

Anlagenschwingungen aufgrund thermoakustischer Instabilitäten an Wärmetauschern in GDRM-Stationen

Vibrations Excited by Heat Exchangers – Thermal-acoustic Instabilities as Cause of Increased Pulsations within Gas Metering Stations

Von J. LENZ*

Abstract

With a multitude of technical investigations on the vibration behaviour of gas metering stations a range of different experiences has been gathered by KÖTTER Consulting Engineers (KCE) over the last 10 years. Associated with heat exchangers, flow pulsations were repeatedly discovered. By external observers these pulsations may be optically or acoustically perceived as piping vibrations. Danger to the plant safety arises when the frequency of the pulsations and the structure piping natural vibration coincide. In this case, increased resonant vibrations occur which may certainly lead to damage [1]. The typical structure of a gas metering station consists of one or several operating and standby lines. Usually, the natural gas is heated by the heat exchanger before pressure reduction in order to balance the Joule-Thomson-effect. The co-decisive factors for the origination of pressure pulsations are - in addition to the gas natural characteristics - the geometry of the piping and the location and type of the actual excitation source.

With the technical investigations performed up to the present, increased pulsations were repeatedly discovered between the control valve of the operating line and the standby line. This is illustrated on the basis of measurement results of a performed investigation.

The phenomenon of the acoustic resonance and the co-related piping vibrations or also the influencing of the upstream flow measurement device is well known. Up to now, it was unclear why increased pulsations occur through the heat exchanger as a factor of the gas heat-up and why they change in their intensity depending on the applied heat volume. After analysis of all data available, this has now been attributed to a thermal-acoustic instability. In this case and as result of the local heat input in the heat exchanger, a

pressure fluctuation occurs which builds itself up to an acoustic resonance as a result of the reflections in the piping system, e.g. at the control valves.

The principle of this action - that is subject to the thermal-acoustic effect - is presented on the basis of an experiment. The thermal-acoustic effect in a theoretical observation with regard to the excitation of acoustic resonances in a gas metering station is analysed in more detail.

Finally, reduction measures on the basis of the processed results are presented both for the planning phase of new plants as well as for existing plants.

Kurzfassung

Auf Basis einer messtechnischen Untersuchung an einer bestehenden GDRM-Anlage und einem angepassten Experiment konnte erstmalig nachgewiesen werden, dass je nach Positionierung des Wärmetauschers thermoakustische Instabilitäten die Ursache erhöhter Druckpulsationen sind. Tritt darüber hinaus eine Übereinstimmung der Druckpulsationsfrequenz mit einer strukturmechanischen Eigenfrequenz des Rohrleitungssystems auf, kann dies auch zu schwerwiegenden mechanischen Schäden führen [1].

Zur Vermeidung dieser Phänomene werden Möglichkeiten und Empfehlungen zur Maßnahmenauslegung sowohl an bestehenden als auch an geplanten Neuanlagen aufgezeigt.

1 Einleitung

Bei einer Vielzahl der von KÖTTER Consulting Engineers (KCE) in den letzten 10 Jahren durchgeführten Untersuchungen zum schwingungstechnischen Verhalten von Gasdruckregel- und Messstationen (GDRM-Stationen) wurden verschiedenste Erfahrungen gesammelt. Dabei konnten immer wieder im Zusammenhang mit Wärmetauschern auftretende Gassäulen-

schwingungen festgestellt werden, die vom außenstehenden Betrachter als Rohrleitungsschwingungen optisch oder auch akustisch wahrgenommen werden. Zu einer Gefährdung hinsichtlich der Anlagensicherheit kommt es in der Regel jedoch erst dann, wenn die Frequenz der Gassäulenschwingung und der strukturmechanischen Rohrleitungseigenfrequenz übereinstimmen. In diesem Fall treten resonante Schwingungserhöhungen auf, die durchaus auch zu erheblichen Schäden führen können [1].

Der typische Aufbau einer Gasdruckregelstation besteht aus einer oder mehreren Betriebs- und Reserveschienen. In der Regel wird das Erdgas vor der Druckreduzierung durch den Wärmetauscher erhitzt, um mit dem Druckabfall und dem unvermeidlichen Joule-Thomson-Effekt eine zu tiefe Absenkung der Gastemperatur zu vermeiden. Mitentscheidend für die Entstehung von Gassäulenschwingungen – auch als Druckpulsationen bezeichnet – sind neben den Gaseigenschaften die Geometrie der Rohrleitung sowie Ort und Art der eigentlichen Anregungsquelle.

Bei den bisher durchgeführten messtechnischen Untersuchungen wurden immer wieder erhöhte Gassäulenschwingungen zwischen dem Regler, der durchströmten Betriebsschiene und dem Regler der benachbarten nicht durchströmten Reserveschiene festgestellt. Dies wird nachfolgend anhand von Messergebnissen einer durchgeführten Untersuchung dargestellt.

