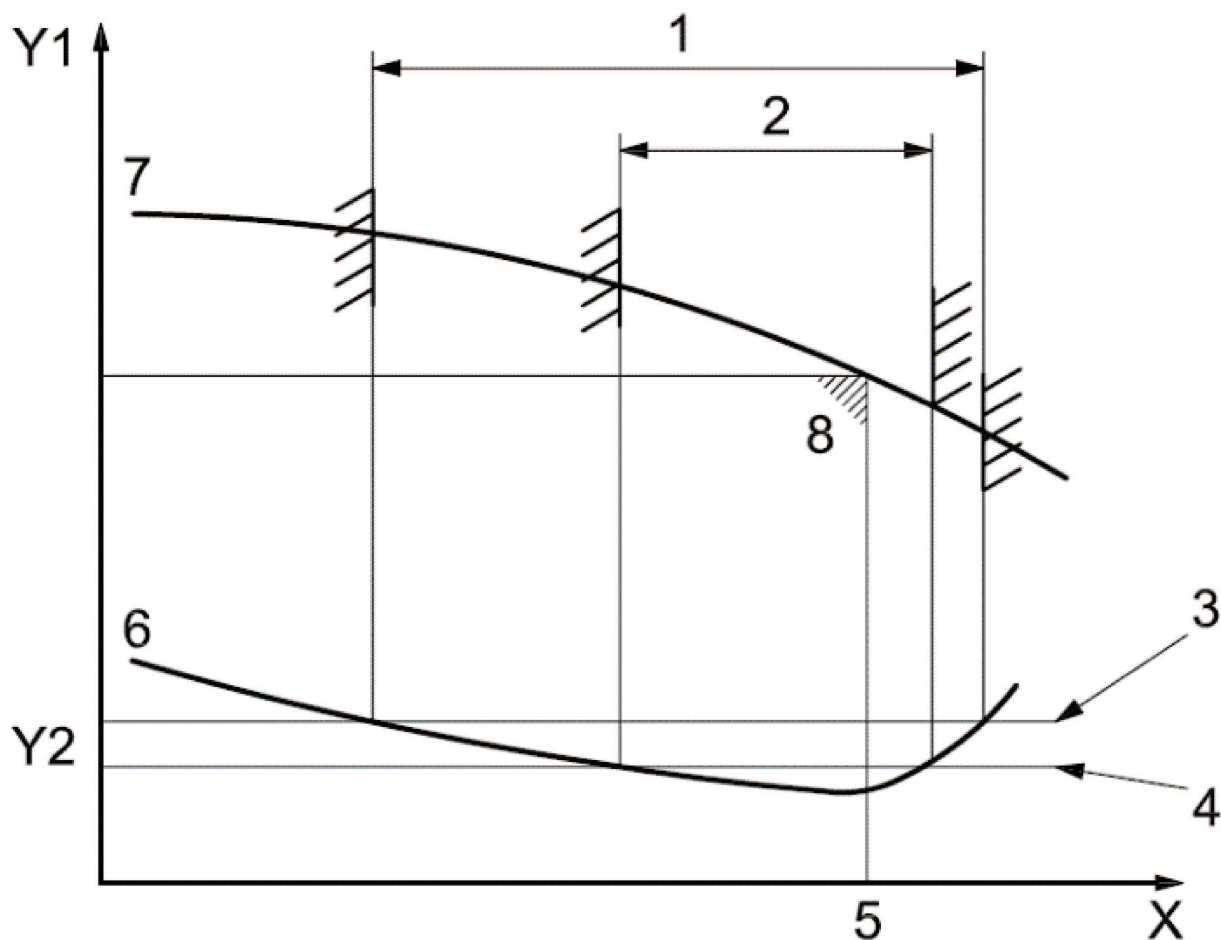
A.1.1.1.1 Funktionsanalyse

Um zu vermeiden, dass bei Verbindungen von kleinen Rohren mit großen Rohren oder Armaturen Risse auftreten, 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 wird empfohlen zu analysieren, ob die Ausrüstung und die Installation für jede Änderung des Betriebs angemessen sind.

