

7. KÖTTER Workshop

Gasmengenmessung 2014

26. / 27. März 2014

Vortrag 08

**Dynamische Effekte an Temperaturmessstellen in
Gas führenden Rohrleitungen**

Dr.-Ing. Christian Jansen

KÖTTER Consulting Engineers GmbH & Co. KG



1) Einleitung

In Anlagen der Gasprozesstechnik und der chemischen Industrie werden vielfach Informationen über die Temperatur der strömenden Medien benötigt. In diesen Fällen werden Temperatursensoren unter anderem mit Hilfe eines Schutzrohres in Rohrleitungen eingebracht. Dieses Schutzrohr wird auch als Tauchhülse oder Mantelrohr bezeichnet. In der Abbildung 1 sind beispielhaft zwei typische Einbaukonfigurationen dargestellt. Die Aufgabe des Mantelrohrs besteht dabei darin, den Messkopf des Thermometers vor mechanischer Beanspruchung und chemischem Angriff zu schützen. Darüber hinaus erlaubt diese Einbauvariante den Austausch des Messeinsatzes im Betrieb der Leitung.

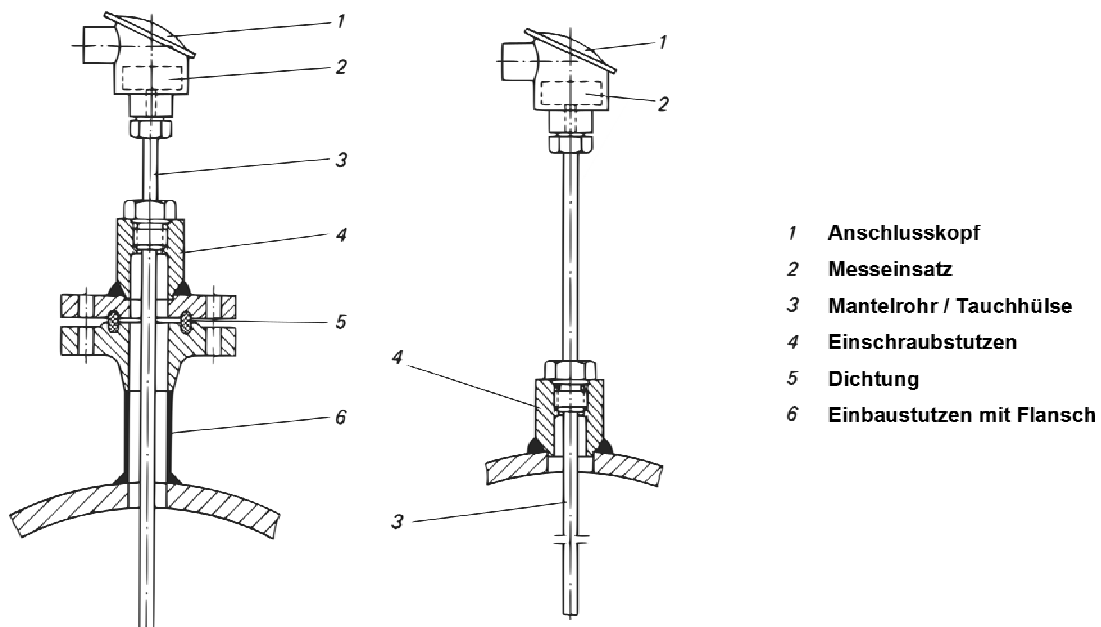


Abbildung 1: Messanordnung mit Schutzrohr (rechts: Einschraubstutzen; links: Flansch mit Einschraubstutzen und Zwischenflansch).

Die maßgebliche statische Beanspruchung des Mantelrohres ergibt sich dabei aus dem Rohrleitungsinndruck und der Strömungsgeschwindigkeit des Mediums. Für die Vorauslegung dieser Messeinrichtungen werden in der DIN 43772 [1] Schutzrohrausführungen für Thermoelemente und Widerstandsthermometer genormt und vereinfachte Berechnungsmethoden angegeben.

Neben statischen Lasten wird das Mantelrohr jedoch auch auf unterschiedliche Arten schwingend belastet. Dabei erfolgt die Bewegung der Tauchhülse sowohl in Strömungsrichtung als auch quer dazu. Dies kann infolge der erhöhten dynamischen Werkstoffbelastung zum Versagen der Messstelle oder auch zum Verlust der Rohrleitungsintegrität führen.

- Zum einen ist beispielsweise im Auslauf von Regelventilen mit stark turbulenten Strömungen zu rechnen. Diese stellen prinzipiell eine breitbandige Anregungsquelle zum Teil bis in den Ultraschallbereich dar. In Bezug auf Strukturschwingungen sind sie unter anderem geeignet, die in die Strömung hineinragenden Einbauten zu Schwingungen anzuregen.
- Des Weiteren treten an den umströmten Schutzrohren unter speziellen Strömungsbedingungen periodische Wirbelablösungen auf (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2:
Periodische Wirbelablösungen hinter einem kreisrunden Störkörper [2].