Das Phänomen der akustischen Resonanz und der damit verbundenen Rohrleitungsschwingungen ist länger bekannt. Unklar war bisher, warum in Abhängigkeit der Gaserwärmung durch den Wärmetauscher erhöhte Druckpulsationen auftreten und sich in ihrer Intensität in Abhängigkeit der zugeführten Wärmemenge verändern. Dies konnte nach Analyse aller vorliegenden Daten auf eine thermoakustische Instabilität zurückgeführt werden. Dabei tritt durch die lokale Wärmezufuhr im Wärmetauscher eine Druckschwankung auf, die sich durch die Reflexionen im weiterführenden Rohr-

* Dr. Johann Lenz, KÖTTER Consulting Engineers KG, Rheine (E-mail: Johann.Lenz@koetter-consulting.com).

0179-3187 09 4

© 2009 URBAN-VERLAG Hamburg/Wien GmbH

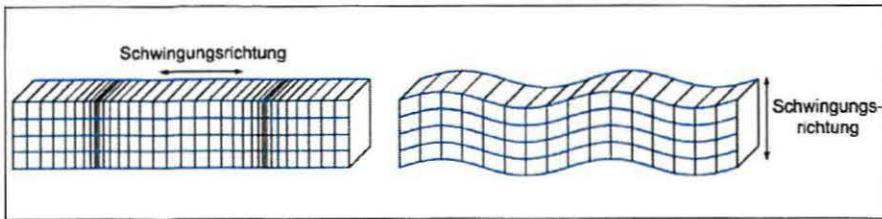


Abb. 1 Akustische Wellenausbreitung in Längs- und Querrichtung

leitungssystem zu einer akustischen Resonanz aufbaut.

Das Prinzip dieses thermoakustisch bedingten Vorganges wird anhand eines auf die Problemstellung angepassten Experimentes vorgestellt. Anschließend wird dieser Effekt in einer theoretischen Betrachtung hinsichtlich der Anregung akustischer Resonanzen in einer Gasdruckregelstation näher analysiert. Auf Basis der erarbeiteten Ergebnisse werden Minderungsmaßnahmen sowohl für die Planungsphase von Neuanlagen als auch für bestehende Anlagen vorgestellt.

2 Akustische Grundlagen

Ein Unterscheidungsmerkmal verschiedener akustischer Wellen ist deren Ausbreitungsrichtung innerhalb der Rohrleitung. Neben einer Ausbreitungsrichtung »längs« in Rohrleitung ist auch die Ausbreitung »quer« zur Rohrleitungsrichtung möglich (Abb. 1).

Die sich ausbreitenden Wellen werden z. B. an Einbauten oder Umrandungen reflektiert. Durch Überlagerung von einfallenden und reflektierten Wellen können sich sowohl in Längsrichtung (»Plane Wave«) als auch in Querrichtung akustische Resonanzen (»Diametrical« oder »Annular Mode«) ausbilden. Die Quermodenfrequenzen sind in der Re-

gel als hochfrequent einzustufen und daher eher mit erhöhter Lärmbelastigung verbunden. Demgegenüber stehen die niederfrequenten akustischen Moden in Längsrichtung des Rohrleitungsverlaufes, auch als »Longitudinalwellen« oder »eindimensionale Längswellen« bezeichnet. Beispielhaft ist an einer typischen Gasdruckregelstation – bestehend aus einer Betriebs-, einer Reserveschiene mit jeweiligem Wärmetauscher (WT), Sicherheitsabsperrentilen (SAV) und Druckregler (DR) – der erste akustische Längsmodus mit der dynamischen Druck- und Geschwindigkeitsschwankung dargestellt (Abb. 2).

Auf der Grundlage der eindimensionalen Wellengleichung ist der Geschwindigkeitsverlauf v und der dynamische Druckverlauf p in der ersten akustischen Resonanz in Längsrichtung dargestellt. So ergibt sich sowohl am Druckregler der durchflossenen Betriebsschiene als auch am Druckregler der nicht durchflossenen Reserveschiene ein akustisch geschlossenes Ende als Reflektionsstelle, an der die Geschwindigkeitsschwankung Null ist und die Druckschwankung einen maximalen Wert aufzeigt.