A.1.1.1.2 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
- Y1 Förderhöhe
- Y2 Schwingung
- 1 zulässiger Betriebsbereich der Strömung
- 2 bevorzugter Betriebsbereich der Strömung
- 3 maximal zulässiger Schwingungsgrenzwert bei der Fließgrenze
- 4 grundlegende Schwingungsgrenze
- 5 Punkt mit dem besten Wirkungsgrad, Durchflussrate
- 6 typische Schwingungs-Durchflussraten-Kennlinie, die die höchstzulässige Schwingung zeigt
- 7 Förderhöhe-Durchflussraten-Kennlinie
- 8 Punkt mit dem besten Wirkungsgrad, Förderhöhe und Durchflussrate

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 eine Durchflussrate haben, so dass:

$$0,7 Q_n < Q < 1,1 Q_n \text{ ist.}$$

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

A.1.1.1.3 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.1.1.2) 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.1.1.1.1 berücksichtigt werden.

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

A.1.1.1.4 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.1.1.1.5 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.1.1.2 Ausrüstung

A.1.1.2.1 Pumpen und Verdichter

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

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

Kolbenpumpen und -verdichter 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/-verdichtern 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, weshalb empfohlen wird, die Verwendung überdimensionierter Pumpen, die zu einem unnützen Eintrag von hydraulischen Druckverlusten in den Rohrleitungskreislauf führen, möglichst zu vermeiden. Die Eigenschaften von Pumpen (Durchflussrate, Druck) sollten auf der Grundlage einer Funktionsanalyse des Systems spezifiziert werden.

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

A.1.1.2.2 Ventile

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

Kavitation sollte bei Steuerventilen, insbesondere bei Klappen, unterbunden werden.

Mit Ausnahme von Steuerventilen gibt es bei anderen Ventilen keine Anzeichen dafür, dass Kavitation zu hohen Schwingungspegeln führt. Es ist 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.1.1.2.3 Blenden

Die 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 Größenskale 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. Hierfür wird empfohlen, Blenden mit mehreren Bohrungen anzuwenden, wobei die Anzahl der Bohrungen mit einem Minstdurchmesser 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 bezweifelt 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 mindestens 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.1.1.3 Anordnung

A.1.1.3.1 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, die Steifigkeit der gemeinsamen Halterung.

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, stromaufwärts gerade Längen und stromabwärts Druckabfallvorrichtungen einzuhalten.

Um einen Mindestabstand zwischen der isolierten hydraulischen Druckverlust-Komponente und der ersten Rohrbiegung oder der ersten Änderung der Richtung stromabwärts aufrechtzuerhalten, ist ein empfohlener Abstand von 7 NPS (Nenndurchmesser und mindestens 5 NPS) günstig, um das Problem der Schwingungen zu begrenzen.

A.2 Analyse durch Berechnung

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 Anwendung vereinfachter Verfahren im Allgemeinen zu annehmbaren technischen Lösungen zur Schadensverhütung bei dynamischen Ereignissen führt. Ist die Durchführung einer komplexen Analyse erforderlich, so sollte die Auswahl geeigneter Programme und einheitlicher Daten für die Ableitung von Kräften und zulässigen Lasten mit Bedacht erfolgen.

Rohrleitungen und Rohrleitungsbauteile dürfen auch verifiziert werden, indem vollmaßstäbliche oder maßstäblich verkleinerte Modelle Schwingungszuständen ausgesetzt werden, die mit den erwarteten dynamischen Beanspruchungen vergleichbar sind.

A.2.1 Seismische Ereignisse

A.2.1.1 Allgemeines

Seismische Ereignisse erzeugen Schwingungsbewegungen im Boden, die durch das Tragwerk des Bauwerks 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 des Bauwerks-Tragwerks mit den seismischen Antriebskräften ist nicht Bestandteil der Auslegung von Rohrleitungen und entsprechende Angaben zu der damit zusammenhängenden Reaktion werden üblicherweise vom Käufer oder Anlagenbetreiber nach einer Bewertung der Erdbebengefährdung und der Auslegungsanalyse des vorgeschlagenen Tragwerks vorgelegt.

Eine 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; dabei werden die Kräfte kombiniert, die sich aufgrund ihrer Wirkrichtung zu den statischen Lasten addieren. Auf Verschiebungen sollte jedoch besonders geachtet werden, da für Planung und Auslegung der Details von Rohrhalterungen sowohl die positiven als auch die negativen Bewegungen erforderlich sein können.

Die Form und der Umfang von dem Rohrleitungskonstrukteur vorzulegenden seismischen Daten hängen von der Art der Berechnung ab.