Während die hochturbulente Anregung durch ein Ventil eine Folge des konstruktiven Aufbaus der technischen Anlage darstellt, ist die periodische Wirbelablösung eine immanente Eigenschaft der Messstelle.

Die ablösenden Wirbel sind mit einer lokalen Absenkung des statischen Druckes verbunden. Diese können mit einem geeigneten Sensor stromab des Störkörpers als periodische Druckschwankungen festgestellt werden.

Die Frequenz, mit der sich diese Wirbel ablösen, verhält sich reziprok zum Durchmesser D_a des Störkörpers und proportional zur Anströmgeschwindigkeit w und der sogenannten Strouhal-Zahl St :

$$f = \frac{St \cdot w}{D_a}$$

Die Strouhal-Zahl ist im Allgemeinen von der Reynolds-Zahl abhängig. Für die Beschreibung der Wirbelablösung an zylindrischen Tauchhülsen in z. B. Erdgas führenden Rohrleitungen kann aus praktischer Erfahrung für technisch relevante Strömungsgeschwindigkeiten in guter Näherung ein konstanter Wert von 0,21 angenommen werden, so dass gilt:

$$f = \frac{0,21 \cdot w}{D_a}$$

Ein aus schwingungstechnischer Sicht kritischer Zustand tritt dann ein, wenn die Wirbelablösefrequenz mit einer strukturdynamischen Biegeeigenfrequenz des Schutzrohres zusammenfällt. In diesem Fall sind überhöhte Schwingungen und Zusatzbelastungen zu erwarten.

Eine explizite Überprüfung dynamischer Lasten ist nicht Bestandteil der DIN 43772, es wird jedoch ein Verfahren zu Abschätzung der meist kritischen Biegeeigenfrequenz einer Tauchhülse vorgestellt. Basierend auf inzwischen überarbeiteten amerikanischen Richtlinien [3] wird der Bereich der zulässigen Strömungsgeschwindigkeit derart eingeschränkt, dass eine Koinzidenz von Wirbelablösefrequenz und Biegeeigenfrequenz vermieden wird. Üblicherweise wird gefordert, dass die Wirbelablösefrequenz mindestens 20 % unterhalb der 1. Biegeeigenfrequenz des Thermometerschutzrohres liegt. Dies berücksichtigt jedoch in keiner Weise breitbandige Anregungsquellen wie z. B. Regelventile.

2) Fallbeispiele

Im Folgenden werden zwei Beispiele aus der Praxis für das Auftreten dynamischer Effekte an Temperaturmessstellen vorgestellt. Im ersten Fall wurde eine Messstelle dynamisch überbeansprucht und fiel wiederholt aus. Im zweiten Beispiel konnte eine schwingende Tauchhülse über die Schallemissionen identifiziert werden.

2.1 Wiederholtes Versagen einer Temperaturmessstelle

In einer Mess- und Regelanlage für Erdgas befinden sich stromab der Regelventile Temperaturmessstellen in Form von Widerstandsthermometern in Tauchhülsen. Bereits nach kurzer Betriebszeit wurden wiederkehrende Ausfälle der Messstellen beobachtet, ohne dass es zu Leckagen kam. Auch durch die Verwendung anderer Messeinsätze konnte keine wesentliche Verbesserung herbeigeführt werden.

Es wurde vermutet, dass es auf der Station temporär zu erhöhten Rohrleitungsschwingungen kam, in deren Folge die Messeinsätze durch Bruch am Übergang zum Fühlerkopf zerstört wurden.

Um dieses These zu überprüfen, wurde zunächst eine messtechnische Untersuchung in der Anlage durchgeführt. Die folgende Abbildung 3 zeigt auszugsweise den Aufbau der Anlage. Sowohl vor (Druckmesspunkt P1) als auch nach (Druckmesspunkte P2 und P2b) dem Regelventil wurden für die messtechnische Untersuchung Sensoren installiert, um die dynamischen Drücke bestimmen zu können. Im Bereich der Tauchhülse wurden die Rohrleitungsschwingungen (Messpunkt S1) bestimmt. Darüber hinaus wurden die Schwinggeschwindigkeiten unterhalb des Anschlussgehäuses (Messpunkt S2) ermittelt. Um auch Rückschlüsse auf die Werkstoffbelastungen des Messeinsatzes ziehen zu können, wurde dieser am Übergang zum Sockel mit Dehnungsmessstreifen bestückt.

