

# Berechnung von Schutzrohren

Emerson bietet ein neues Tool für die Berechnung von Schutzrohren basierend auf dem Standard ASME PTC 19.3 TW – das kostenlose Online-Tool finden Sie unter [Rosemount.com/ThermowellCalc](http://Rosemount.com/ThermowellCalc). Probieren Sie es noch heute aus und schauen Sie sich auch das Video an, das den neuen Standard erläutert.



**Dirk Bauschke**  
*Engineering Manager*

**David Wiklund**  
*Senior Principal Engineer*

**Andrew Dierker**  
*Mechanical Project Engineer*

**Alex Cecchini**  
*Senior Marketing Engineer*



# Inhaltsverzeichnis

## Berechnung von Schutzrohren

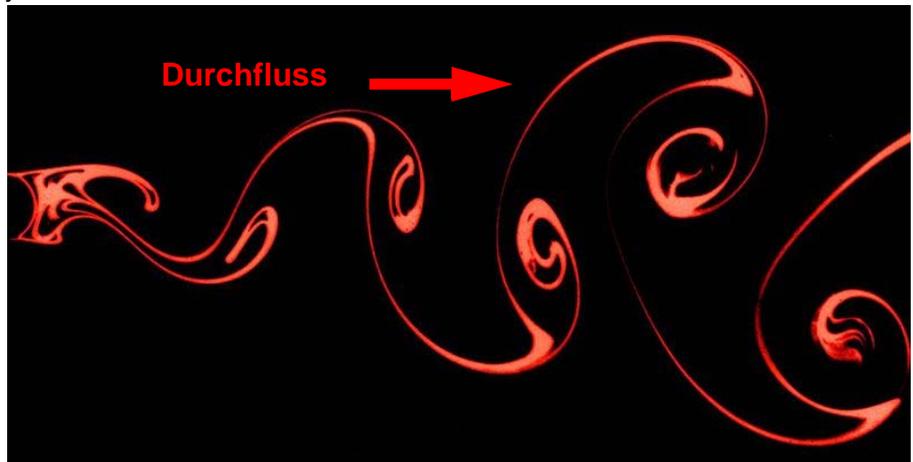
Einführung . . . . .	1-1
Überblick über die Geschichte des Standards ASME PTC 19.3 . . . . .	1-1
Methodologie des Standards ASME PTC 19.3-1974 . . . . .	1-3
Theorie der Wirbelablösung . . . . .	1-4
Biegespannung und Druckbelastung. . . . .	1-9
Einbaubedingte Abweichungen . . . . .	1-17
Definition der freitragenden Länge . . . . .	1-19
Eintauchkragen . . . . .	1-21
Durchschnittliche Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsprofil . . . . .	1-22
Anforderungen an die Schutzrohr- Konstruktion . . . . .	1-23

# Schutzrohre

---

## EINFÜHRUNG

Schutzrohre sind im Prinzip runde Zylinder, die wie ein freitragender Arm in eine Prozessleitung eingebaut werden. Sie schützen die Temperatursensoren vor den Prozessbedingungen und dichten den Prozess ab. Wenn ein Prozessmedium um das Schutzrohr strömt, entstehen in der Auslaufstrecke von laminaren, turbulenten und Übergangsströmungen Wirbel mit geringem Druck. Die Kombination der Belastungen, die durch den statischen Strömungswiderstand des Prozessmediums (in Fließrichtung, Drag) und den dynamischen transversalen Auftrieb (quer zur Fließrichtung, Lift) der abwechselnden Wirbelablösungen erzeugt werden, stellen ein Risiko für mechanisches Versagen des Schutzrohrs durch Ermüdung dar. Bei der Auslegung der Prozessleitungen steht den Konstrukteuren eine Vielzahl von Hilfsmitteln zur Verfügung, um das Versagen eines Schutzrohrs in ihrem System vorauszubestimmen und zu verhindern. ASME PTC 19.3-1974 ist jedoch der Standard, nach dem die meisten Schutzrohre konstruiert wurden.



Farblich hervorgehobene Rauchspur einer Kármánschen Wirbelstraße in einer laminaren Strömung.<sup>(1)</sup>

## ÜBERBLICK ÜBER DIE GESCHICHTE DES STANDARDS ASME PTC 19.3



Der Standard reicht in das Jahr 1957 zurück, als die ASME (American Society of Mechanical Engineers [Amerikanischer Verband der Maschinenbauingenieure]) entschied, dass das Beiblatt zur Temperaturmessung aus dem Jahr 1930 nicht zufriedenstellend war, da es keine thermischen und Belastungseinflüsse berücksichtigte. Die ASME bat den Normenausschuss für Kessel- und Druckbehälter um Erstellung eines Dokumentes, was jedoch außerhalb des Aufgabenbereichs des Ausschusses lag. Daraufhin wurde ein eigenständiger Ausschuss mit allen Temperaturmessungen beauftragt, der die Konstruktion von Schutzrohren als Untergruppe einschloss. Die Grundlage für den Standard ASME PTC 19.3-1974 war eine von J.W. Murdock (1959) verfasste Abhandlung.<sup>(2)</sup>

(1) Wikipedia [http://en.wikipedia.org/wiki/Vortex\\_induced\\_vibration](http://en.wikipedia.org/wiki/Vortex_induced_vibration) as of 5/20/2011

(2) Murdock, J.W., „Power Test Code Thermometer Wells“ (Leistungstestcode für Thermometerschutzrohre), *Journal of Engineering for Power* (1959).

John Brock von der Naval Post Graduate School (Universität der US-Marine) befasste sich im Jahr 1974 mit weiterführenden Nachforschungen und legte dabei einige Aspekte offen, die von Murdock entweder angenommen oder ignoriert wurden. Brocks Vorschläge umfassten Konzepte wie die Verwendung einer variablen Strouhal-Zahl anstelle einer feststehenden Strouhal-Zahl, die Berücksichtigung von Einbaufaktoren bei der Schätzung der Eigenfrequenz des Schutzrohrs und die Überprüfung des Grenzwertes für das Frequenzverhältnis von 0,8, um die Unsicherheit bei Berechnungen der Eigenfrequenz zu berücksichtigen.<sup>(1)</sup> Einige dieser Vorschläge zeigten, dass Verbesserungen des Standards ASME PTC 19.3-1974 möglich wären.

Der Standard ASME PTC 19.3-1974 konnte anscheinend nicht alle Einbaubedingungen berücksichtigen. Beispielsweise ereignete sich im Schnellen Brüter in Monju (Japan) ein vielbeachteter katastrophaler Schutzrohr-Ermüdungsbruch. Das Kernkraftwerk musste im Jahr 1995 aufgrund eines Lecks im Flüssignatrium-Kühlsystem stillgelegt werden. Die Ermittlungen ergaben, dass das Schutzrohr zwar gemäß den Vorgaben der ASME PTC 19.3-1974 ausgelegt war, das Versagen jedoch durch die In-Line-Resonanz hervorgerufen wurde, die in diesem Standard nicht berücksichtigt wird. Als Folge dieses Ereignisses wurde die japanische Version dieses Standards, genannt JSME S012, entwickelt.<sup>(2)</sup> Der Reaktor wurde erst nach jahrelangen Ermittlungen und Rechtsstreitigkeiten im Mai 2010 wieder hochgefahren.

In den meisten Fällen wurde der Standard ASME PTC 19.3-1974 jedoch sowohl in Dampf- als auch in anderen Anwendungen erfolgreich angewendet. Zahlreiche Schlüsselfaktoren, wie Fortschritte in den Kenntnissen des Verhaltens von Schutzrohren, eine Reihe von katastrophalen Ausfällen (darunter Monju) und die zunehmende Anwendung von Finite-Element-Berechnungen für die Belastungsmodellierung, führten im Jahr 1999 zur Neubildung des ASME-Normenausschusses mit dem Ziel, den Standard vollkommen zu überarbeiten. Die Kombination dieser Faktoren führte dazu, dass viele Anbieter in der Branche von den elementaren Methoden und vereinfachten Tabellen der ASME PTC 19.3-1974 abrückten und sich den fortschrittlicheren Methoden zur Vorherbestimmung der Eigenfrequenz von Schutzrohren und Berechnung der Erregerfrequenz zuwendeten.

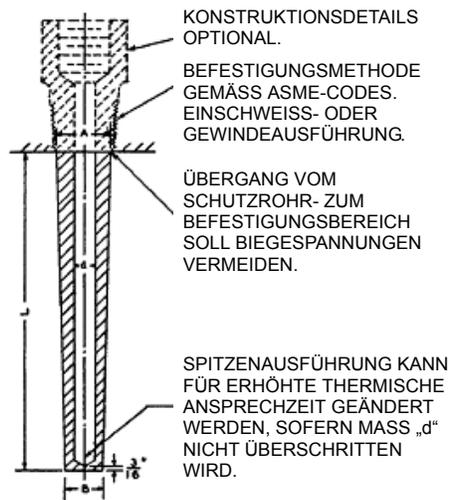
Anstelle einer Aktualisierung der bestehenden Version der ASME PTC 19.3-1974 entschied sich der Ausschuss, bedingt durch die signifikanten Änderungen aufgrund seiner Arbeiten, zur Veröffentlichung eines neuen Standards. Die Behandlung der Berechnung von Schutzrohren im Standard ASME PTC 19.3-1974 umfasste 4 Seiten. Im Vergleich dazu ist der neue Standard, der als ASME PTC 19.3 TW-2010 („TW“ steht für „thermowell“, dem englischen Wort für „Schutzrohr“) bekannt ist, dank der Erläuterungen der Theorie und der Komplexität des Verfahrens, mehr als 40 Seiten lang.

Der Standard ASME PTC 19.3 TW-2010 wurde im Juli 2010 veröffentlicht.

(1) Brock, John E., „Stress Analysis of Thermowells“ (Belastungsanalyse von Schutzrohren), Naval Postgraduate School, Monterey, Kalifornien (1974).

(2) Odahara, Sanoru, et al. „Fatigue Failure by In-Line Flow-induced Vibration and Fatigue Life Evaluation“ (Ermüdungsbruch durch strömungsinduzierte In-Line-Schwingung und Festigkeitsberechnungen), JSME International Journal, Series A, Vol. 48, Nr. 2 (2005).