Der sich einstellende Verlauf der Druck- und Geschwindigkeitsschwankung ist abhängig von der geometrischen Rohrleitungslänge

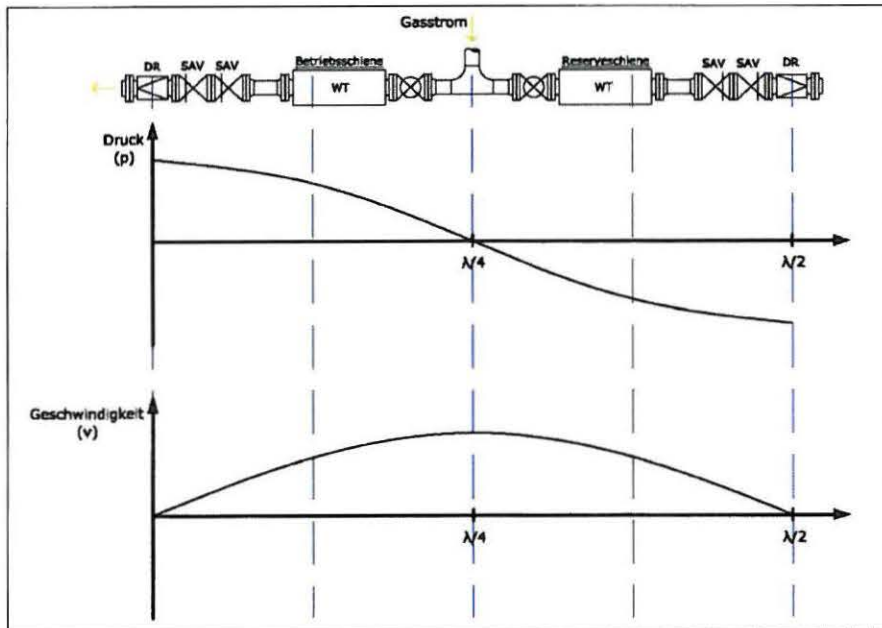


Abb. 2 Darstellung von Betriebs- und Reserveschiene einer typischen Gasdruckregelstation und der dynamischen Druck- und Geschwindigkeitsschwankung in der ersten akustischen Resonanz in Längsrichtung

zwischen den Druckreglern. Bei gleichen Randbedingungen, wie z. B. akustisch geschlossen, stellt sich als erste Grundfrequenz eine $\lambda/2$ -Resonanz ein. Die Resonanzfrequenz ergibt sich mit der geometrischen Länge L zwischen den Reglern und aus der vorherrschenden Medium-Schallgeschwindigkeit über Gleichung 1.

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2 \cdot L} \quad (1)$$

mit

- c Mediumschallgeschwindigkeit
- λ Wellenlänge
- L geometrische Länge.

Die mit dieser akustischen Resonanz verbundenen Druck- und Volumenstromschwankungen führen an Rohrleitungsbögen und Querschnittsänderungen zu Wechsellasten, die als Schwingungsanregung auf die Rohrleitungsstruktur wirken. Da in der Regel auch die nach außen sichtbaren mechanischen Rohrleitungsschwingungen als Rohrleitungs-Biegemoden niederfrequent auftreten, werden nachfolgend die Ergebnisse einer durchgeführten Messung mit festgestellten longitudinalen Gassäulenschwingungen und mechanischen niederfrequenten Rohrleitungsschwingungen betrachtet.

3 Beispiel einer messtechnischen Untersuchung an einer GDRM-Station

In einer Gasdruckregel- und Messstation wurde vom Betreiber wegen auffälliger Rohrleitungsschwingungen eine messtechnische Untersuchung beauftragt und von KÖTTER Consulting Engineers durchgeführt. Zur Übersicht ist in der Rohrleitungsverlauf mit den verschiedenen Messpunkten zur Erfassung der Schwingungs- und Druckpulsationssituation in der GDRM-Station dargestellt.

Ausgehend von der Hochdruckseite mit Kennzeichnung des Gasstroms wird zuerst der Filterabscheider (FA) und anschließend die Gasmengenmessung mit dem Wirbelgaszähler (WBZ) und dem Turbinenradzähler (TRZ) durchströmt (Abb. 3). Anschließend folgen Betriebs- und Reserveschiene mit den Wärmetauschern (WT), den Sicherheitsabschaltarmaturen (SAV) und den eigentlichen Druckreglern (DR) zur Niederdruckseite.

Aus der durchgeführten Untersuchung ist nachfolgend ein Teil der Messungen dargestellt. Die maximalen Schwingungen von ca. 9 mm/s eff. wurden am Messpunkt S9_U in y-Richtung (S9y_U) bei einem relativ geringen Volumenstrom von 10.000 Nm³/h innerhalb der Reserveschiene gemessen, als das Mischventil des Wärmetauschers vom geschlossenen (kein Wasser durch den Wärmetauscher) auf den voll geöffneten (max. Wasser durch den Wärmetauscher) Zustand umgestellt wurde (Abb. 4, 16:04 Uhr).

In Abbildung 5 ist der zugehörige zeitliche Verlauf dieser Signale für einen kurzen Zeitabschnitt aufgetragen.