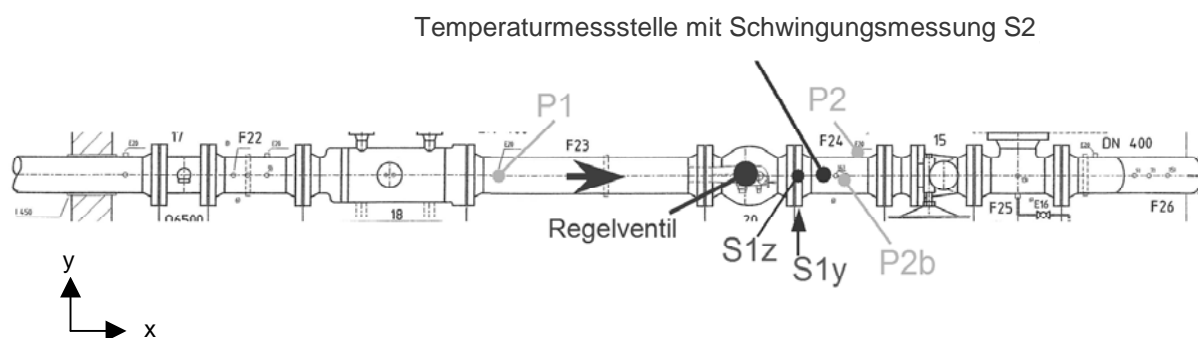


Abbildung 3: Skizze zum Aufbau der Anlage sowie zur Messkonfiguration.

Die Messung der Rohrleitungsschwingungen ergab im untersuchten Volumenstrombereich keinen Hinweis auf unzulässig hohe Schwingwerte. Auch die Schwingungen am Anschlusskopf des Sensors wurden mit Effektivwerten von kleiner 6 mm/s zunächst als nicht ungewöhnlich befunden (Abbildung 4). Sie zeigten sich jedoch auch in Form der Wechselbeanspruchung des Messeinsatzes und erreichten hier betriebspunktabhängig Maximalwerte von mehr als 100 N/mm² (Spitze-Spitze). Dies ist als relativ hoch zu bewerten.

In der weiteren Analyse wurden zwei ausgeprägte Frequenzkomponenten bei 90 Hz und bei 300 Hz festgestellt, die in dieser Form nicht in den Rohrleitungsschwingungen präsent waren.

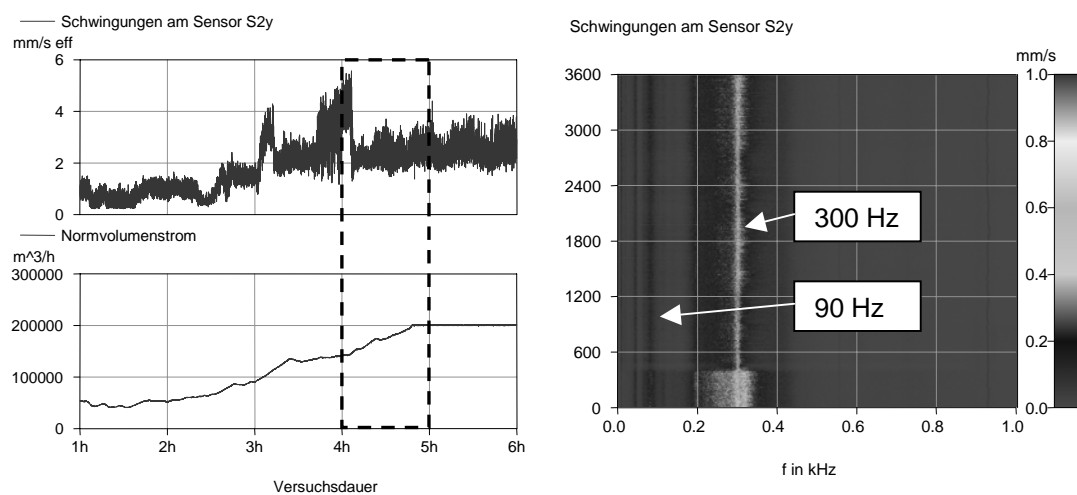


Abbildung 4: Ergebnisse der Schwingungsmessung am Anschlussgehäuse des Temperatursensors (links: Verlauf von Schwingwert und Volumenstrom; rechts: Auszug aus dem Spektrogramm für den Zeitraum 4 h bis 5 h).

Um die dynamischen Eigenschaften des Temperaturfühlers zu bestimmen, wurde ein baugleiches Exemplar im Labor untersucht. Zu diesem Zweck wurde dieses – der Einbausituation ähnlich – an der Einschraubung eingespannt und mittels eines Impulshammers zu Schwingungen angeregt. Dabei wurden beide in der Messung auffälligen Frequenzkomponenten als schwach bedämpfte Biegeeigenfrequenzen identifiziert (Abbildung 5).