## METHODOLOGIE DES STANDARDS ASME PTC 19.3-1974



Wie bereits erwähnt ist der Standard aus dem Jahr 1974 sehr kurz gefasst. Er lässt nur wenige Schutzrohrprofile zu und verwendet vereinfachte Gleichungen zur Modellierung des Schutzrohrs für Berechnungen der Eigenfrequenz. Obwohl alle Befestigungsmethoden berücksichtigt werden, die gemäß der ASME-Codes für Kessel, Druckbehälter und Rohrleitungen genehmigt sind, unterscheiden die Gleichungen nicht zwischen den gebräuchlichen Befestigungsmethoden mit Flansch-, Gewinde- und Einschweiß-Ausführung. Außerdem werden die Einflüsse der unterschiedlichen Schutzrohrprofile, wie gerade,

kegelförmige und abgestufte Ausführungen, ignoriert. Die nicht in den Tabellen enthaltenen Bohrungsmaße werden nicht berücksichtigt. Dies bedeutet, dass für Sensoren mit 6 mm bzw.  $\frac{1}{4}$  in. Bohrungsdurchmesser dieselben Konstanten in den Gleichungen angewendet werden und dass für Sensoren mit einem Bohrungsdurchmesser von 3 mm keine Konstanten bereitgestellt werden.

Trotz aller Nachteile bot der Standard ASME PTC 19.3-1974 jedoch ein einfaches Verfahren für die Berechnung von Schutzrohren, durch den er weitgehend in der Branche akzeptiert wurde: Zusammenstellung der Prozessdaten und der Informationen über den Schutzrohr-Werkstoff, Berechnung der Eigenfrequenz und der Strouhal-Frequenz, Vergleich des Verhältnisses mit dem Grenzwert von 0,8, Berechnung der Biegespannung, Vergleich von maximal zulässigem Druck und Prozessdruck sowie Überprüfung der maximal zulässigen Länge mit der gewünschten Länge.

Die Zusammenstellung der Prozessdaten und der Werkstoffangaben ist ein einfacher Schritt, allerdings gibt es ein Datenelement, das nicht mehr so einfach verfügbar ist. Das „Verhältnis zwischen der Frequenz bei Prozesstemperatur und der Frequenz bei 70 °F“ lässt sich nicht einfach ermitteln.

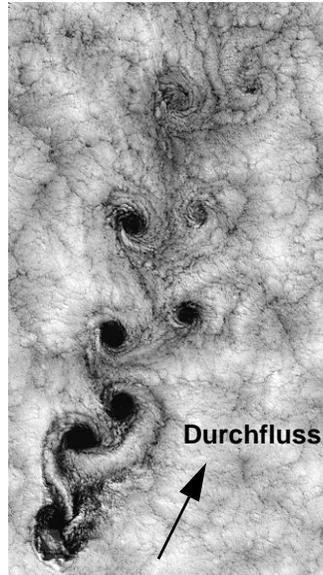
Die Methode zur Berechnung der Schutzrohr-Eigenfrequenz verwendet eine einfache Gleichung, jedoch sind einige der Faktoren, wie z. B.  $K_f$ , nicht ausreichend definiert. Wenn die Einbaulänge des Schutzrohrs nicht mit einem der Werte in der Tabelle übereinstimmt, sollte der Konstrukteur die Daten für die nächstgrößere Länge verwenden, um ein sicheres Ergebnis zu erhalten. Für eine akzeptable Schutzrohr-Ausführung „sollte“ das Verhältnis zwischen Strouhal-Frequenz und der Eigenfrequenz 0,8 nicht überschreiten.

Der letzte Schritt umfasst eine Bewertung der Schutzrohrlänge basierend auf der statischen Belastung. Dies dient der Feststellung der maximal zulässigen Länge des Schutzrohrs, damit es den Biegespannungen widerstehen kann. Die ermittelte Länge wird mit der gewünschten Länge verglichen, um zu bestimmen, ob diese akzeptabel ist oder ob das Schutzrohr gekürzt werden muss.

# Schutzrohre

## THEORIE DER WIRBELABLÖSUNG

(Grundlage für ASME PTC 19.3 TW-2010)



Landsat 7 Bild einer Kármánschen Wirbelstraße in den Wolken vor der chilenischen Küste in der Nähe der Juan Fernandez Inseln (15. Sept. 1999).<sup>(1)</sup>

Wenn ein Prozessmedium um ein stumpfes Objekt fließt, entstehen Wirbel in der Auslaufstrecke des Objekts. Dies wird auch als Wirbelablösung, Kármánsche Wirbelstraße oder Durchflusswirbel bezeichnet. Die Wirbel sind Zellen mit geringem Druck, die abwechselnd Auslaufstrecke entstehen und abgelöst werden. Der aufgrund der abwechselnden Wirbel entstehende Differenzdruck erzeugt abwechselnd auf das Objekt wirkende Kräfte. Dies führt zu einer wechselnden Belastung des sich biegenden Objekts. Dieses Phänomen ist in der Natur zu beobachten: als Wirbel, die sich flussabwärts von Brückenpfeilern bilden, als Verwirbelung der Wolken auf der dem Wind abgewandten Seite von Berggipfeln oder als Äolstöne, die erzeugt werden, wenn der Wind um Hochspannungsleitungen weht. Wirbelablösungen sind zwar für die Messung des Prozessflusses hilfreich, die Konstrukteure von Schutzrohren sollten sie jedoch aufgrund des Risikos von Ausfällen vermeiden.

Der Hauptgrund für den Abriss eines Schutzrohrs liegt in der resonanzbedingten Ermüdung. Daher muss der Konstrukteur die Theorie der Wirbelablösung verstehen, um deren Einflüsse zu vermeiden und die Wirbelablösefrequenz vorherzubestimmen. Da die Wirbelablösung in einem Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 1500 Hz stattfindet, kann das Schutzrohr in einem kurzen Zeitraum einer großen Anzahl von Zyklen ausgesetzt werden.



Beispiel für einen Schutzrohr-Abriss aufgrund der durch Wirbel erzeugten Schwingungen.<sup>(2)</sup>

Wenn sich die Wirbelablösefrequenz, die auch als Strouhal-Frequenz bezeichnet wird, der Eigenfrequenz des Schutzrohrs nähert, nehmen die Verschiebung der Spitze und die Belastungen erheblich zu. Dadurch kann das Schutzrohr aufgrund der hohen Energie, die es absorbieren muss, abreißen. Aus diesem Grund muss der Konstrukteur bei der Auslegung eines geeigneten Schutzrohrs für den jeweiligen Prozess zusätzlich zu den Prozessbedingungen wie Druck, Temperatur und Korrosion auch die Schutzrohr-Festigkeit bei Dauerschwingungen berücksichtigen.

(1) Website des NASA Weltobservatoriums

„[http://earthobservatory.nasa.gov/Newsroom/NewImages/images.php3?img\\_id=3328](http://earthobservatory.nasa.gov/Newsroom/NewImages/images.php3?img_id=3328).“

(2) Energy Institute, „Guidelines for the Avoidance of Vibration Induced Fatigue in Process Pipework“ (Richtlinien für die Vermeidung von vibrationsinduzierten Ermüdungserscheinungen in Prozessleitungen), 2. Ausgabe, (2008), Dok.-Nr. 978-0-85293-463-0.

### Mindest-Fließgeschwindigkeit

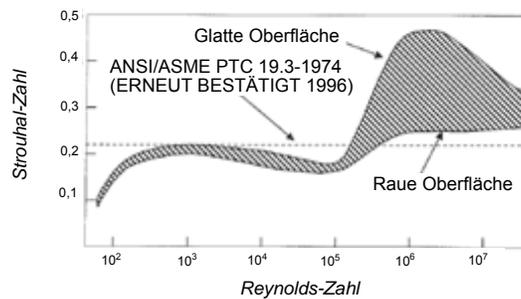
Bei langsam fließenden Prozessmedien wird nicht genug Energie vom Prozessmedium auf das Schutzrohr übertragen, um einen Ermüdungsbruch zu verursachen. Wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind, müssen keine Frequenzgrenzwert-Berechnungen angestellt werden, da das Risiko eines Schutzrohrbruchs vernachlässigbar ist.

1. Fließgeschwindigkeit des Prozessmediums,  $V < 0,64$  m/s (2,1 ft./s)
2. Wandstärke,  $(A - d) \geq 9,55$  mm (0,376 in.)
3. Freitragende Länge,  $L \leq 0,61$  m (24 in.)
4. Außen- und Spitzendurchmesser ( $A$  und  $B$ )  $\geq 12,7$  mm (0,5 in.)
5. Maximal zulässige Belastung,  $S \geq 69$  MPa (10 ksi)
6. Dauerschwingfestigkeits-Grenzwert,  $S_f \geq 21$  MPa (3 ksi)

Diese niedrigen Fließgeschwindigkeiten können dennoch eine In-Line-Resonanz auslösen und aufgrund der hohen Vibration der Resonanz zu einem Ausfall des Sensors führen. Wenn diese Kriterien nicht erfüllt sind oder wenn aufgrund der Einwirkungen des Prozessmediums ein Risiko für Spannungskorrosion oder Materialversprödung besteht (die eine Änderung der Dauerschwingfestigkeit bewirkt), muss der Konstrukteur die Ausführung des Schutzrohrs umfassend beurteilen.

### Strouhal-Zahl

Es gab viele Diskussionen darüber, ob eine feststehende oder variable Strouhal-Zahl verwendet werden soll. ASME PTC 19.3-1974 verwendete eine feststehende Strouhal-Zahl von 0,22, während Brock eine variable Strouhal-Zahl in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl empfahl. Branchenweit begannen viele Anwender, die variable Strouhal-Zahl in den Gleichungen zur Berechnung der Wirbelablösung im Rahmen der ASME PTC 19.3-1974 zu verwenden und nannten dies die „Brock-Methode“ oder etwas ähnliches.