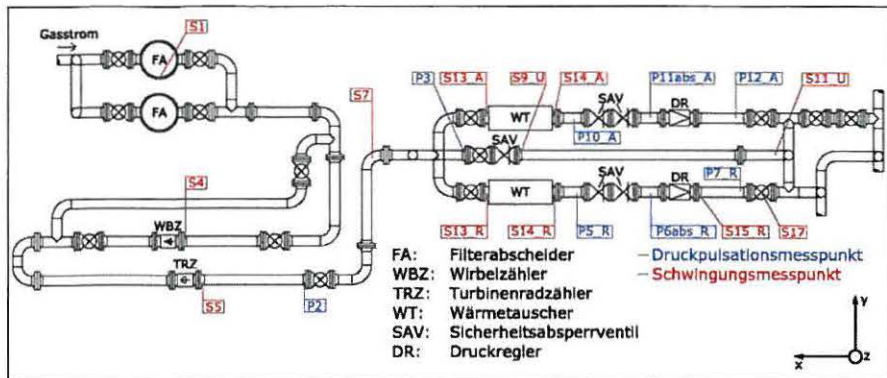


Abb. 3 Rohrleitungsverlauf in einer GDRM-Station mit Lage der Messpunkte (Schwingungsmesspunkte rot, Druckmesspunkte blau)

Es wird deutlich, dass die Rohrleitungsschwingungen mit den Druckpulsationen korrelieren. Die gemessene dominante Schwingungsfrequenz beträgt 18 Hz. Die zeitgleich erfassten Druckschwankungen innerhalb der Arbeits- und Reserveschiene verlaufen gegenphasig (Abb. 5). Zur Überprüfung erfolgt die vereinfachte Bestimmung der Resonanzfrequenz nach Gl. (1):

$$L = \frac{\lambda}{2} = 11 \text{ m} \quad (\text{Abstand zwischen den Druckreglern})$$

$$c_{\text{Erdgas}}(40 \text{ °C}) = 400 \text{ m/s}$$

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{400 \text{ m}}{22 \text{ m}} = 18 \text{ Hz.}$$

Die mit dieser akustischen Resonanz verbundenen Druck- und Volumenstromschwankungen führen an Rohrleitungsbögen und Querschnittsänderungen zu Wechsellasten, die als Schwingungsanregung auf die Rohrleitungsstruktur wirken. Mit steigender Vorlauftemperatur des Wärmetauschers bei ansonsten unveränderten Anlagenbedingungen konnte ein Ansteigen der Druckschwankungen und damit verbunden auch der Rohrleitungsschwingungen festgestellt werden.

Zusätzlich wird die Intensität der resultierenden Rohrleitungsschwingungen durch die dynamischen mechanischen Eigenschaften der Struktur (Eigenfrequenzlagen, Dämpfung) beeinflusst [2].

3.1 Fazit der messtechnischen Untersuchung

In der untersuchten GDRM-Station wurden bei einer Fahrweise mit geringem Volumenstrom eine akustische Resonanz und dadurch angeregte Rohrleitungsschwingungen festgestellt. Die dafür ursächlichen Druckpulsationen können dann angefacht werden, wenn eine Wärmeübertragung durch die Wärmetauscher (an den Gasstrom) stattfindet. Die Ursache für dieses Verhalten war in Bezug auf GDRM-Stationen bisher nicht bekannt. Unabhängig hiervon wurde das Phänomen bereits auf verschiedenen Gasübergabe- und Regelstationen beobachtet, wobei die beschriebenen Abhängigkeiten vom Wärmeübergang im Wärmetauscher und der Stärke der akustischen Resonanz bzw. der Rohrleitungsschwingungen vergleichbar und reproduzierbar waren.

4 Experiment zur Schwingungsanregung durch Wärmetauscher

Aus der Energietechnik ist bekannt, dass Verbrennungsvorgänge auf unterschiedliche Weise mit akustischen Phänomenen in Wechselwirkung treten. Bei solchen Verbrennungsschwingungen kann es zur Rückkopplung zwischen Wärmeübertragung und Systemakustik kommen. Kennzeichnend für die Rückkopplung ist die selbstverstärkende Eigenschaft, die auch als selbsterregte thermoakustische Instabilität bezeichnet wird. Dieses Phänomen einer thermischen Expansion in Wechselwirkung mit der Raumakustik wurde bereits von Hig-