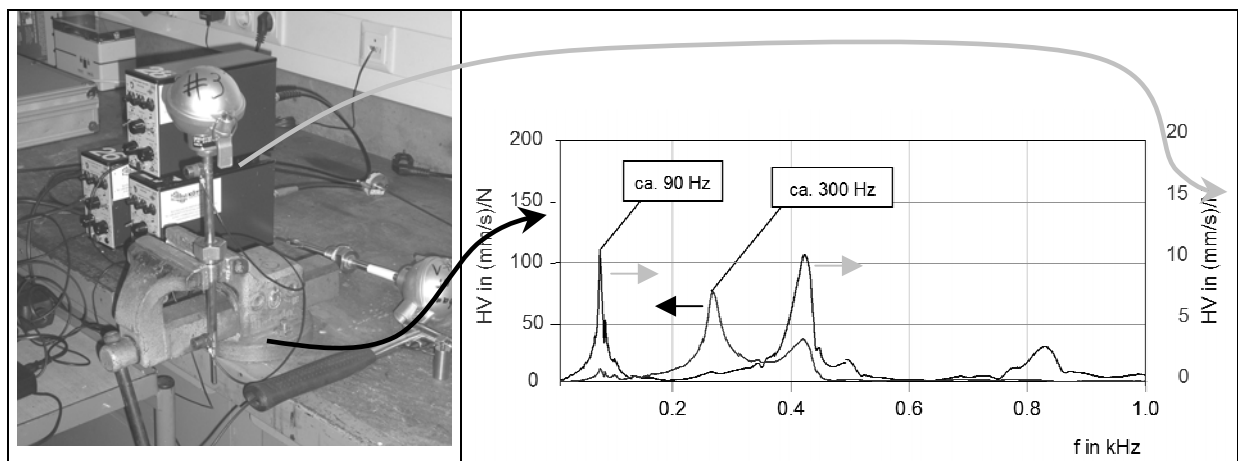


Abbildung 5: Übertragungsfunktion zwischen einer Impulsanregung (Impulshammer) und den resultierenden Schwingungen am Anschlusskopf und am Schutzrohr im ausgebauten Zustand.

Die 90 Hz-Komponente entspricht dabei einer Biegeeigenfrequenz der oberhalb der Einspannung befindlichen Struktur und die 300 Hz-Komponente der Eigenfrequenz des unterhalb der Einspannung befindlichen Teiles (siehe Abbildung 6).

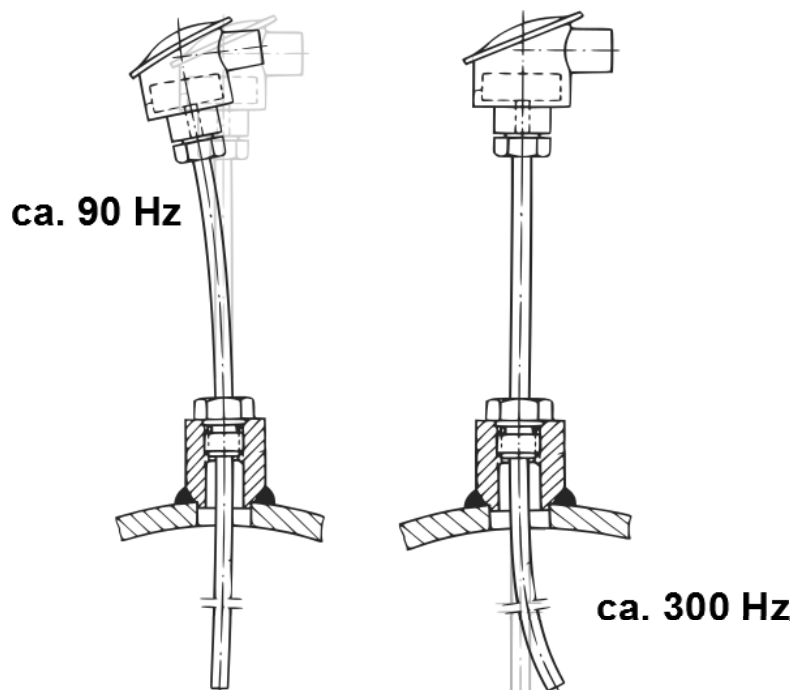


Abbildung 6: Eigenformen des eingespannten Temperaturfühlers.

Bemerkenswert war, dass die Eigenform des unteren Abschnittes bei 300 Hz nur geringe Schwingungen oberhalb der Einspannung erwarten ließ. Im Rahmen der Betriebs-schwingungsmessung konnte die Wirkung dieser Eigenfrequenz jedoch auch am Anschlusskopf nachgewiesen werden. Damit lag die Vermutung hoher Schwingungen an der Spitze der Tauchhülse im Betrieb nahe. Dies wurde auch durch die Schadensanalyse der ausgefallenen Sensoren bestätigt. Der Keramikeinsatz in der Spitze der Sensoren war praktisch pulverisiert (Abbildung 7).

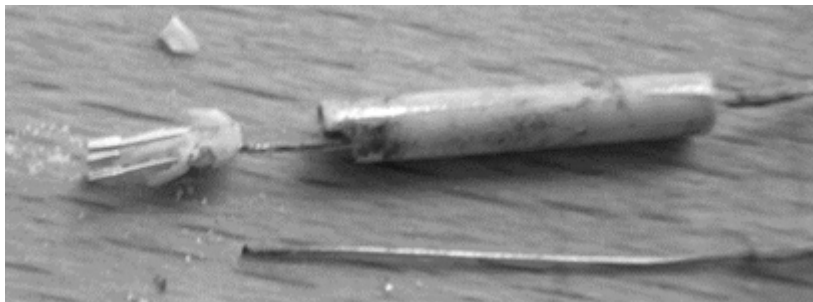


Abbildung 7: Zerörter Keramikeinsatz.