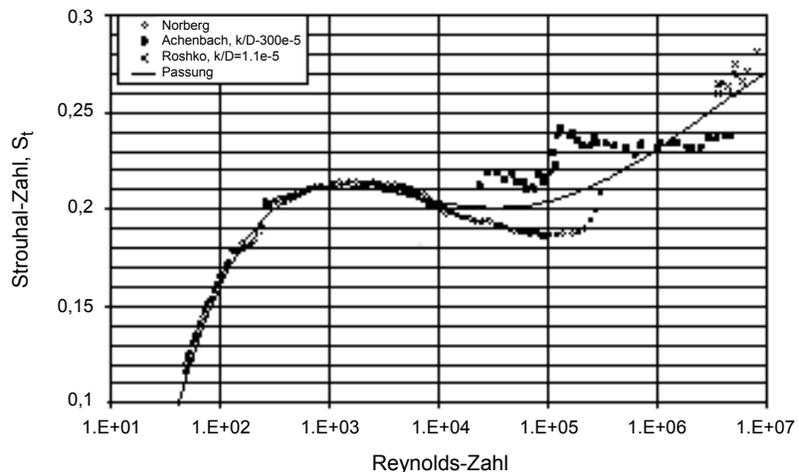


Typisches Diagramm der Strouhal-Zahl als Funktion der Reynolds-Zahl

# Schutzrohre

Der ASME PTC 19.3 TW-2010 Normenausschuss überprüfte die nachfolgenden Experimente, bevor eine Entscheidung über die Anwendung der variablen Strouhal-Zahl getroffen wurde. Zwei im Jahr 2001 im JSME International Journal veröffentlichte Abhandlungen zeigten interessante Testergebnisse für bearbeitete gerade und kegelförmige Zylinder, die ähnlich wie Schutzrohre geformt waren. Die Kräfte und Schwingungsamplituden wurden gemessen, während die Zylinder in den Prozessfluss eingetaucht waren. Die Schlussfolgerung war, dass der Nachweis einer hohen Strouhal-Zahl in den vorherigen Experimenten auf Messungen der Wirbelablösungen basierte und nicht auf den tatsächlich auf das Schutzrohr einwirkenden Kräften.<sup>(1) (2)</sup>

„Rau“ Oberflächen wurden in diesen Experimenten definiert als eine gemessene Rauigkeit von mehr als 128 Ra. In der Prozessindustrie verwendete Schutzrohre weisen eine maximale Oberflächenrauigkeit von 32 Ra auf, und die Belastungsgrenzen und Berechnungen im Standard ASME PTC 19.3 TW-2010 gelten nicht für eine Oberflächenrauigkeit von mehr als 32 Ra.



Tatsächliche Daten der Strouhal-Zahl eines rauhen Zylinders als Funktion der Reynolds-Zahl.<sup>(3)</sup>

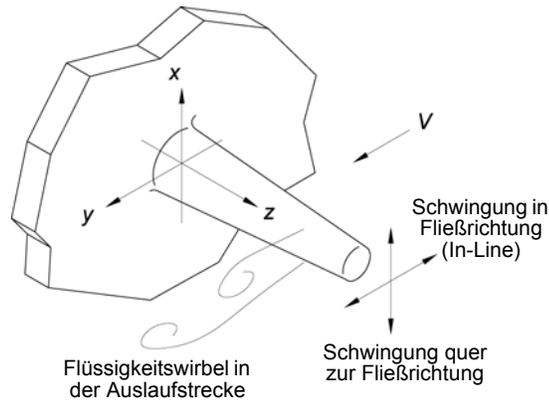
Basierend auf diesen Daten beschloss der ASME PTC 19.3 TW-2010 Normenausschuss, eine variable Strouhal-Zahl zu berücksichtigen, die durch die Kurve des rauhen Zylinders definiert ist. Um die Berechnungen zu vereinfachen, können die Konstrukteure auch einen sicheren Näherungswert der Strouhal-Zahl von 0,22 verwenden. Dies ist besonders dann nützlich, wenn ein Konstrukteur die dynamische oder kinematische Viskosität des Prozessmediums, die zur Bestimmung der Reynolds-Zahl erforderlich ist, nicht ermitteln kann.

## Reynolds-Zahl

Bei jedem voll in den Durchfluss eingetauchten Schutzrohr ist die Reynolds-Zahl ein grundlegender Parameter. Die Reynolds-Zahl ist das Verhältnis zwischen den Trägheits- und Zähigkeitskräften im Strömungsbereich. Bei wirbelablösenden Elementen ist die Längeneingabe für die Reynolds-Zahl die Breite des wirbelerzeugenden Elements. Bei Schutzrohren ist dies der Spitzendurchmesser.

- (1) Sakai, T., Iwata, K., Morishita, M., und Kitamura, S., „Vortex-Induced Vibration of a Circular Cylinder in Super-Critical Reynolds Number Flow and Its Suppression by Structure Damping“ (Wirbelinduzierte Schwingungen von runden Zylindern in hochkritischen Reynolds-Zahl-Durchflüssen und deren Unterdrückung durch strukturelle Dämpfung), JSME Int. J. Ser. B. 44, 712-720 (2001).
- (2) Iwata, K., Sakai, T., Morishita, M., und Kitamura, S., „Evaluation of Turbulence-Induced Vibration of a Circular Cylinder in Super-Critical Reynolds Number Flow and Its Suppression by Structure Damping.“ (Bewertung wirbelinduzierter Schwingungen von runden Zylindern in hochkritischen Reynolds-Zahl-Durchflüssen und deren Unterdrückung durch strukturelle Dämpfung), JSME Int. J. Ser. B. 44, 721-728 (2001).
- (3) ASME-Standard, Leistungstestcodes 19.3TW (Entwurf 7).

**Schutzrohr-  
Eigenfrequenz**



Durch das Prozessmedium induzierte Kräfte und Achsenzuordnung für die Berechnung von Schutzrohr-Belastungen.<sup>(1)</sup>

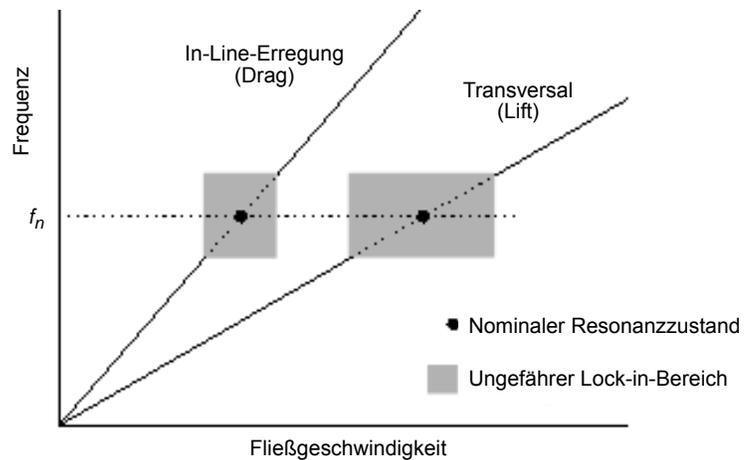
ASME PTC 19.3 TW-2010 modelliert das Schutzrohr als einfachen freitragenden Balken und wendet eine Reihe von Korrekturfaktoren an, um die Abweichungen von einem idealen Balken durch Einbeziehung der zusätzlichen Flüssigkeitsmasse, der zusätzlichen Sensormasse, von Balken mit uneinheitlichem Profil und Montagevorschriften zu berücksichtigen. Bei Schutzrohren mit abgestuftem Schaft sind die meisten Korrelationen und Berechnungen aufgrund der Geometrie und der Belastungskonzentrationspunkte komplexer.

Aus diesem Grund beschränkt ASME PTC 19.3 TW-2010 die dimensionalen Abweichungen von Schutzrohren mit abgestuftem Schaft, die von dieser Norm erfasst werden.

Nach Anwendung aller Korrekturfaktoren wird die „In-situ-“ (d. h. die installierte) Eigenfrequenz  $f_n^c$  berechnet und für den Rest der Frequenzanalyse angewendet.

**Kritische  
Geschwindigkeit**

Nachdem die Eigenfrequenz des Schutzrohrs ermittelt wurde, muss der Konstrukteur den Sicherheitsspielraum zwischen der Eigenfrequenz und der Strouhal-Frequenz festlegen.



Schematische Darstellung der In-Line- und transversalen Erregung mit „Lock-in“-Bereich.<sup>(1)</sup>

(1) ASME-Standard, Leistungstestcodes 19.3TW-2010.

Es gibt in der Praxis zwei Arten der Schutzrohr-Erregung: die rechtwinklig wirkende Kraft (Lift), durch die das Schutzrohr senkrecht zur Fließrichtung schwingt, und die In-Line-Kraft (Drag), durch die das Schutzrohr parallel zur Fließrichtung schwingt. Die In-Line-Schwingung weist annähernd die zweifache Frequenz der Querschwingung auf. Der „kritische Grenzwert“ der In-Line-Fließgeschwindigkeit (bei dem die Strouhal-Frequenz der Eigenfrequenz entspricht) beträgt etwa die Hälfte der Wertes des transversalen Grenzwertes. ASME PTC 19.3-1974 befasst sich nicht mit den In-Line-Schwingungen, sondern ausschließlich mit der statischen Biegespannung.<sup>(1)</sup>

Obwohl die Änderung der Ablösefrequenz proportional zur Fließgeschwindigkeit ist, pendelt sich das Schutzrohr sehr leicht auf die Resonanzfrequenz ein. Es bedarf zudem u. U. einer beträchtlichen Änderung der Fließgeschwindigkeit, um das Schutzrohr bei Eigenfrequenz aus der Wirbelstraße zu entfernen. Da die Dämpfung typischer Schutzrohre sehr gering ist, ist es äußerst wichtig, außerhalb der Resonanz zu bleiben. Bei einem Resonanzzustand werden die Kräfte und Verschiebung beträchtlich verstärkt.

$$f_s < 0,8 f_n^c$$

Der Sicherheitsspielraum von 20 % berücksichtigt die signifikanten Abweichungen aufgrund folgender Faktoren:

- Nicht-Linearität des elastischen Ansprechverhaltens des Schutzrohrs
- Ungenaue Schutzrohr-Fertigungstoleranzen
- Informationen über die Werkstoffeigenschaften mit nur 3 signifikanten Ziffern
- Kleinere Routineabweichungen der Durchflussrate, Temperatur, Dichte oder Viskosität des Prozesses

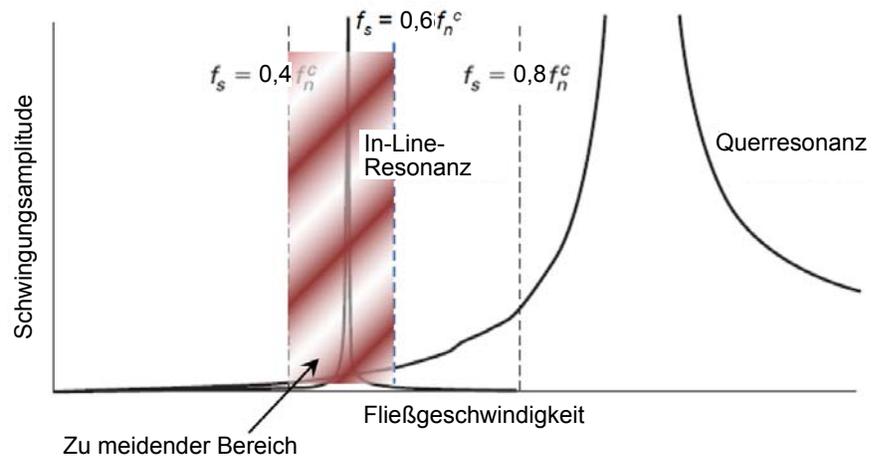
Da die In-Line-Schwingungen mit ungefähr der halben Geschwindigkeit der Querschwingungen auftreten (d. h. mit zweifacher Frequenz), gibt es bei Flüssigkeiten weitere Einschränkungen.

$$2f_s < 0,8 f_n^c$$

Eine etwas andere Betrachtungsweise bietet eine breitere Perspektive für den zulässigen Einsatz von Schutzrohren.

$$f_s \text{ (statischer Zustand)} < 0,4 f_n^c \quad \text{oder} \quad 0,6 f_n^c < f_s \text{ (statischer Zustand)} < 0,8 f_n^c$$

(1) ASME-Standard, Leistungstestcodes 19.3-1974 (erneut bestätigt 1998).