A.2.1.2 Vereinfachte statische Ersatzanalyse

Bei diesem Verfahren wird die Schwankungsbreite der Tragwerksreaktion bei unterschiedlichen Frequenzen und Dämpfungsraten 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 darf entweder in Form eines Reaktionsspektrums in Bodenhöhe, als Berechnung für jede Ebene des Tragwerks oder als Angabe eines einzelnen Satzes von Reaktionen erfolgen, der als Einhüllende der verschiedenen Reaktionen, die für die Rohrleitung anwendbar sind, 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, die für die jeweilige Ebene in Richtung i festgelegt ist;
- k_i ein Beiwert;
- $k_i = 1$ wenn nachgewiesen werden kann, dass die Eigenfrequenzen der Rohrleitung zu weniger als 10 % mit den Schwingungsfrequenzspitzen im Reaktionsspektrum des Tragwerks übereinstimmen;
- $k_i = 1,5$ wenn keine Überprüfung der Übereinstimmung der Schwingungseigenschaften von Rohrleitung und Tragwerk vorgenommen wurde.

A.2.1.3 Quasistatische Ersatzanalyse

Bei dieser Berechnung 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:

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

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;
- k_i ein Faktor zur Berücksichtigung der Einflüsse von mehreren Eigenfrequenzen auf die Gestaltung des Rohrleitungssystems.

Der Faktor k_i sollte Tabelle A.2.1-1 entnommen werden. Sofern ihre Zulässigkeit nachgewiesen wurde, dürfen auch niedrigere Werte für den 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 einzelner Träger (Höchstkräfte müssen an jedem Querschnitt angreifen)	1,0
einzelne ebene Systeme, z. B. Rahmen, Flächentragwerke, 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) darf für $\bar{k}_i$ der Wert 1,0 verwendet werden.

Für die Ermittlung der Reaktionen von Rohrhalterungen darf für $\bar{k}_i$ der Wert 1,0 verwendet werden, unabhängig davon, welches der in Tabelle A.2.1-1 angegebenen Modelle angewendet wird.

A.2.1.4 Modalanalyse der Reaktionsspektren

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 ihrer Wechselwirkung mit dem Tragwerk abgeleitet. Eine Schwingungsanalyse der Rohrleitung sollte durchgeführt werden, um die Verschiebungen, Momente und Kräfte für die eintretenden Beschleunigungen bei jeder signifikanten Frequenz im Schwingungsspektrum zu ermitteln.

A.2.1.4.1 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):

$$R_i = \pm \sqrt{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n R_{ji} \rho_{jk} R_{ki}}, \text{ dabei ist } \rho_{ij} = \frac{8\zeta^2(1+r)r^{3/2}}{(1-r^2)^2 + 4\zeta^2r(1+r)^2}, r = \frac{\omega_j}{\omega_i}, \zeta: \text{Dämpfung} \quad (\text{A.2.1.-4})$$

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.2.1.4.2 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.2.1.4.3 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.2.1.4.3 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.2.1.5 Analyse des Kraftverlaufs über die Zeit

Sind seismisch bedingte Verschiebungen des Tragwerks über die Zeit bekannt, so kann die dynamische Reaktion 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 oder Verschiebungen nach einem vorgegebenen Muster beaufschlagt. Die resultierenden Spannungen aus den Verschiebungen der Rohrleitung können als eine Reihe von Berechnungen in diskreten Zeitabständen ermittelt werden.

Für die Lösung der dynamischen Probleme stehen verschiedene mathematische Programme zur Verfügung, und der Konstrukteur sollte sicherstellen, dass das Modell und die Analyseverfahren geeignet sind.

Die Zeitintervalle sollten so gewählt werden, dass sichergestellt wird, dass es nicht dazu kommt, 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 während des seismischen Ereignisses sollten dann zu den ständig wirkenden Lasten addiert werden, um die Gesamtspannung für Auslegungszwecke zu ermitteln.

A.2.1.6 Dämpfungswerte

Schwingungen in Rohrleitungen und Tragwerken unterliegen einem Energieverlust bzw. einer Dämpfung. Quellen für Dämpfung entstehen durch inelastisches Werkstoffverhalten, Verbindungen zwischen Bauteilen, Gleitreibung sowie weitere Merkmale. Die Bewertung des Ausmaßes der Dämpfung hinsichtlich bestimmter Quellen ist komplex und fallspezifisch, weshalb, sofern keine anderen geeigneten und zuverlässigen Daten vorliegen, für die Anwendung dieses Anhangs die Dämpfungswerte in Tabelle A.2.1-2 für die statische Ersatzanalyse, die Analyse von Reaktionsspektren und die Analyse des Kraftverlaufs über die Zeit von Rohrleitungssystemen verwendet werden sollten.