Um die tatsächliche Schwingbeanspruchung im Bereich der Spitze der Tauchhülse im Betrieb zu ermitteln, kann ein extrem kompakter Schwingungssensor mittels einer speziellen Vorrichtung in eine leere Tauchhülse eingebracht werden.

Im Rahmen einer Messreihe wurde dies für die kritischen Schutzrohre mit einem präparierten Schutzrohr in einem Volumenstrombereich von 0 bis 300.000 Nm³/h durchgeführt. Die folgende Abbildung 8 zeigt den Miniatursensor und in Auszügen die gewonnenen Messergebnisse. Mit Effektivwerten von über 350 mm/s wurden extreme Schwinggeschwindigkeiten festgestellt. Dabei fällt jedoch auf, dass die Schwingungen mit Ausnahme einer Überhöhung proportional zum Volumenstrom und damit auch zur Strömungsgeschwindigkeit im Rohr verlaufen.

Eine markante Überhöhung der Schwingungen nur bei einem bestimmten Volumenstrom wurde nicht festgestellt. Damit konnte eine Wirbelablösung an der Tauchhülse als alleinige Ursache ausgeschlossen werden, da in diesem Fall nur beim Zusammentreffen von volumenstromabhängiger Wirbelablösefrequenz und fester Biegeeigenfrequenz erhöhte Schwingungen erwartet werden.

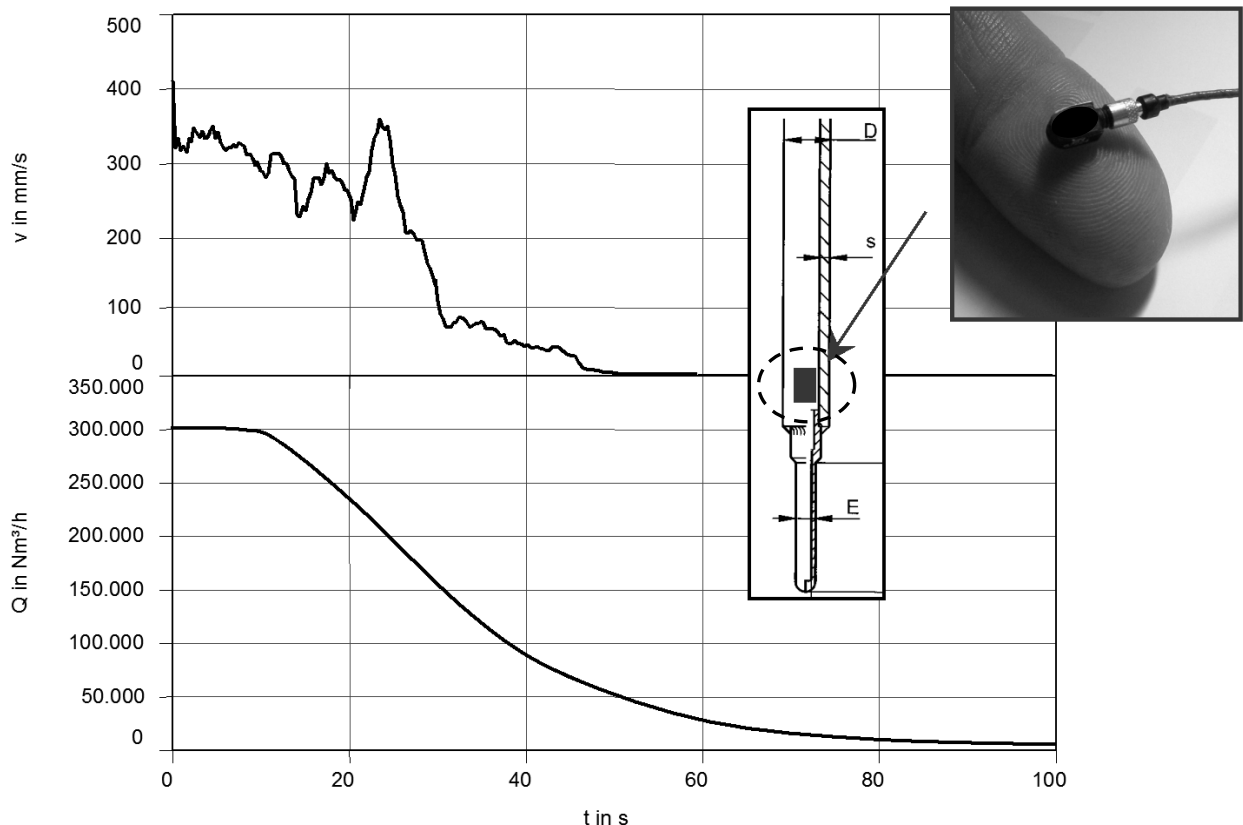


Abbildung 8: Schwingungsaufnehmer in Miniaturbauform; Installationsort in der Tauchhülse und gemessene Schwingwerte bei unterschiedlichen Volumenströmen.