Kurve des Amplitudenverhaltens eines Schutzrohrs auf die vom Prozessmedium erzeugten Kräfte.<sup>(1)</sup>

ASME PTC 19.3 TW-2010 enthält auch eine Regelung für „extrem kritische“ Anwendungen, bei denen das Schutzrohr oberhalb seiner Eigenfrequenz eingesetzt wird. Emerson rät strengstens von der Verwendung von Schutzrohren in diesem Bereich ab.

## Scruton-Zahl

Neu bei dieser Theorie ist die Verwendung der Scruton-Zahl, die die Eigendämpfung des Schutzrohrs repräsentiert. ASME PTC 19.3 TW-2010 verwendet einen sehr konservativen Ansatz und setzt den Dämpfungsfaktor mit 0,0005 fest, sofern dieser nicht anderweitig bestimmt wird.

Eine Scruton-Zahl von weniger als 2,5 bedeutet, dass keine Eigendämpfung vorhanden ist und das Schutzrohr bei In-Line-Resonanzfrequenz beurteilt und von einer Querresonanzfrequenz ferngehalten werden muss. Bei zunehmender Scruton-Zahl steigt der Pegel der Eigendämpfung, der die Biegungen und damit die Belastungen reduziert. Durch ein bestimmtes Maß an Dämpfung funktioniert das Schutzrohr bei In-Line- und vielleicht sogar bei Querresonanzfrequenzen.

Wenn das Schutzrohr aufgrund bestimmter Bedingungen oberhalb der Eigenfrequenz eingesetzt wird, müssen höhere Resonanzen erwogen werden. ASME PTC 19.3 TW-2010 bietet dafür jedoch keine Richtlinien und Emerson rät strengstens von der Verwendung von Schutzrohren in diesem Bereich ab.

## BIEGESPANNUNG UND DRUCKBELASTUNG

### (gemäß ASME PTC 19.3 TW-2010)

Obwohl es den Anschein hat, dass großes Augenmerk auf die Theorie der Wirbelablösung und deren Anwendung gerichtet wird, sind die Belastungen innerhalb des Schutzrohrs und die auf das Schutzrohr wirkenden Kräfte ebenso kritisch bei der Beurteilung der Eignung für bestimmte Prozessanwendungen. Im Gegensatz zu der einfachen Methode der Version aus dem Jahr 1974 betrachtet ASME PTC 19.3 TW-2010 die Frequenz und die Belastungen des Schutzrohrs viel detaillierter. Dies ermöglicht eine größere Auswahl an Befestigungsmethoden, Profilen und Bohrungsgrößen, die die heute in der Branche zur Verfügung stehenden Angebote reflektieren.

(1) Übernommen vom ASME-Standard, Leistungstestcodes 19.3TW-2010.

# Schutzrohre

---

Insgesamt gibt es vier quantitative Kriterien im Standard ASME PTC 19.3 TW-2010, die erfüllt werden müssen, damit ein Schutzrohr für einen bestimmten Satz an Prozessbedingungen akzeptabel ist:

1. **Frequenzgrenze:** Die resonante Frequenz des Schutzrohrs muss hoch genug sein, damit durch den Flüssigkeitsfluss keine schädlichen Oszillationen ausgelöst werden.
2. **Dynamische Belastungsgrenze:** Die maximale primäre dynamische Belastung darf die zulässige Biegewechselbeanspruchung nicht überschreiten. Wenn die Auslegung erfordert, dass das Schutzrohr zum Erreichen der Betriebsbedingungen die In-Line-Resonanz durchlaufen muss, gibt es bei Resonanz eine weitere Festigkeitsprüfung.
3. **Statische Belastungsgrenze:** Die maximale statische Belastung des Schutzrohrs darf die zulässige Belastungsgrenze gemäß der Festigkeitskriterien nach Von Mises nicht überschreiten.
4. **Hydrostatische Druckgrenze:** Der externe Druck darf die Druckgrenzen von Schutzrohrspitze, -schaft und -flansch (oder -gewinde) nicht überschreiten.

Darüber hinaus muss die Eignung des Schutzrohr-Werkstoffs für die Prozessumgebung berücksichtigt werden. Das bedeutet, dass der Konstrukteur beurteilen muss, auf welche Weise sich Korrosion und Erosion auf das Schutzrohr auswirken und welchen Einfluss die Prozessbedingungen auf die Werkstoffeigenschaften haben.

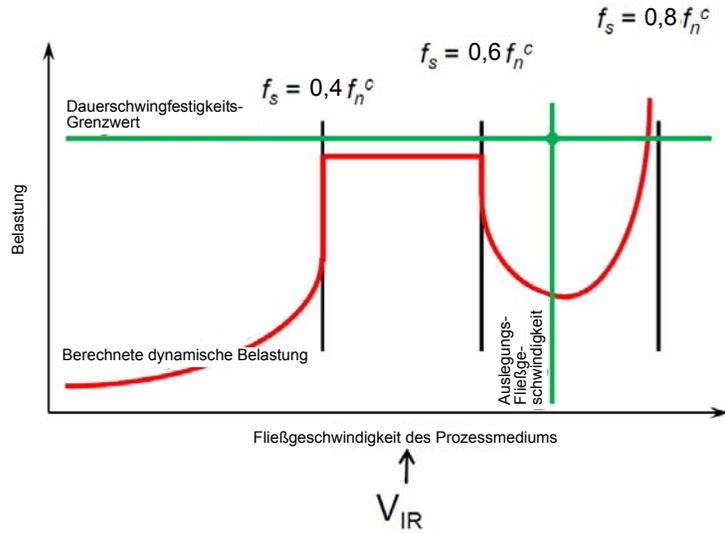
## Frequenzgrenze

Im Abschnitt über die Theorie der Wirbelablösung wird die ASME PTC 19.3 TW-2010 Methode zur Berechnung der Strouhal-Frequenz behandelt. Wenn die Strouhal-Frequenz zwischen dem Lock-in-Bereich der kritischen In-Line-Frequenz und dem Lock-in-Bereich der kritischen transversalen Frequenz liegt und die Beurteilung der Scruton-Zahl auf eine unzureichende Dämpfung hinweist, muss die Ausführung des Schutzrohrs überarbeitet werden, sofern nicht alle der folgenden Bedingungen erfüllt sind:

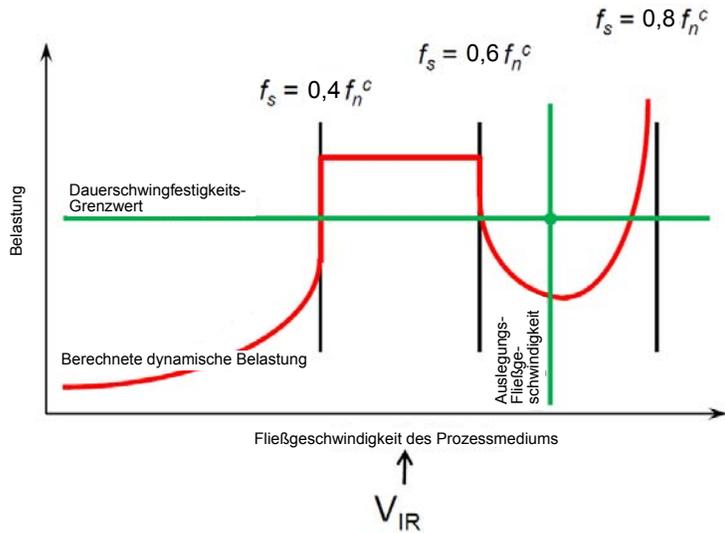
1. Das Prozessmedium ist ein Gas.
2. Das Schutzrohr durchläuft die In-Line-Resonanz nur bei der Inbetriebnahme, beim Abschalten oder nur selten während des Betriebs.
3. Die Spitzenbelastung bei Resonanz ist geringer als die Dauerschwingfestigkeit des Werkstoffs.
4. Das Prozessmedium verursacht keine Veränderungen der Werkstoffeigenschaften (insbes. der Dauerfestigkeit).
5. Die Folgen eines Ausfalls des Schutzrohrs sind ein akzeptables Risiko.

## Durchlaufen der In-Line-Resonanz

Wenn der Spitzenwert der Schwingungsbiegebeanspruchung des Schutzrohrs bei der kritischen In-Line-Fließgeschwindigkeit geringer ist als der Grenzwert der Dauerschwingfestigkeit, dann kann das Schutzrohr den Lock-in-Bereich der In-Line-Resonanz beim Hochfahren zur statischen Auslegungs-Fließgeschwindigkeit durchlaufen. Statische Fließgeschwindigkeiten innerhalb des Lock-in-Bereichs der In-Line-Resonanz sind aufgrund der hohen Anzahl der auf das Schutzrohr einwirkenden Beanspruchungszyklen und der erhöhten Gefahr einer Beschädigung des Sensors nicht zulässig.