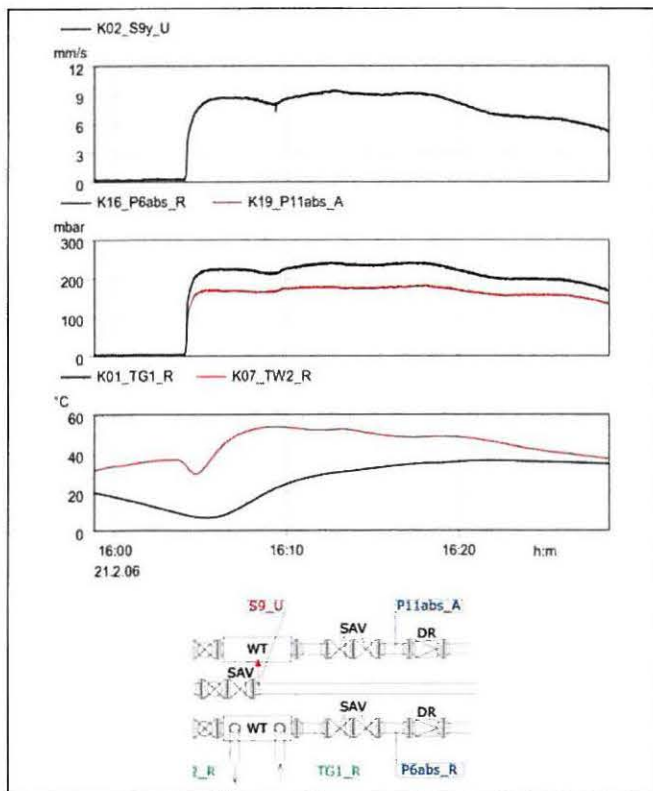


Abb. 4 Effektive Rohrleitungsschwingung (Messpunkt S9y_U), effektive Druckpulsation (P6abs_R und P11abs_A) sowie Gasstromtemperatur stromab vom Regelventil (TG1_R) und Temperatur Wasserrücklauf Wärmetauscher Reserveschiene (TW2_R) unmittelbar vor und nach dem Öffnen des Mischventils vom Wärmetauscher der Reserveschiene (Erdgas-Volumenstrom 10.000 Nm³/h)

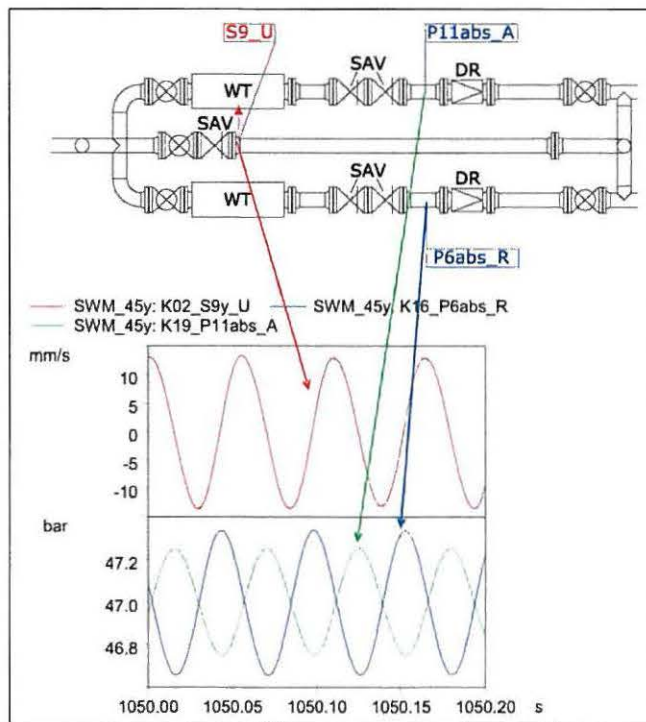


Abb. 5 Ausschnitt aus dem Zeitverlauf der Strukturschwingungen am Messpunkt S9y_U sowie der Druckschwankungen an den Messpunkten P6abs_R und P11abs_A (Reserveschiene 10.000 Nm³/h, Mischventil Wärmetauscher nach ca. 500 Sekunden geöffnet).

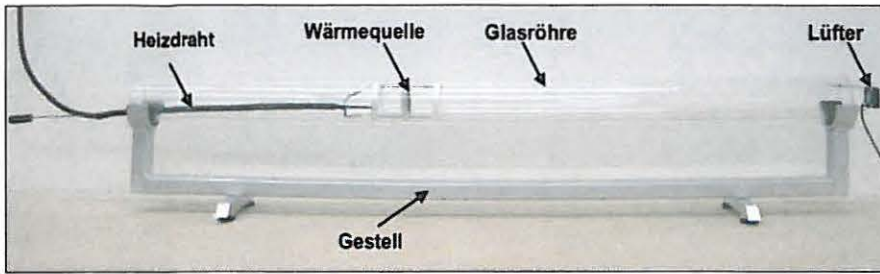


Abb. 6 Foto der Experimentanordnung zur thermodynamischen Instabilität

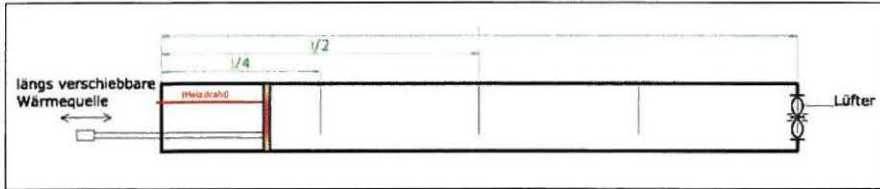


Abb. 7 Prinzipskizze mit Positionsangaben zur thermodynamischen Instabilität

gins im Jahr 1777 festgestellt [3]. Er ließ eine Wasserstoffflamme brennen, die je nach Position der Flamme innerhalb eines Glasrohres einen deutlich hörbaren Ton erzeugte. Rijke zeigte Mitte des 19. Jahrhunderts mit dem »Rijke-Rohr« einen grundsätzlichen Zugang zum Verständnis der selbsterregten thermoakustischen Schwingungen [4].

