

Messung der Schallausbreitung auf einer Hochdruck-Gasleitung

Rolf Schirmacher¹, Robert Baars²

¹ Müller-BBM GmbH, Robert-Koch-Straße 11, 82152 Planegg, Deutschland, Email: Rolf.Schirmacher@MuellerBBM.de

² M+P raadgevende ingenieurs B.V., Visserstraat 50, 1431 GJ Aalsmeer, Niederlande, Email: robertbaars@mp.nl

Einleitung

Eine große Kompressorstation strahlt in ihre (sehr leise) Umgebung einen wahrnehmbaren tieffrequenten Ton bei ca. 160 Hz ab. Um für diese Anlage Lärmschutzmaßnahmen entwickeln zu können, ist die genauere Kenntnis der Schallausbreitung innerhalb der Anlage erforderlich. Dabei zeigt sich, dass die nicht-invasive Bestimmung des Körper- und Fluidschall-Energiestroms auf einer Fluid-gefüllten Rohrleitung eine wesentliche Teilaufgabe darstellt. Diese Messung einschließlich des angewendeten Mess- und Auswerteverfahrens wird nachfolgend vorgestellt.

Anlagen-Eckdaten

Bei der untersuchten Anlage handelt es sich um einen zweistufigen Turbo-Kompressor mit einer Drehfrequenz von 160 – 170 Hz. Auf der Niederdruckseite wird er mit Erdgas mit ca. 55 bar Fernleitungsnetzdruck gespeist und komprimiert dieses auf einen Mitteldruck von ca. 160 bar. Dieses erwärmte Gas wird dann über die Mitteldruck-Druckleitung zu einem großen Luftkühler geleitet und das abgekühlte Gas anschließend auf bis zu 330 bar verdichtet. Die elektrische Antriebsleistung beträgt 38 MW und die Förderkapazität 12 Mio. Norm-m³/Tag. Auf den Anschlussleitungen werden starke Schwingungen bei der Drehfrequenz und ihren höheren Harmonischen sowie ebenso breitbandige Strömungsanregungen gemessen. Der genaue Anregungsmechanismus ist unklar, jedoch ist eine Fluid-Anregung bei Drehfrequenz für Turbo-Kompressoren untypisch. Der Kompressor ist aus Lärmschutzgründen in einem eigenen Maschinenhaus eingehaust, weiterhin ist das Kompressorfundament separat ausgeführt und vom Gebäudefundament, etc, elastisch entkoppelt.

Bei den Zwischenkühlern handelt es sich um großflächige Luftkühler auf einer Stahl-Fachwerkkonstruktion. Kühler und Fachwerk schwingen deutlich bei der Drehfrequenz und sind für die eigentliche Abstrahlung in die Umgebung verantwortlich.

In der sehr leisen Umgebung ist ein Ton bei der Kompressor-Drehfrequenz in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen deutlich hörbar. Der Schalleistungspegel bei dieser Frequenz liegt typisch bei ca. 106 dB re 1 pW, entsprechend einer abgestrahlten Schalleistung von 0,04 W.

Aufgabenstellung

Aus der Aufgabenstellung, die Abstrahlung des Tons bei Drehfrequenz zu mindern, leitet sich die Frage ab, wie die Anregung der abstrahlenden Kühler reduziert werden kann. Dazu ist zunächst der Anregungsmechanismus der Kühler zu

klären. Die Anregung kann sich offensichtlich nur über die Rohrleitungen (und dort offensichtlich vor allem über die Mitteldruck-Druckleitung) ausbreiten. Zu klären ist jedoch noch der genaue dominante Ausbreitungsweg, wozu die Bestimmung des Energiestroms für die verschiedenen Ausbreitungswege bzw. Moden (Körperschallmoden auf der Rohrwand, Fluidschall im Gas) erforderlich ist.

Schallausbreitung auf einer Rohrleitung im Vakuum

Die vollständige Beschreibung der Schallausbreitung auf einer Rohrleitung im Vakuum ist hier nicht möglich. Dazu sei auf die einschlägige Literatur verwiesen.