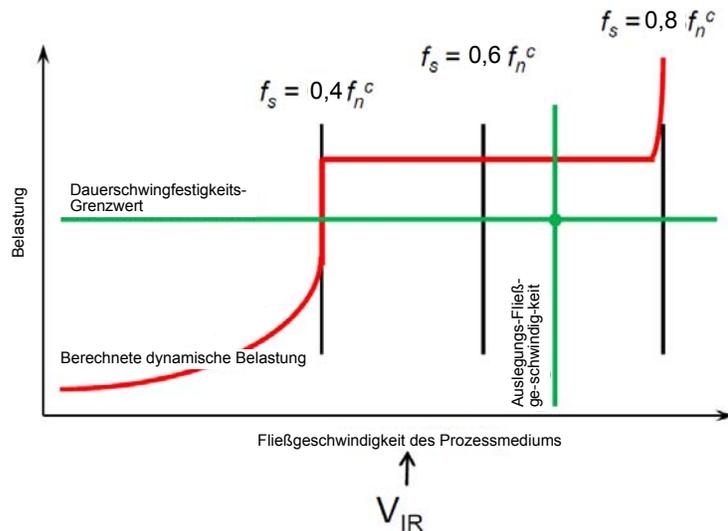
Beispieldiagramm einer Schutzrohr-Ausführung, die die Beurteilung der In-Line-Resonanz besteht.



Beispieldiagramm einer Schutzrohr-Ausführung, die die Beurteilung der In-Line-Resonanz nicht besteht. Diese Ausführung kann gemäß ASME PTC 19.3 TW-2010 akzeptabel sein.

# Schutzrohre

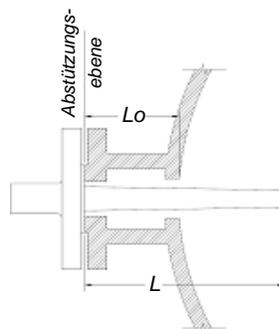
Wenn der Spitzenwert der Schwingungsbiegebeanspruchung des Schutzrohrs bei der kritischen In-Line-Fließgeschwindigkeit größer ist als der Grenzwert der Dauerschwingfestigkeit, besteht eine größere Unklarheit darüber, ob das Schutzrohr bei Bedingungen oberhalb der kritischen In-Line-Fließgeschwindigkeit eingesetzt werden kann. Theoretisch kann das Schutzrohr in Bereich zwischen  $0,6 f_n^c$  und  $0,8 f_n^c$  betrieben werden, sofern es den Lock-in-Bereich der In-Line-Resonanz schnell durchläuft. Da sich die Anzahl der Beanspruchungszyklen über die Lebensdauer des Schutzrohrs summiert, ist es äußerst wichtig zu wissen, wie lange das Schutzrohr in Resonanz ist. Die Schwingfestigkeit hängt von vielen Faktoren ab. Je länger das Schutzrohr in Resonanz ist, desto unsicherer ist die Lebensdauer.



Beispieldiagramm der Interpretation der Beurteilung der In-Line-Resonanz durch Emerson. Diese Ausführung wird von Emerson als nicht akzeptabel eingestuft.

Da den Anbietern der Instrumente keine Konstruktionsdetails zur Anlaufgeschwindigkeit bekannt sind, werden Schutzrohre, die die Beurteilung des Spitzenwerts der Schwingungsbiegebeanspruchung nicht bestehen und die oberhalb der kritischen In-Line-Fließgeschwindigkeit eingesetzt werden, von Emerson als nicht akzeptabel eingestuft.

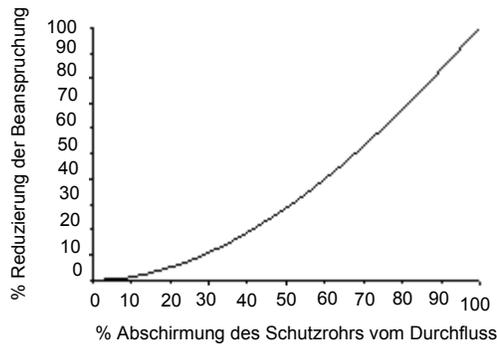
## Teilweise vom Durchfluss abgeschirmte Schutzrohre



Kegelförmiges Schutzrohr teilweise vom Durchfluss abgeschirmt

Bei den meisten Installationen ist das Schutzrohr teilweise vom Durchfluss abgeschirmt. Die in den Durchfluss eingetauchte Länge des Schutzrohrs ist nicht die volle freitragende Länge und die Gleichungen für Biegemoment und Biegespannung müssen angepasst werden.

Der Einfluss der Abschirmung auf das kegelförmige Schutzrohr sind leicht aufzuzeigen. Bei einem Schutzrohr mit abgestuftem Schaft ist es jedoch weitaus schwieriger, dies vorherzubestimmen oder zu modellieren, da die dem Medium ausgesetzte Oberfläche keine sich gleichmäßig ändernde Form aufweist und die Daten dadurch eine große Unstetigkeit aufweisen. Aus diesem Grund werden bei abgeschirmten Schutzrohren mit abgestuftem Schaft zwei verschiedene Beurteilungen basierend auf der Position der Abstufung im Vergleich zum Flüssigkeitsfluss durchgeführt. Diese Festigkeitsberechnungen müssen zudem zwei Mal durchgeführt werden, um die Beanspruchung am Außendurchmesser und an der Abstufung des Schutzrohrs bestimmen zu können.



Auswirkung der Abschirmung eines kegelförmigen Schutzrohrs

Wenn die Einbau- und Prozessbedingungen sowie die Zuordnung der Strouhal-Frequenz innerhalb des Frequenzbereichs bekannt sind, kann die Analyse der tatsächlich auf das Schutzrohr wirkenden Beanspruchungen durchgeführt werden. Wenn das Schutzrohr wie bereits zuvor erwähnt oberhalb der kritischen In-Line-Fließgeschwindigkeit eingesetzt werden soll, müssen die zyklischen Beanspruchungen bei In-Line-Resonanz berücksichtigt werden, denen das Schutzrohr in diesem Bereich beim Hochfahren zur Auslegungs-Fließgeschwindigkeit ausgesetzt wird. Die statischen und dynamischen Beanspruchungen der Auslegungs-Fließgeschwindigkeit sind ebenfalls zu beurteilen.

### Beurteilung der zyklischen In-Line-Beanspruchung

Zyklische Beanspruchungen der In-Line und senkrecht auf die Oberfläche des Schutzrohrs wirkenden Kräfte sind am Außendurchmesser konzentriert. Zur Berücksichtigung dieser Resonanzbedingungen müssen Berechnungen bei der kritischen In-Line-Fließgeschwindigkeit durchgeführt werden, um zu bestimmen, ob der Spitzenwert der Biegespannung bei Resonanz geringer ist als der Grenzwert der Dauerschwingfestigkeit des Werkstoffs. Da diese Analyse bei dem kritischen In-Line-Punkt durchgeführt wird, überschattet die durch die In-Line-Resonanz bedingte Verstärkung die Auftriebskräfte, so dass diese Auftriebskräfte ignoriert werden können, um die Berechnungen zu vereinfachen. Diese Beurteilung muss nur durchgeführt werden, wenn die Beurteilung der Scruton-Zahl ergibt, dass dies aufgrund der Prozessbedingungen erforderlich ist.

# Schutzrohre

---

Die kritische In-Line-Fließgeschwindigkeit wird zur Berechnung der auf das Schutzrohr pro Flächeneinheit wirkenden Kraft verwendet. Da die Fließgeschwindigkeit des Prozessmediums als Durchschnittswert und nicht als Geschwindigkeitsprofil angegeben ist, gehen die Berechnungen zudem davon aus, dass die Flächeneinheit die gesamte dem Medium ausgesetzte Länge des Schutzrohrs ist. Wenn das Schutzrohr teilweise vom Durchfluss abgeschirmt ist (wie z. B. bei einem Standrohr), muss dies ebenfalls berücksichtigt werden. Bei Schutzrohren mit abgestuftem Schaft muss diese Analyse an beiden Spitzenwert-Beanspruchungspunkten (Außendurchmesser und Basis des abgestuften Schafts) durchgeführt werden.

Um sicherzustellen, dass diese Berechnungen sicher sind, wird der Eigendämpfungsfaktor mit 0,0005 festgelegt. Schutzrohre mit abgestuftem Schaft müssen an zwei Stellen beurteilt werden, um die höhere Biegespannung der beiden Punkte zu ermitteln.

Eine der wichtigsten Änderungen des Standards ASME PTC 19.3 TW-2010 ist die Verwendung einer Tabelle zur Angabe der Grenzwerte der Biegewechselbeanspruchung. In der Tabelle sind Werkstoffe in einer Werkstoffklasse zusammengefasst, mit Querverweisen zur Einbauart, um die Belastungsgrenze zu ermitteln.

Dabei muss beachtet werden, dass bei nicht voll durchgeschweißten Nähten von einer geringeren Dauerschwingfestigkeit als bei voll durchgeschweißten Nähten ausgegangen wird und diese in der Tabelle dadurch niedrigere Werte aufweisen. Weitere Informationen sind nachfolgend unter „Anforderungen an die Schutzrohr-Konstruktion“ zu finden.

## Beurteilung der statischen Belastung bei Auslegungs-Fließgeschwindigkeit

Schutzrohre müssen auch bei der Auslegungs-Fließgeschwindigkeit beurteilt werden, um zu gewährleisten, dass sie die Anforderungen der Prozessumgebung erfüllen. Die statische Belastung ist eine Kombination des externen Drucks des Prozessmediums und der linearen Kräfte. Diese werden wie bereits bemerkt an der Position der maximalen Belastung berechnet. Wenn das Schutzrohr teilweise abgeschirmt ist oder einen abgestuften Schaft aufweist, sollten die Berechnungen unter Berücksichtigung dieser Einbauanforderungen vorgenommen werden.

Nachdem die maximale Belastung berechnet wurde, kann dieser Wert verwendet werden, um die Erfüllung des Von-Mises-Kriteriums zu bestimmen. Das Von-Mises-Kriterium wird zur Beurteilung der Scher- und Druckbelastungszustände in Kugeln und runden Zylindern verwendet. Es dient der Vorherbestimmung der plastischen Materialverformung.<sup>(1)</sup> Eine erfolgreiche Beurteilung bedeutet, dass die statischen Belastungen die Werkstoff-Dauerfestigkeit nicht überschreiten und das Schutzrohr bei der gewünschten Auslegungs-Fließgeschwindigkeit verwendet werden kann.

(1) Brock, John E., „Stress Analysis of Thermowells“ (Belastungsanalyse von Schutzrohren), Naval Postgraduate School, Monterey, Kalifornien (1974).