Durch die Bestimmung des Oktavbandspektrums der Druckpulsationen hinter dem Regelventil wurde festgestellt, dass die Turbulenz der Strömung im Bereich der Biegeeigenfrequenzen sehr hoch war (siehe Abbildung 9). Eine Möglichkeit der Schwingungsminderung bestand damit in der Verlagerung der Messstelle weg von der Anregungsquelle. Dies konnte aufgrund der lokalen Gegebenheiten allerdings nur begrenzt umgesetzt werden.

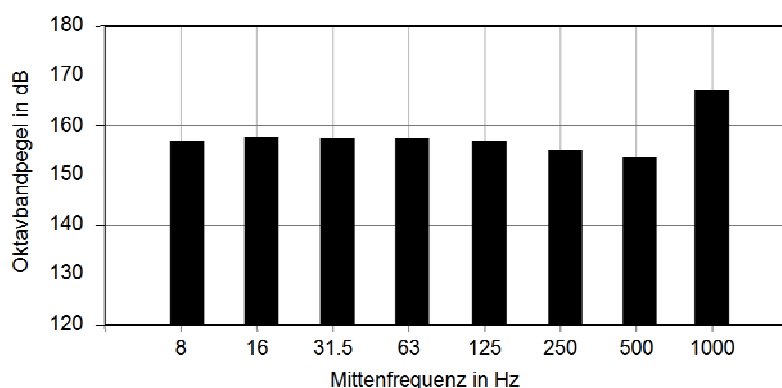


Abbildung 9:
Terzbandspektrum der Druckschwankungen stromab eines 16"-Regelventils.

Durch eine Messung konnte jedoch gezeigt werden, dass bereits eine moderate Vergrößerung des Abstandes zwischen Sensor und Ventil um 400 mm in diesem konkreten Fall zu einer Reduktion der maximalen Schwingungsbelastung der Tauchhülse auf ca. 50 % des ursprünglichen Wertes führte (Abbildung 10).

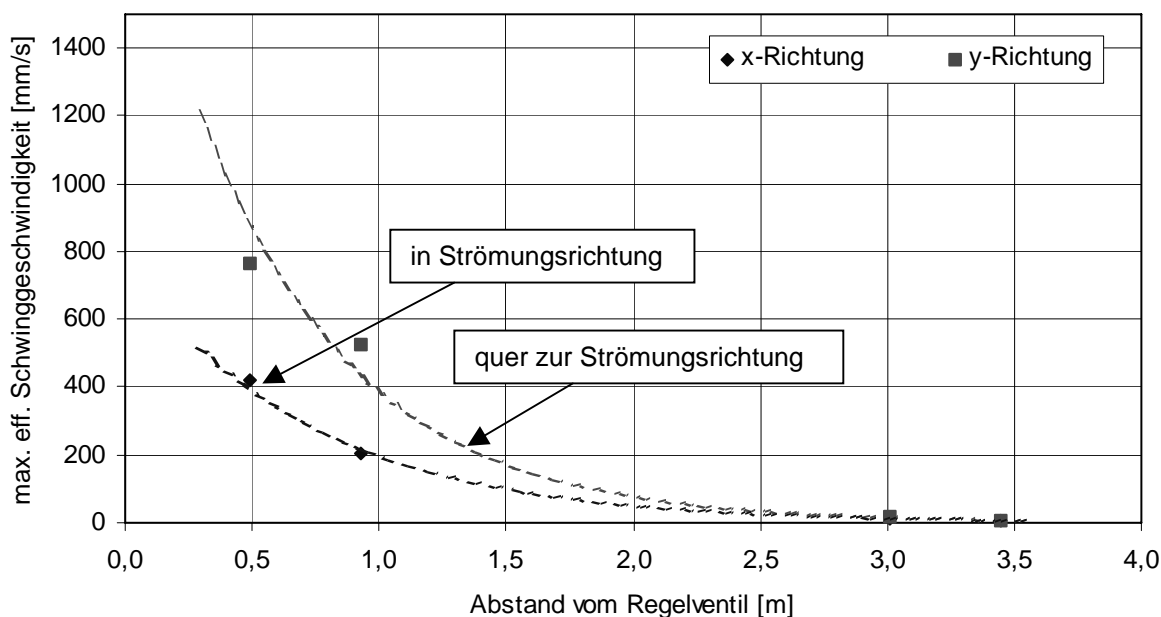


Abbildung 10: Einfluss des Abstandes zwischen Regelventil und Temperaturhülse auf das Schwingungsniveau am Sensorkopf.

In Kombination mit dem Einbau eines verkürzten Schutzrohres, welches eine wesentlich höhere Biegeeigenfrequenz besaß, konnte die maximale Schwingungsbelastung des Sensoreinsatzes schließlich auf etwa 15 % reduziert werden.