Die Abbildungen 6 und 7 zeigen einen experimentellen Aufbau in Anlehnung an den Rohrleitungsverlauf einer parallelen Betriebs- und Reserveschiene mit einer längsverschiebbaren Wärmequelle vergleichbar mit einem Wärmetauscher. Die Rohrleitung ist durch eine transparente Glasröhre ersetzt worden. Zur Volumenstromvariation wird ein Lüfter am Ende der Röhre eingesetzt. Die längsverschiebbare Wärmequelle besteht aus einem einfachen Drahtgeflecht, welches über eine variable Stromquelle versorgt wird, so dass der Draht direkt wie eine aktive Wärmequelle angesteuert werden kann.

Die Randbedingungen der zu beiden Seiten akustisch offenen Glasröhre führen wiederum zur Ausbildung einer möglichen akustischen Resonanz mit der Wellenlänge $\lambda/2$. Da aus den Veröffentlichungen zu thermoakustischen Instabilitäten bekannt ist, dass unter anderem die Position der Wärmequelle und die Höhe des Volumenstromes einen entscheidenden Einfluss auf die Ausbildung der Instabilität haben, wurden beide Größen im Experiment variabel einstellbar gewählt. Zur Versuchsdurchführung wird über den Lüfter ein relativ geringer Volumenstrom eingestellt. Anschließend wird durch Erhöhung der elektrischen Stromzufuhr der Heizdraht erhitzt. Die durch den Lüfter angesaugte Luft erwärmt sich leicht. Am Heizdraht kommt es zu einem Wärmeübergang an das Fluid. Durch leichte Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeiten und der Beeinflussung durch die Grenzschicht am Heizdraht kommt es zu Schwankungen in der übertragenen Wärmeleistung. Diese bedingen wiederum über die lokale thermische

Ausdehnung der Luft Druckschwankungen, die sich im Rohr als Wellen ausbreiten und an den Enden der Glasröhre teilweise reflektiert werden (Abb. 8).

Durch diese Reflexion kann unter bestimmten Bedingungen eine Rückkopplung erfolgen, so dass durch die reflektierte Geschwindigkeitsschwankung am Heizdraht wieder eine Druck- und Geschwindigkeitsschwankung induziert wird. Mit Änderung der Position des Heizdrahtes in der Glasröhre verändert sich die für die akustische Instabilität entscheidende Phasenbeziehung zwischen der Druckschwankung p und der Wärmemengenschwankung q' .

Stellt sich die Phasenbeziehung zwischen Druckschwankung und Wärmemengenschwankung so ein, dass der steigende Druck mit einer Wärmemengenzunahme zusammenfällt, so findet eine gegenseitige Anfachung statt und es kommt zur selbsterregten Gassäulenschwingung in Form einer akustischen Resonanz. Als hinreichendes Kriterium für das Auftreten einer thermoakustischen Instabilität gilt die Kopplung zwischen der instationären Wärmemengenschwankung und der akustischen Druckschwankung, beschrieben in der nachfolgenden Gleichung (2).

$$R = \int_t^{t+T} p(t) q'(t) dt \quad (2),$$

auch als Rayleigh-Integral oder Rayleigh-Index R bezeichnet. Dabei ist die Wärmemengenschwankung q' proportional der

akustischen Geschwindigkeitsschwankung v mit einem Phasenverzug δ

$$q'(t) \sim v(t - \delta).$$

In der Abbildung 9 sind sowohl p , v als auch der Rayleigh-Index R qualitativ für jede beliebige Position der Wärmequelle in der Glasröhre dargestellt.

Der Rayleigh-Index beschreibt die notwendige, allerdings nicht hinreichende Bedingung für die Entstehung selbsterregter thermoakustischer Schwingungen. Je nach Vorzeichen des Rayleigh Index kommt es zu einer Anfachung oder zu einer Dämpfung der Gassäulenschwingung und damit der akustischen Resonanz.

$R < 0$ Dämpfung einer akustischen Resonanz

$R = 0$ Neutrales Verhalten

$R > 0$ Anfachung einer akustischen Resonanz.