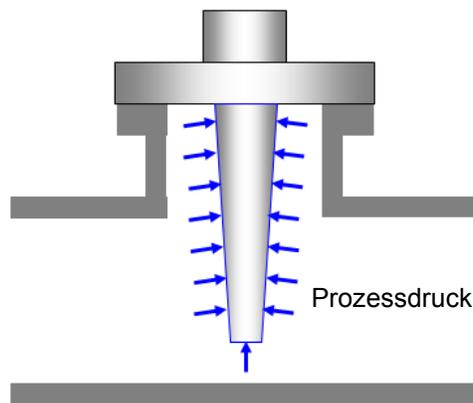
### Beurteilung der dynamischen Belastung bei Auslegungs-Fließgeschwindigkeit

Die dynamischen Belastungen des Schutzrohrs sind durch den Schwingungsauftrieb (transversal) und die linearen Kräfte (In-Line) bedingt. Der Verstärkungsfaktor repräsentiert den exponentiellen Charakter der Zunahme der Kräfte, wenn sich die Strouhal-Frequenz der Schutzrohr-Eigenfrequenz nähert, z. B. nahe der kritischen In-Line-Fließgeschwindigkeit. Wenn die Strouhal-Frequenz nicht innerhalb der Lock-in-Bereiche der In-Line- oder transversalen Eigenfrequenz liegt, dann werden Verstärkungsfaktoren berechnet und auf die Gleichungen für die zyklische Belastung angewendet. Die zyklischen linearen (Drag) und Auftriebskräfte (Lift) müssen bei Auslegungs-Fließgeschwindigkeit auf die gleiche Weise wie die durchgeführte Beurteilung der zyklischen In-Line-Belastung berechnet werden. Anders als bei der zuvor durchgeführten Beurteilung der zyklischen In-Line-Belastung werden die Auftriebskräfte nicht auf null gesetzt.

Wenn die Auslegungs-Fließgeschwindigkeit größer ist als die kritische In-Line-Fließgeschwindigkeit, muss das Schutzrohr möglicherweise so gehandhabt werden, als ob es auf unbestimmte Dauer bei In-Line-Resonanzbelastungswerten betrieben würde. Siehe vorhergehende Informationen im Abschnitt „Durchlaufen der In-Line-Resonanz“.

Es werden offensichtlich eine Reihe von Beurteilungen bei der Schutzrohr-Auslegung durchgeführt. Mithilfe von Informationen wie der kritischen In-Line-Fließgeschwindigkeit sowie der Beurteilung der statischen und dynamischen Belastung hat der Konstrukteur jedoch detaillierte Angaben darüber zur Verfügung, wo innerhalb des Frequenzbereichs das Schutzrohr eingesetzt wird und wie nahe es dem Bereich der Dauerschwingfestigkeitsgrenze liegt. Anhand dieser Informationen kann der Konstrukteur entscheiden, welche Sicherheitsfaktoren im jeweiligen Prozess einzuhalten sind.

### Beurteilung der Druckbelastung



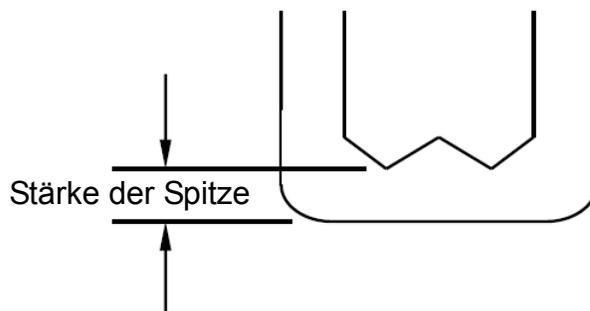
Die letzte erforderliche Prüfung zur Bestimmung der Eignung der Schutzrohr-Auslegung für die jeweilige Anwendung ist die Beurteilung der Druckbelastung. Diese wird oft übergangen, da dieser Faktor gewöhnlich keine Ursache einer Nichteignung aufgrund der Auslegung ist. Es handelt sich hierbei jedoch um einen wichtigen Schritt. Die Druckbelastungs-Prüfung muss separat sowohl am Schaft als auch an der Spitze durchgeführt werden.

Zur Berechnung des auf den Schaft wirkenden Drucks als eine Prüfung der Eignung des Schutzrohrs stehen basierend auf dem Prozessdruck zwei Methoden zur Verfügung. Bei Prozessdrücken unter 103 MPa (15 ksi) empfiehlt ASME PTC 19.3 TW-2010 die Verwendung des ASME Kessel- und Druckbehältercodes (BPVC), Abschnitt VIII, Paragraph UG-28, für die Berechnung des zulässigen externen Drucks. Die Temperatureinschränkungen in diesem Abschnitt des BPVC treffen nicht zu, da die meisten Schutzrohre gemäß ASME B31.1 oder ASME B31.3 ausgelegt sind. Die maximal zulässigen Belastungswerte sollten statt dessen von einem dieser beiden Standards gewählt werden. Der Grund dafür, dass die Berechnung vom BPVC in ASME PTC 19.3 TW-2010 erwähnt wird, liegt darin, dass diese Gleichung in der Vergangenheit erfolgreich angewendet wurde und in der Branche relativ gut bekannt ist.

Falls der gewünschte Schutzrohr-Werkstoff nicht in den BPVC aufgeführt ist oder wenn eine einfachere Methode gewünscht wird, bietet ASME PTC 19.3 TW-2010 ein alternatives vereinfachtes Verhältnis. Der Nachteil der vereinfachten Methode liegt darin, dass der mit dieser Methode ermittelte Schaftdruck um bis zu 17 % niedriger sein kann als der Wert, der mithilfe der UG-28 Methode für manche Werkstoffe bei bestimmten Temperaturen berechnet wurde. Der Vorteil ist eine weniger komplexe Berechnung und ein zusätzlicher Sicherheitsspielraum.

Bei Anwendungen mit hohem Druck ( $> 103 \text{ MPa}$  [15 ksi]) verweist ASME PTC 19.3 TW-2010 für die Berechnung auf ASME BPVC, Abschnitt VIII, Division 3 oder ASME B31.3, Kapitel IX. Diese hohen Drücke (die die Druckgrenzen für die Class 2500 Flansche in ASME B16.5 überschreiten) müssen besonders sorgfältig beurteilt werden, d. h. es darf kein automatisiertes Tool verwendet werden.

Die Spitzenstärke ist das dünnste Maß von der äußeren Spitze zum am weitesten entfernt gelegenen Punkt des Bohrers. Da die meisten Schutzrohre mithilfe eines Tieflochbohrers hergestellt werden, ist es sehr wichtig, dass für die Stärke der Spitze der tatsächliche Messwert für die dünnste Stelle verwendet wird. Das Spitzenmaß wird verwendet, um die Sensorlänge zu berechnen, da der Spitzenwert den Sensor berührt und nicht das „Tal“. Wenn der Tieflochbohrer scharf ist, dann das „Tal“ bis zu 1,5 mm (0,060 in.) tiefer (dünner) sein und es wird mit zunehmendem Verschleiß des Bohrers dicker.



*Detail der Stärke der Schutzrohrspitze*

Der maximale Druck, dem das Schutzrohr standhalten kann, ist der geringere der Druckgrenzwerte für den Schaft oder die Spitze.



**WICHTIGER HINWEIS:**

Unabhängig davon, ob ASME PTC 19.3 oder ASME PTC 19.3 TW-2010 angewendet wird, bezieht sich die Beurteilung der Druckbelastung nur auf den Druck, dem der Schaft und die Spitze des Schutzrohrs – und nicht das Gewinde oder der Flansch – standhalten kann. Die Auswahl des Prozessanschlusses und die Beurteilung der Druckstufe müssen vor der Beurteilung der Schutzrohr-Ausführung auf durch Wirbel erzeugte Schwingungen durchgeführt werden.

**Werkstoff-Informationen**

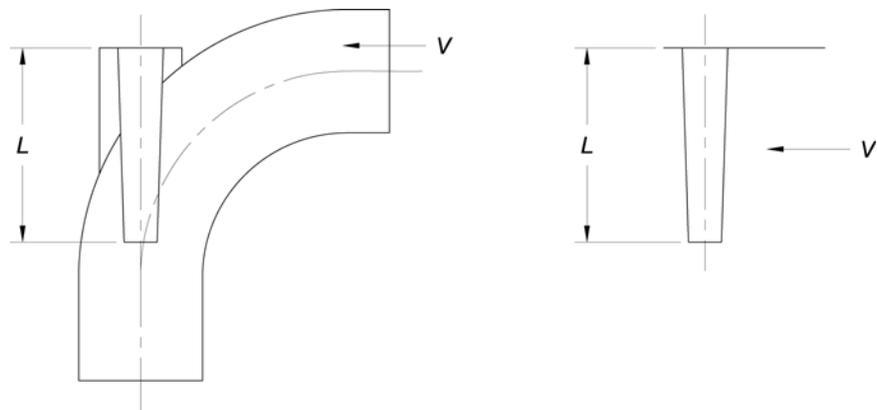
Die beste Ingenieurspraxis für Werkstoff-Informationen ist, sofern möglich, die Verwendung zuverlässiger und standardisierter Informationen. Emerson verwendet ausschließlich Werkstoff-Informationen von Open-Source-Standards wie dem ASME Kessel- und Druckbehältercode (BPVC) und ASME B31.1/B31.3. Diese Informationen sind generell bewährt und in der Branche anerkannt. Theoretisch könnte Emerson die Informationen der Lieferanten in seine Werkstoff-Datenbank einpflegen. Davon wird jedoch abgeraten, da Emerson nicht gewährleisten kann, dass eine bestimmte Werkstoff-Charge für ein bestimmtes Schutzrohr verwendet wurde, um einem bestimmten Bericht zu entsprechen. Dies ist daher keine praktische oder zuverlässige Methode zur Optimierung der Leistung von Schutzrohren.

**EINBAUBEDINGTE ABWEICHUNGEN**

Die Art des Einbaus von Schutzrohren in den Prozess kann sich beträchtlich auf die Festigkeitsberechnungen und die Wirbelablösung eines Schutzrohrs auswirken. Die hier beschriebenen Variationen gehen über die „Standardversionen“ wie Flansch-, Gewinde- und Einschweiß-Ausführungen oder die teilweise Abstützung des Schutzrohrs hinaus.