2.2 Schallemissionen infolge einer Wirbelablösung

In einer weiteren GDRM wurde ebenfalls eine Temperaturmessstelle hinter einem Regelventil platziert. Der Abstand zwischen der zylindrisch ausgeführten Tauchhülse und der Armatur lag bei ca. 2 m.

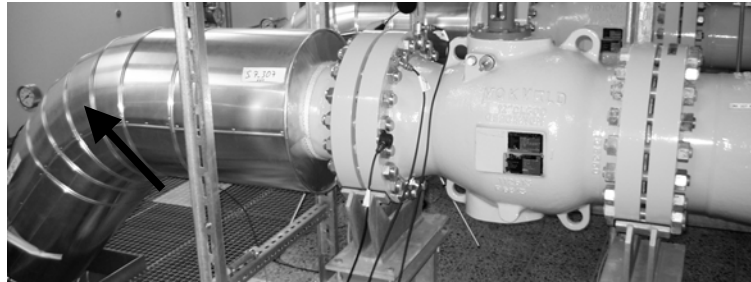


Abbildung 11: Temperaturmessstelle stromab eines Regelventils.

Im Rahmen einer Überprüfung der Anlage auf Einhaltung der Richtwerte für zulässige Rohrleitungsschwingungen wurde durch die ausführenden Ingenieure ein auffälliges Schwingungsverhalten beobachtet. Die folgende Abbildung 12 zeigt die effektive Schwinggeschwindigkeit am Ausgangsflansch des Regelventils. Hinsichtlich der Höhe waren diese Schwingungsgeschwindigkeiten für die Rohrleitung als unkritisch einzustufen. Es zeigte sich aber, dass eine einfache Abhängigkeit der Strukturschwingung vom Volumenstrom und damit auch von der durch das Regelventil eingebrachten Turbulenz nicht festgestellt werden konnte. Tatsächlich gingen die Rohrleitungsschwingungen relativ abrupt zurück. Gleichzeitig konnte eine hörbare Veränderung des Betriebsgeräusches festgestellt werden. Zum Zeitpunkt höherer Schwingwerte war ein Brummen in der Anlage wahrnehmbar.

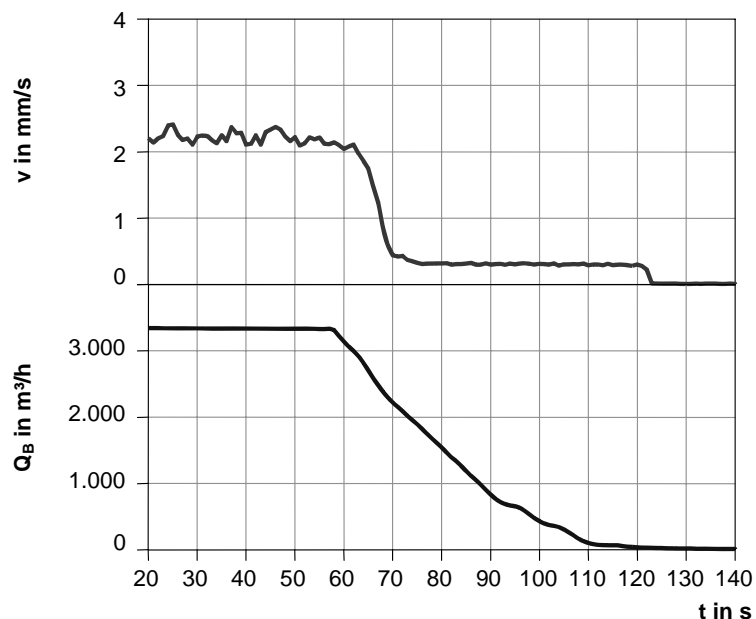


Abbildung 12: Effektive Schwinggeschwindigkeit am Austrittsflansch des Regelventils (oben) über einen Betriebsvolumenstrombereich von 3.300 bis 0 m³/h (unten).

Die Abbildung 13 zeigt den gleichen Vorgang in Form einer Frequenzanalyse sowohl für die Strukturschwingungen als auch für den Schall. Beide Spektrogramme zeigen, dass bis zum Zeitpunkt des Schwingungsrückganges eine einzelne Frequenz bei ca. 115 Hz dominant war und dass diese Schwingungskomponente ab t = 65 s nicht mehr vorhanden war.

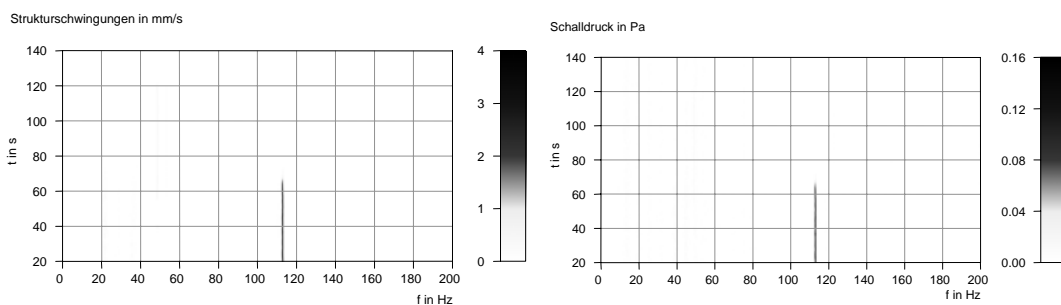


Abbildung 13: Spektrum der Strukturschwingungen (links) und des Schalls (rechts) über einen Betriebsvolumenstrombereich von 3.300 bis 0 m³/h.