Um diesen Zusammenhang im Versuch nachzuweisen, wird im ersten Fall der Lüfter auf einen relativ geringen Volumenstrom eingestellt und die Wärmequelle an den Anfang der Glasröhre positioniert. Der Heizdraht wird erhitzt, es kommt zu einer spürbaren Erwärmung des durch die Glasröhre angesaugten Luftstroms. Ansonsten sind keine Auffälligkeiten festzustellen.

Jetzt wird der Heizdraht in seiner Position längs der Glasröhre verschoben. Im Bereich $1/4$ kommt es zu einer Anfachung der akustischen Resonanz deutlich hörbar durch den auftretenden monofrequenten Ton von ca. 180 Hz [5]. Wird der Heizdraht weiter längs der Glasröhre verfahren, fällt die Intensität des Tones schnell ab. Es kommt an allen weiteren Positionen bis zum Ende der Glasröhre zu keiner weiteren Anfachung der akustischen Resonanz. Zurück an der Position $1/4$ tritt der Ton erneut auf. Darüber hinaus kann festgestellt werden, dass sich auch die Druckpulsationsamplitude – ähnlich wie bei der Messung am Wärmetauscher der GDRM-Station – durch eine Temperaturerhöhung am Heizdraht vergrößern lässt.

5 Übertragung und Überprüfung der bisherigen Ergebnisse auf eine GDRM-Station

Zum direkten Vergleich zu den Messungen auf der GDRM-Station wird nachfolgend in Abbildung 10 der qualitative Verlauf des Rayleigh-Index für den typischen Verlauf mit Betriebs- und Reserveschiene einer GDRM-Station dargestellt.



Abb. 8 Prinzipielle Darstellung der Rückkopplung einer thermoakustischen Instabilität

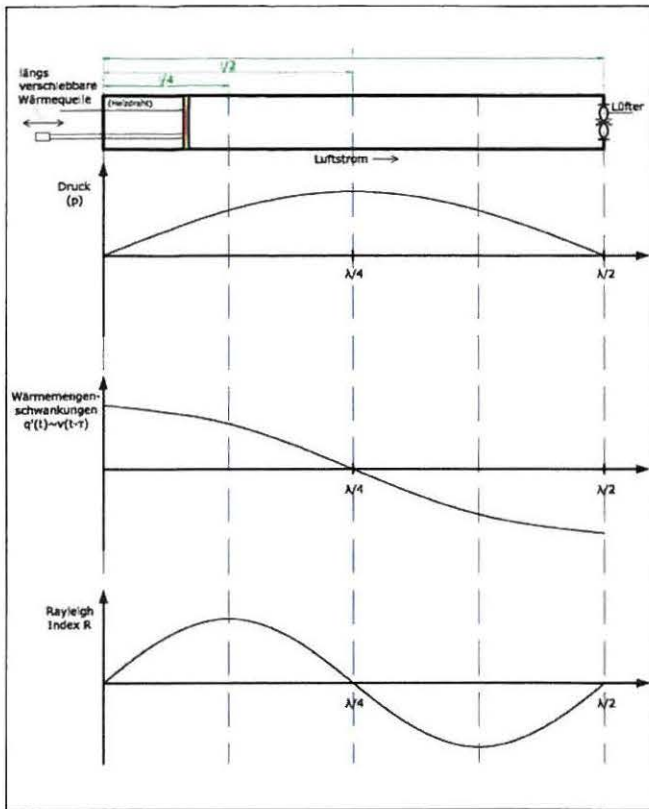


Abb. 9 Qualitative Darstellung der akustischen Druckschwankung p , der Wärmemengenschwankung q' in Abhängigkeit der Position der Wärmequelle und des Rayleigh-Index R für die Bedingungen in der Glasröhre