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 Shutdown 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) 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 sollte unabhängig davon, ob statische Reaktionen oder Reaktionsspektren, die dämpfungscompatible Tragwerksreaktion für SSE oder OBE angewendet worden sein.

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.

A.2.1.7 Verschiebung von Rohrhalterungen durch seismische Einflüsse

Die Auswirkung der relativen Bewegung von Rohrhalterungen und Festpunkten bei seismischen Ereignissen sollte bei der Berechnung der Gesamtspannungen berücksichtigt werden. Bei Rohrleitungshalterungen, die in derselben Ebene eines einzelnen Bauwerks liegen, können diese Auswirkungen zwar gering sein, wenn jedoch Teile des Tragwerks nicht miteinander verbunden sind, können die relativen Verschiebungen erheblich sein.

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 dürfen die maximalen relativen Verschiebungen und die resultierenden Spannungen durch eine eingehende Analyse des Kraftverlaufs im Tragwerk über die Zeit ermittelt werden. Dabei sollte beachtet werden, dass es sich bei diesen Spannungen aufgrund relativer Bewegungen um selbstbegrenzende Sekundärspannungen handelt.

A.2.2 Schlagartiges Schließen von Ventilen

A.2.2.1 Allgemeines

Wenn der Strom eines Fluids 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 komplexe Druckwellenmuster innerhalb des Systems. 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, deren Abbau mehrere Sekunden dauern kann. Dies wird als Wasserschlag bezeichnet.

Diese Erscheinung tritt 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. Dies wird als schlagartiges Schließen des Ventils bezeichnet.

Die Art und Weise, wie ein Ventil schließt, kann vom Ventiltyp abhängen. Es wird allgemein angenommen, dass die Geschwindigkeit, mit der der Durchflussquerschnitt reduziert wird, über einen wesentlichen Teil des Ventilhubes konstant ist und dann in der Endphase des Schließvorgangs abnimmt, um Auswirkungen auf den Ventilsitz auf ein Mindestmaß zu verringern. 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. Folglich kann das Ventil über einen großen Teil seines Querschnitts schließen, ohne den Fluiddurchsatz erheblich zu verringern. Diese Berechnungen zur modellmäßigen Darstellung der Schließcharakteristik des Ventils erfordern in dieser Hinsicht besondere Beachtung.

Der Druckanstieg sollte berechnet werden, um sicherzustellen, dass die Rohrleitung der Summe aus kontinuierlichen und druckstoßinduzierten Spannungen standhalten kann. Darüber hinaus sollte der Betrag der ungleichgewichtigen Kräfte ermittelt und bei der Auslegung der Rohrleitung angewendet 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 Bewegung der Rohrleitung durch diese erzwungene Schwingung ermitteln, um ausreichendes Spiel sicherzustellen.

Es sollte beachtet werden, dass zusätzlich zur stromaufwärts erfolgenden Druckwelle entgegen der Strömungsrichtung hinter dem schließenden Ventil eine Verdünnungswelle erzeugt werden kann, deren Unterdruckwirkungen beurteilt werden sollten.

ANMERKUNG Außerdem sind auch 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 abwechselnd auf jeden geraden Rohrleitungsabschnitt ein.

A.2.2.2 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 größten Spannungen sind, die im System auftreten. Die Wechselwirkungen und Dämpfung der Wellen sowie die dynamische Reaktion des Systems auf die Schwingungen werden dabei nicht beachtet. Die Analyse ist konservativ und kann zu einer Überdimensionierung der Rohrleitung führen, die zu den thermischen oder anderen Auslegungskriterien im Widerspruch stehen kann.

a) Bewertung des Druckanstiegs

Der Schließvorgang ist schlagartig, 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 ist gegeben als:

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

Dabei ist

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

ANMERKUNG Dabei handelt es sich um die Joukowsky-Gleichung.

Die Schallgeschwindigkeit darf wie folgt berechnet werden:

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

Dabei ist

- k der Kompressionsmodul des Fluids.

Für Rohrleitungen mit hoher Elastizität darf diese 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 dem Betriebsdruck und dem maximalen dynamischen Druckanstieg dP standhalten kann.

b) statische Bewertung dynamischer Beanspruchungen

Die Auswirkungen von Ungleichgewichten oder Druckstößen auf das Rohrleitungssystem können bewertet werden, indem gerade Rohrabschnitte an den Böden oder an Abbiegungen mit einem berechneten Differenzdruck beaufschlagt werden. Der 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.