Die theoretische Beschreibung einer Rohrleitung erfolgt zweckmäßigerweise im Rahmen einer Schalentheorie. Dies führt über die Bewegungsgleichungen zu einer Dispersionsgleichung als Polynom 8. Ordnung in der Wellenzahl für jede Umfangsmodenordnung m . Allerdings weisen die meisten Moden / Wellenformen untere Grenzfrequenzen für ihre Ausbreitungsfähigkeit auf. Im vorliegenden Fall können wir uns auf tiefe Frequenzen beschränken. Stets ausbreitungsfähig sind dabei die folgenden Moden / Wellenformen auf der Rohrwand:

- Torsionswelle ($m=0$ Transversalwelle)
- $m=0$ (Quasi)-Biegewelle (teilweise auch als Dehnwelle bezeichnet, jedoch nicht mit der Longitudinalwelle zu verwechseln)
- $m=1$ Biegewelle in 2 Polarisationsrichtungen, beide zuzüglich Nahfeld.

Schallausbreitung auf einer fluid-gefüllten Rohrleitung im Vakuum

Auch für eine fluid-gefüllte Rohrleitung seien hier nur zusammenfassende Aussagen aufgeführt und darüber hinaus auf die Literatur verwiesen.

Grundsätzlich ist bei der gefüllten Rohrleitung die Fluid-Struktur-Kopplung zu beachten. Dazu ist zu den Bewegungsgleichungen der Schalentheorie die Fluidbelastung hinzuzufügen. In der Dispersionsgleichung treten dann für jede Umfangsmode zusätzlich unendlich viele Radialmoden des Fluids auf, die theoretisch über eine entsprechende Reihenentwicklung berücksichtigt werden können.

Für tiefe Frequenzen ergeben sich folgende ausbreitungsfähige Moden / Wellentypen:

- Torsionswelle, koppelt nicht mit dem Fluid
- $m=0$ (Quasi)-Biegewelle, koppelt stark mit dem Fluid
- $m=1$ Biegewellen mit Nahfeldern, sind Querschnittserhaltend und koppeln daher nur schwach mit dem Fluid

- $m=0$ ebene Fluidwelle, koppelt stark mit der Rohrwand.

Eckdaten der Mitteldruck-Druckleitung

Die Mitteldruck-Druckleitung weist eine Nennweite von DN 400 bei einer Wandstärke von 24 mm auf und ist aus Stahl gefertigt. In ihrem Inneren befindet sich Erdgas mit einem Druck von 160 bar und einer Temperatur von 383 K, woraus sich eine Dichte von $93,7 \text{ kg/m}^3$ und eine Schallgeschwindigkeit im unendlichen Fluid von 481 m/s ergibt.

Berücksichtigt man die Fluid-Struktur-Kopplung in Form der Rohrwandnachgiebigkeit, so verändert sich die Schallgeschwindigkeit praktisch nicht ($c_F/c_F = 0,9992$), das Rohr ist also für das Gas praktisch schallhart.

Die Grenzfrequenz für die Ausbreitungsfähigkeit der ersten höhere Gasmode im Rohrrinneren liegt bei 787 Hz, die Grenzfrequenz für die $m=2$ Biegemode für das Rohr im Vakuum bei 392 Hz und mit Fluidbelastung bei 382 Hz.

Die Berücksichtigung höherer Moden ist damit für die Aufgabenstellung bei 160 Hz nicht erforderlich.

Messungen

An der Mitteldruck-Druckleitung wurden umfangreiche Messungen vorgenommen. Abbildung 1 zeigt den dabei verwendeten Aufbau mit 20 triaxialen Beschleunigungsaufnehmern in 5 Ringen jeweils auf 90° -Positionen. Die Zeitrohdaten dieser 60 Kanäle (sowie weiterer Zusatzkanäle) wurden synchron mit einem PAK MKII Messsystem aufgezeichnet, die anschließenden Darstellungen und Standard-Auswertungen erfolgten ebenfalls mit diesem System. Lediglich für die letzten Auswerteschritte (Wellentrennung, Energiestromberechnung) wurden die Daten exportiert und die Rechnungen in Matlab durchgeführt.