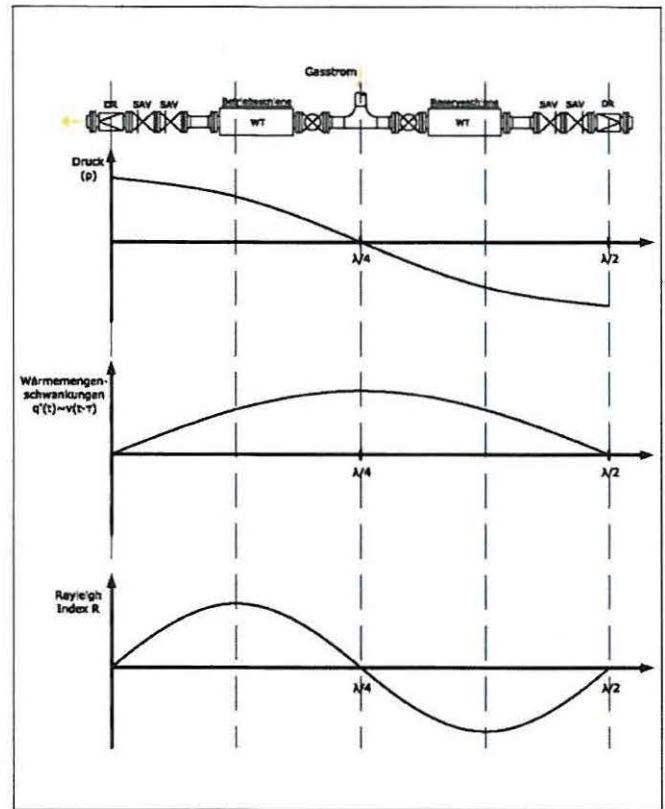


Abb. 10 Qualitative Darstellung der akustischen Druckschwankung der Wärmemengenschwankung q' in Abhängigkeit der Position der Wärmequelle und des Rayleigh Index R für die Bedingungen auf einer GDRM-Station

Der Verlauf des Rayleigh-Index bestätigt, dass der Ort der möglichen Anfänger einer thermoakustischen Instabilität und die tatsächliche Einbauposition des Wärmetauschers in einer GDRM-Station durchaus übereinstimmen können. In der untersuchten Anlage war diese geometrische Übereinstimmung gegeben. Zusätzlich ist jedoch die Position des zweiten Wärmetauschers in der Reserveschiene zu diskutieren. Aus dem Verlauf des Rayleigh-Index (Abb. 10) ergibt sich hier eine deutliche Dämpfung möglicher akustischer Resonanzen. Dabei ist jedoch nicht berücksichtigt, dass kein Durchfluss in der abgeschoberten Reserveschiene vorhanden ist und somit auch kein prinzipieller Wärmetransport – als Grundvoraussetzung für die thermoakustische Instabilität – auftritt.

Grundsätzlich ist darüber hinaus zu berücksichtigen, dass das aufgestellte Rayleigh-Kriterium eine notwendige, allerdings nicht hinreichende Bedingung für die Entstehung selbsterregter thermoakustischer Schwingungen darstellt. Damit – bei Erfüllung dieses Kriteriums – eine akustische Resonanz auftritt, muss die durch Wärme zugeführte Energie größer sein als die Verlustenergie, die durch Dissipation und Abstrahlung auftritt.

6 Mögliche Minderungsmaßnahmen

Prinzipiell bestehen verschiedene Möglichkeiten, das Auftreten von thermoakustischen Instabilitäten zu reduzieren bzw. zu vermeiden. Dabei ist zu berücksichtigen, ob es sich bei der GDRM-Station um eine zu planende oder um eine bestehende Anlage handelt.

Bei Neuanlagen kann durch gezielte Positionierung der Wärmetauscher im Rahmen einer Pulsationsstudie unter Berücksichtigung des jetzigen Kenntnisstandes das Anfachen selbsterregter Schwingungen direkt unterbunden werden. Alternativ können Positionen zum gezielten Einsatz von Dämpfungsgliedern im Gasstrom (z. B. Pulsations-Dämpferplatten) berechnet und für den praktischen Einsatz ausgelegt werden.

Bei bestehenden GDRM-Anlagen empfiehlt sich dort, wo z. B. im Laufe eines Jahres sehr unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich des Volumenstromes und Differenzdruckes vorherrschen, eine theoretische Überprüfung möglicher Anfängermöglichkeiten von thermoakustischen Instabilitäten durchführen zu lassen. Werden bei dieser Pulsationsstudie mögliche Anzeichen für das Auftreten von selbsterregten Schwingungen festgestellt, sollte eine messtechnische Erfassung der Akustik und der

Strukturmechanik für ausgesuchte Betriebspunkte durchgeführt werden. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse können dann strukturmechanische Maßnahmen (z. B. zusätzliche Rohrleitungsabstützungen) oder akustische Maßnahmen (z. B. Pulsations-Dämpferplatten) gezielt geplant und eingesetzt werden. In der untersuchten Station (Kap. 3) wurden die empfohlenen akustischen und mechanischen Maßnahmen umgesetzt. Die anschließende Kontrollmessung bestätigte die Vorgehensweise. Das Auftreten thermoakustischer Instabilitäten konnte unabhängig von den Betriebsbedingungen komplett unterbunden werden.

Literatur

- [1] Hightech-Erneuerung der Gasübernahmestation Bernburg-Peißen. *energie/wasserpraxis*, 2/2005.
- [2] VDI-Richtlinie 3842, Schwingungen in Rohrleitungssystemen, Juni 2004.
- [3] B. Higgins. On the sound produced by a current of hydrogen passing through a tube. *Journal of natural philosophy, chemistry and the arts*, 1: 129–131, 1802.
- [4] P. L. Rijke. Notiz über eine neue Art, die in einer an beiden Enden offenen Röhre enthaltene Luft in Schwingungen zu versetzen. *Annalen der Physik und Chemie*, 107:339–343, 1859.
- [5] <http://www.koeltter-consulting.com>