**Einbau in einen Leitungsbogen**

ASME PTC 19.3 TW-2010 enthält keine brauchbaren Aussagen für den Einbau eines Schutzrohrs in einen Leitungsbogen. Die Modellierung des Durchflusses in einem Bogen ist aufgrund der Turbulenzen und Komplexität besonders schwierig. ASME PTC 19.3 TW-2010 schlägt zur Sicherheit vor, die gesamte freitragende, nicht abgestützte Länge, als dem fließenden Prozessmedium ausgesetzte Eintauchlänge zu betrachten, mit senkrecht (d. h. „normal“) auf die Schutzrohrachse wirkenden Kräften. Für viele Anwender ist dies keine akzeptable Lösung. Einige Kommentare in ASME PTC 19.3 TW-2010 und Diskussionen in diesem Ausschuss bieten eine Alternative zu dieser übermäßig konservativen Sichtweise. Wenn die Spitze ausreichend weit in der Einlauf- oder Auslaufstrecke von dem Leitungsbogen entfernt ist, so dass das Medium parallel zur Achse des Schutzrohrs fließt, dann ist die Strouhal-Zahl sehr klein, da der Fluss über die Spitze vernachlässigbar ist. ASME PTC 19.3 TW-2010 gibt an, dass dies über den Geltungsbereich des Standards hinausgeht. Andere in der Branche behaupten jedoch, dass diese Einbauart eine einfache Lösung für Schutzrohr-Ausführungen sein würde, die zu nahe an ihrer Eigenfrequenz funktionieren.

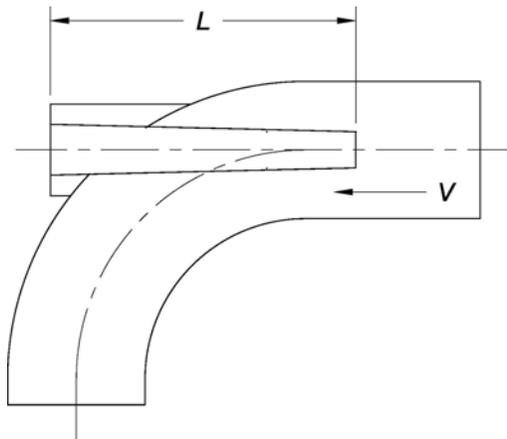


*In einem Leitungsbogen installiertes Schutzrohr mit zur Auslaufstrecke weisenden Spitze.<sup>(1)</sup>*

(1) ASME-Standard, Leistungstestcodes 19.3TW-2010.

# Schutzrohre

ASME PTC 19.3 TW-2010 legt nahe, dass der Einbau des Schutzrohrs in Richtung Einlaufstrecke eine bessere Einbaulösung bietet, da durch die Durchflussmenge und Strömungsrichtung ein kleinerer Hebelarm und weniger Kraft auf das Schutzrohr wirkt und der Fluss über die Spitze laminarer ist. Wenn die Spitze zur Auslaufstrecke weist, kann der sich nach dem Passieren des Schutzrohrs bildende Flüssigkeitsstrudel über die Spitze erstrecken. Dies ist jedoch schwer in einem Modell darzustellen. Wie bei dem nachfolgend beschriebenen angewinkelten Einbauarten ist die Berechnung des Hebelarms kompliziert und Änderungen der Kraft, des Hebelarms und der Belastung sind nicht einfach vorherzubestimmen.



*In einem Leitungsbogen installiertes Schutzrohr mit zur Einlaufstrecke weisenden Spitze.<sup>(1)</sup>*

Emerson erwägt eine intensivere Überprüfung dieser Einbaumethoden, um Begründungen für die Vorteile dieser Lösungen bereitstellen zu können.

## Angewinkelter Einbau

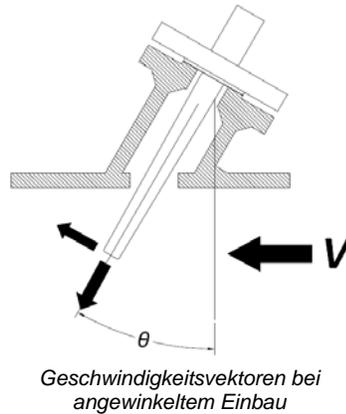
Unsere Kunden setzen Schutzrohre für leichteren Zugang, zur Reduzierung der auf das Schutzrohr wirkenden Kräfte oder für größeren Kontakt mit dem Prozessmedium bei kleineren Nennweiten häufig in einem Winkel zur Strömungsrichtung ein, um so eine genauere Temperaturmessung zu erzielen. Der Einfluss dieses „Anströmwinkels“ auf die Fließgeschwindigkeit an der Spitze ist keine einfache Trigonometrie und kompliziert zudem die Vorherbestimmung der auf das Schutzrohr wirkenden Belastungen und Kräfte.

Wenn sich der Einbauwinkel ändert, wird die Geschwindigkeit des über die Spitze strömenden Prozessmediums reduziert.

$$V_{\text{Quer zur Achse}} = V_{\text{Durchfluss}} \cdot \cos(\theta) \text{ für } \theta \text{ bis zu } 30^\circ \text{ }^{(2)}$$

(1) ASME-Standard, Leistungstestcodes 19.3TW-2010.

(2) S. E. Ramberg, „The Effects of Yaw and Finite Length upon the Vortex Wakes of Stationary and Vibrating Cylinders“ (Einflüsse der Anströmung und finiten Länge auf Wirbelschleppen stationärer und schwingender Zylinder), *Journal of Fluid Mechanics* 128, 81-107 (1983).



Wenn sich der Winkel an  $0^\circ$  nähert, erreicht die Geschwindigkeitskomponente an der Spitze den Wert 1 oder 100 % der Fließgeschwindigkeit. Dies kann zur Reduzierung der Strouhal-Zahl bei Installationen hilfreich sein, bei denen Belastungen kein limitierender Faktor sind.

Diese Logik gilt jedoch nicht für die auf das Schutzrohr wirkenden Kräfte. Wenn der Winkel geändert wird, vergrößern sich der Oberflächenbereich, die der Strömung ausgesetzte Länge des Schutzrohrs und damit auch die Reibungskräfte. Der Flüssigkeitsfluss um das Schutzrohr lässt sich immer schwerer im Modell darstellen,

und daher können die Änderungen bzgl. Kraft, Momentarm und Belastung nicht leicht vorherbestimmt werden. ASME PTC 19.3 TW-2010 besagt, dass dies außerhalb des Geltungsbereichs des Standards liegt. Emerson erwägt jedoch eine intensivere Überprüfung dieser Einbaumethode, um Begründungen für die Vorteile dieser Lösung bereitstellen zu können. Bei manchen schwierigen Kundenanwendungen kann dies die einzig mögliche Einbaumethode sein.

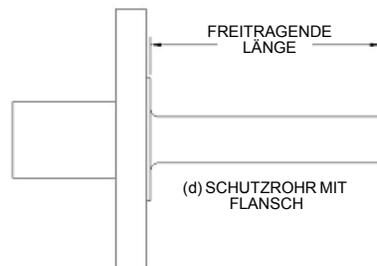
### Eckige Kanäle und runde Rohrleitungen

Da der neue Standard durchschnittliche Geschwindigkeiten verwendet, sind keine Kenntnisse über das Strömungsprofil in eckigen Kanälen oder deren Modellierung bzw. über die Unterschiede zu runden Rohrleitungen erforderlich. Die einzigen Faktoren, die der Konstrukteur kennen muss, um die durchschnittliche Geschwindigkeit zu berechnen, sind die Massedurchflussrate, die Dichte und die Querschnittsfläche. Weitere Erläuterungen sind im Abschnitt „Durchschnittliche Geschwindigkeit“ zu finden.

### DEFINITION DER FREITRAGENDEN LÄNGE

Die Definition der freitragenden Länge wurde mit der Veröffentlichung der ASME PTC 19.3 TW-2010 geändert. Das in der ASME PTC 19.3 TW-2010 verwendete Balkentheorie-Modell ist sehr empfindlich gegenüber Änderungen der freitragenden Länge. Daher ist es erforderlich, die Definition klar und einheitlich zu formulieren.

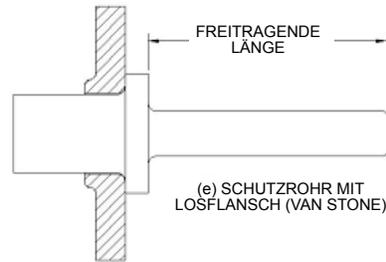
Bei Schutzrohren mit Flansch (einschl. Losflansch/Van-Stone-Flansch) ist die Eintauchlänge gleich der freitragenden Länge.



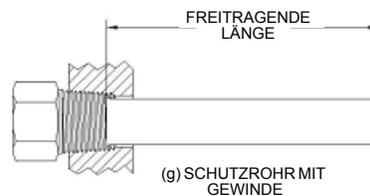
Schutzrohr mit Flansch<sup>(1)</sup>

(1) ASME-Standard, Leistungstestcodes 19.3TW-2010.

# Schutzrohre



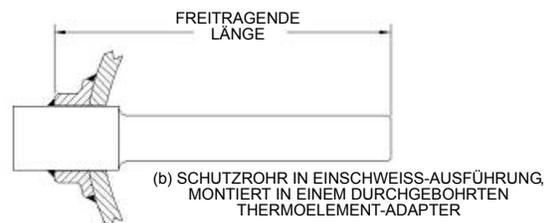
Schutzrohr mit Losflansch/Van-Stone-Flansch<sup>(1)</sup>



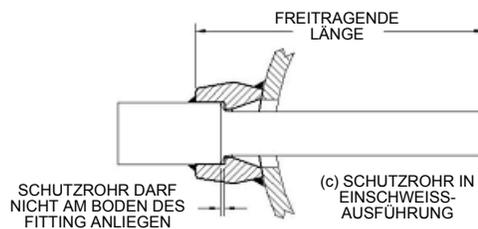
Schutzrohr mit Gewinde<sup>(1)</sup>

Bei Schutzrohren mit Gewinde entspricht die Eintauchlänge der freitragenden Länge. Die Ergebnisse von Experimenten haben jedoch gezeigt, dass die freitragende Länge bei etwa dem 2. oder 3. Gewindegang im Gewindeabschnitt beginnt. Dies wird in ASME PTC 19.3 TW-2010 durch die Anwendung eines Korrekturfaktors für Schutzrohre mit Gewinde berücksichtigt.

Die größte Änderung ist bei eingeschweißten Schutzrohren zu verzeichnen. Die Verwendung der Eintauchlänge verkürzt die freitragende Länge fälschlicherweise und erhöht dadurch die Eigenfrequenz des Schutzrohrs.