Als Ursache für dieses Schwingungsverhalten wurden unter anderem Wirbelablösungen an der Temperaturhülse hinter dem Regelventil vermutet. Um diese These vor Ort zu überprüfen, wurde eine zweite Messreihe mit ausgebauter Tauchhülse durchgeführt. Die Abbildung 14 zeigt, dass bei vergleichbaren Betriebsbedingungen aber ausgebauter Tauchhülse keine ausgeprägte Schwingung bei 115 Hz mehr feststellbar war.

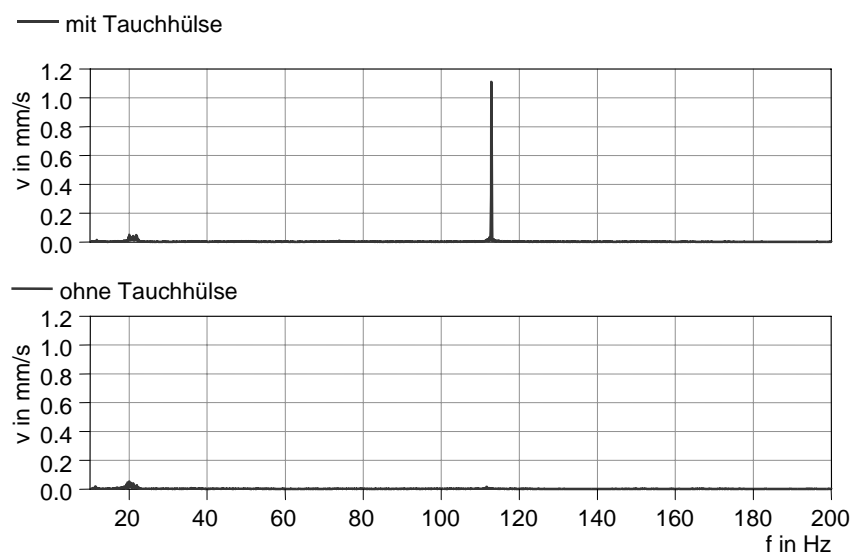


Abbildung 14: Spektrum der Strukturschwingungen am Flansch des Regelventils bei vergleichbaren Betriebsbedingungen mit und ohne Tauchhülse stromab der Regelarmatur.

Da auch in diesem Fall mit einer erhöhten dynamischen Belastung von Messeinsatz und Schutzrohr zu rechnen war, wurde ohne weitere Überprüfung entschieden, die Situation zu verbessern. Zu diesem Zweck wurde die zylindrische Tauchhülse gegen eine konische Ausführung getauscht. Infolge des über die Länge variablen Durchmessers lösen sich an diesen Störkörpern weniger kräftige Wirbel ab. Nach Aussage des Betreibers ist das Phänomen des Brummens seitdem nicht mehr beobachtet worden.

3) **Fazit**

Schwingungsphänomene an Tauchhülsen führen immer wieder zu dynamischen Effekten, die sich in Form von Schäden oder eben auch in Form von Schall bemerkbar machen.

Generell kann man festhalten, dass eine möglichst kurze Bauform der Tauchhülse günstig ist. Dies ist jedoch auch aufgrund bestehender Richtlinien nicht immer umsetzbar. In jedem Fall empfiehlt sich die Vermeidung des Einbaus in der hochturbulenten Zone stromab von Regelventilen. Ist dies nicht vermeidbar, kann eine messtechnische Überprüfung der Schwingungssituation zur Absicherung dienen und den Weg zu einer dauerfesten Messstelle weisen.

Wenn in einer Anlage Ablösungen akustisch in Form eines markanten Einzeltons wahrgenommen werden können, sollte dies hinterfragt werden. Neben sogenannten Schalenmoden und Quermoden wird man dies auch auf Wirbelablösungen an den Schutzrohren der Temperatursensoren zurückführen können. Spätestens dann sollte geprüft werden, inwieweit neben unnötigen Schallemissionen eventuell auch eine Quelle für Fehler in der Durchflussmessung oder sogar eine Ursache erhöhter dynamischer Werkstoffspannungen besteht.

Literaturangaben

- [1] DIN 43772. Leittechnik - Metall-Schutzrohre und Halsrohre für Maschinen-Glaskthermometer, Zeigerthermometer, Thermoelemente und Widerstandsthermometer - Maße, Werkstoffe, Prüfung. 2000
- [2] VAN DYKE, Milton. An album of fluid motion. 1982.
- [3] ASME PTC 19.3 TW-2010. Thermowells. 2010.