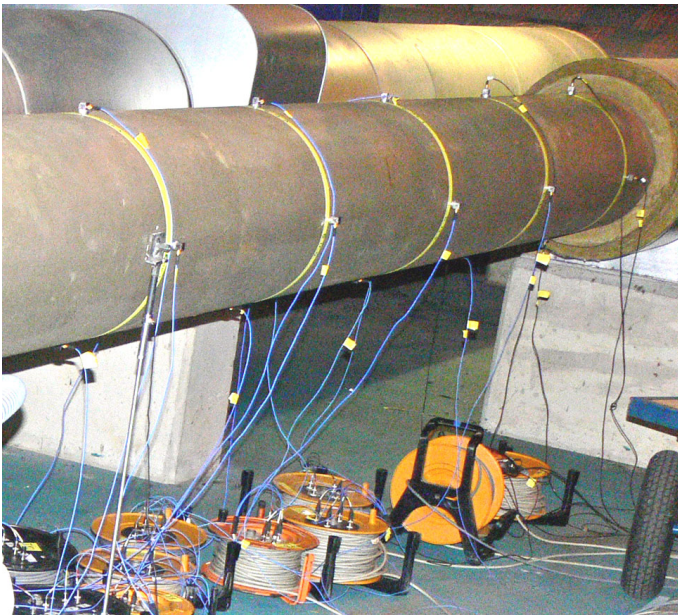


Abbildung 1: Messanordnung an der Gasleitung: 5 Ringe mit je 4 triaxialen Beschleunigungsaufnehmern im 90° -Abstand.

Analysen

Zunächst wurden die gewonnenen Zeitverläufe für jeden Sensor in den Frequenzbereich transformiert. Auf der Grundlage der komplexen Spektren wurde dann die modale Dekomposition der Umfangsmode (Umfangsmodeordnung, axiale/radiale/tangentiale Beschleunigung) für jeden Sensorring durchgeführt. Auf der Grundlage dieser (wiederum komplexen) Amplituden der einzelnen Bewegungsrichtungen je Umfangsmode wurde dann eine Wellentrennung zwischen hin- und rücklaufenden $m=0$ Quasi-BiegeWellen und ebenen Fluidwellen sowie $m=1$ hin- und rücklaufenden BiegeWellen mit Nahfeldern (getrennt für die beiden Polarisierungen) unter Zugrundelegung der theoretischen Wellenzahlen gerechnet. Die daraus folgenden modalen Amplituden können dann mit entsprechenden modalen Impedanzen in Energiestrome der einzelnen Moden / Wellentypen umgerechnet und bilanziert werden.

Ergebnis

Im Mittel über einen typischen Betriebszustand ergeben sich damit folgende Energieströme, wobei positive Energieströme vom Kompressor zum Kühler und negative vom Kühler zum Kompressor laufen:

• Torsion	-0,05 W
• $m=1$ BiegeWelle, Pol. A	0,05 W
• Pol. B	0,49 W
• $m=0$ (Quasi-)BiegeWelle	-0,94 W
• Ebene Fluidwelle	7,23 W
• Gesamtsumme	6,78 W
• (davon abgestrahlte Schalleistung	0,04 W)

Die Energieströme belegen deutlich, dass im vorliegenden Fall der Haupt-Leistungstransport durch den Fluidschall vom Kompressor zu den Kühlern erfolgt. Dieses Ergebnis konnte im vorliegenden Fall durch eine später zur Bestätigung (allerdings nur an einem Punkt) durchgeführte Druckmessung eindrucksvoll bestätigt werden.

Die angewandte Methode der indirekten Energiestrombestimmung einschließlich des Fluid-getragenen Anteils über ausschließliche Messung von Beschleunigungen auf der Rohrwand kann damit als verifiziert und auch im Feld anwendbar gelten.

Literatur

- [1] de Jong, C.: Analysis of pulsations and vibrations in fluid-filled pipe systems, Delft, 1994.
- [2] Pavic, G.: Vibrational Energy Flow in Elastic Circular Cylindrical Shells, JSV 142 (2), 293-310 (1990)
- [3] Pavic, G.: Vibroacoustical Energy Flow through straight Pipes, JSV 154(3), 411-429 (1992)