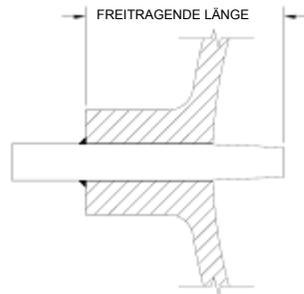
Schutzrohr in Durchgangsbohrung eingeschweißt.<sup>(1)</sup>



Schutzrohr in Einschweiß-Ausführung.<sup>(1)</sup>

(1) ASME-Standard, Leistungstestcodes 19.3TW-2010.

Die korrekte Stelle, ab der die freitragende Länge zu berechnen ist, ist die Schweißstelle. Da diese jedoch Emerson nicht exakt bekannt ist, muss für die Berechnung die Schweißstelle geschätzt oder die Gesamtlänge des Schutzrohrs verwendet werden. Dadurch ist gewährleistet, dass die Berechnung unabhängig von der Einbauart des Schutzrohrs eine sichere, konservative Grundlage ist.



Schutzrohr in  
Einschweiß-Ausführung gem.  
DIN 43772.

Als Alternative kann eine Markierungslinie auf dem Schutzrohr angebracht werden, die anzeigt, wo geschweißt werden muss, um die Genauigkeit oder Sicherheit der Berechnung zu gewährleisten. Dies ist aufwendiger und die Abmessungen der Aufnahme müssten bekannt sein.

Ein besonderer Fall, bei dem die freitragende Länge bekannt sein muss, sind Schutzrohre in Einschweiß-Ausführung gem. DIN 43772. Diese sind für eine in eine Rohrleitung gebohrte Bohrung mit geringer Toleranz und ein Schutzrohr in Stangenausführung

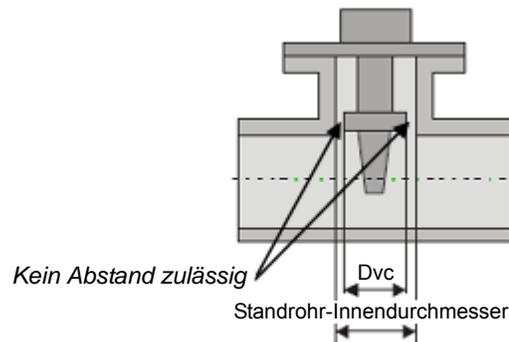
mit geringer Bearbeitungstoleranz ausgelegt. Aufgrund dieser bei der Installation zu beachtenden Toleranz ist es nicht möglich, einen Presssitz zu gewährleisten, der erforderlich sein würde, um die freitragende Länge zu bewegen (siehe Abschnitt „Eintauchkragen“). Wenn keine anderen Informationen bekannt sind, wird die freitragende Länge für diese Einbauart gemäß der links abgebildeten Detaildarstellung definiert.

## EINTAUCHKRAGEN

Die Verwendung von Eintauchkragen (oder Frequenzkragen) wird ebenfalls in ASME PTC 19.3 TW-2010 behandelt. Der Standard gibt an, dass Eintauchkragen als starre Abstützung zur Verkürzung der freitragenden Länge nicht empfohlen werden. Dies kann nur durch die Verwendung eines Presssitzes erzielt werden. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Verschiebung der Schutzrohrspitze normalerweise sehr gering ist (weniger als 0,5 mm)<sup>(1)</sup> <sup>(2)</sup> und dass jeglicher Abstand zwischen dem Kragen und dem Innendurchmesser des Standrohrs verhindert, dass der Kragen die effektive freitragende Länge reduziert. Zudem verformt sich das Schutzrohr bzw. das Standrohr kontinuierlich weiter, genauso wie beim wiederholten Schlagen eines Hammers auf eine Metallfläche, und der Abstand vergrößert sich, bis kein Kontakt mehr besteht. Dabei kann es aufgrund der Dellen zur Bildung von Belastungszonen im Schutzrohr kommen bzw. die möglicherweise in der Nähe des Kragens befindlichen Schweißnähte können mit der Zeit brechen. Der Kragen muss einen Presssitz aufweisen, um effektiv zu sein, und da Emerson die endgültige Passung nicht garantieren kann, empfehlen wir anstelle der Verwendung von Kragen Modifikationen der Geometrie oder Einbauart, um die Prozessanforderungen zu erfüllen.

- (1) Finch, P., Hamblin, M., und Constable, D., „In-situ Measurement of Thermowell Vibration during Production Train Pressurisation“ (In-Situ-Messung von Schutzrohr-Schwingungen während der Druckbeaufschlagung der Produktionsstraße), Woodside Energy Ltd. Report (Datum nicht bekannt – nach 2001 und vor 2010).
- (2) Haslinger, K.H., Westinghouse Electric Company, „Flow-induced vibration testing of replacement thermowell designs“ (Prüfung von Austausch-Schutzrohren auf durchflussinduzierte Schwingungen), Journal of Fluids and Structures (2003).

## Schutzrohre

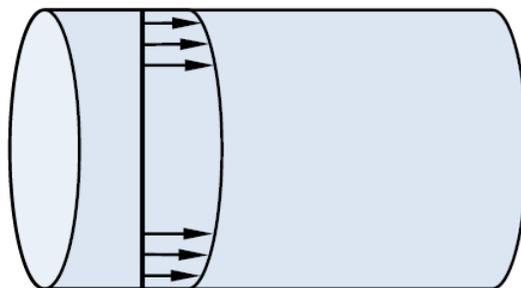


*Zwischen dem Kragen und dem Innendurchmesser des Standrohrs darf kein Abstand vorhanden sein.*

Emerson wird weiterhin Schutzrohre mit Eintauchkragen gemäß der Bestellangaben unserer Kunden liefern. Wir lehnen es jedoch ab, Empfehlungen über die Größenauslegung der Eintauchkragen abzugeben und werden keine Berechnungsberichte für Installationen mit Eintauchkragen erstellen. Andernfalls würde dies den Anschein einer Befürwortung dieser Methode erwecken. Schutzrohre in Einschweiß-Ausführung gem. DIN 43772 werden wie Eintauchkragen behandelt, genauso wie anderen Einbauarten mit ähnlicher Zielsetzung.

## DURCHSCHNITTLICHE GESCHWINDIGKEIT UND GESCHWINDIG- KEITSPROFIL

Man könnte davon ausgehen, dass die beste Methode zur Berechnung der auf ein Schutzrohr wirkenden Kräfte die Anwendung der Finite-Element-Analyse (FEA) ist, um ein beträchtliches Maß an Detail und Genauigkeit zu erzielen. Das Problem bei der Anwendung der FEA-Methode ist jedoch, dass sich die Parameter für die Eingänge ständig ändern, so dass die daraus resultierende Genauigkeit den Nutzen von einem Moment zum anderen bei Weitem übersteigt. Sowohl ASME PTC 19.3-1974 als auch ASME PTC 19.3 TW-2010 verwenden eine Durchschnittsgeschwindigkeit bei den Berechnungen. Die Logik hierfür besteht darin, dass der Konstrukteur gewöhnlich die Massedurchflussrate kennt, aber evtl. wenig über das Strömungsprofil über das Rohr weiß. Der Konstrukteur verwendet lediglich die Massedurchflussrate, die Dichte des Prozessmediums und die Querschnittsfläche, um die durchschnittliche Geschwindigkeit zu berechnen. Die Verwendung der durchschnittlichen Geschwindigkeit vereinfacht zudem die Berechnungen, was eine weitgehende Akzeptanz der Anwender fördert.



*Beispiel eines voll entwickelten turbulenten Strömungsprofils in einer Rohrleitung.*

**ANFORDERUNGEN  
AN DIE SCHUTZROHR-  
KONSTRUKTION**

Bei der Berechnung der In-Situ-Eigenfrequenz geht ASME PTC 19.3 TW-2010 davon aus, dass das Schutzrohr aus massivem Stangenmaterial hergestellt ist, damit das einfache Balkenprofil-Modell verwendet werden kann. Der Schaft des Schutzrohrs kann aus geschmiedeten oder profilgewalzten Werkstoffen hergestellt sein, jedoch nicht aus Rohr- oder Röhrenmaterial. Diese Einschränkung bedeutet, dass Schutzrohre mit dreiteiliger Einschweiß-Ausführung oder durch Durchbohren der Spitze hergestellte Schutzrohre mit geschweißter Kappe nicht durch den Standard ASME PTC 19.3 TW-2010 erfasst werden.

Es wird geraten, bei Schutzrohren in Einschweiß-Ausführung voll durchgeschweißte Nähte zu verwenden, um die höchste Festigkeitsklassifizierung zu erzielen (siehe unter „Zulässige Biegewechselbeanspruchungs-Amplitudengrenzwerte“ in ASME PTC 19.3 TW-2010). Geschmiedete Schutzrohre erfüllen diese Anforderungen ohne Schweißnähte, sind jedoch wesentlich teurer. Bei Schutzrohren in Van-Stone-Ausführung wird dies ohne solche Kosten erzielt, diese Art von Schutzrohren wird jedoch nicht von vielen Kunden verwendet.

Eine weitere Erwägung bei der Konstruktion sind die Herstellungstoleranzen der Schutzrohre. Zu große Toleranzen können zu ungenauen Balkengleichungen führen und die in die Gleichungen integrierten Sicherheitsspielräume aufheben. Engere Toleranzen führen jedoch zu einer Erhöhung der Herstellungskosten für Schutzrohre. Für die Abmessungen ist zudem ein Korrosionszuschlag zu berücksichtigen.

# Schutzrohre

---

*Rosemount und das Rosemount Logo sind eingetragene Marken von Rosemount Inc.  
PlantWeb ist eine eingetragene Marke der Unternehmensgruppe Emerson Process Management.  
Alle anderen Marken sind Eigentum ihres jeweiligen Inhabers.*

**Deutschland**  
**Emerson Process Management**  
**GmbH & Co. OHG**  
Argelsrieder Feld 3  
82234 Weßling  
Deutschland  
T+49 (0) 8153 939 - 0  
F+49 (0) 8153 939 - 172  
[www.emersonprocess.de](http://www.emersonprocess.de)

**Schweiz**  
**Emerson Process Management AG**  
Blegistrasse 21  
6341 Baar-Walterswil  
Schweiz  
T+41 (0) 41 768 6111  
F+41 (0) 41 761 8740  
[www.emersonprocess.ch](http://www.emersonprocess.ch)

**Österreich**  
**Emerson Process Management AG**  
Industriezentrum NÖ Süd  
Straße 2a, Objekt M29  
2351 Wr. Neudorf  
Österreich  
T+43 (0) 2236-607  
F+43 (0) 2236-607 44  
[www.emersonprocess.at](http://www.emersonprocess.at)