

9. Workshop Gasmengenmessung – Gasanlagen – Gastechnik 2018

07. / 08. März

Vortrag 12

**Ungewöhnliche Schwingungen einer GDRM-Station
während des Teillastbetriebes**

Dr.-Ing. Patrick Tetenborg, Dr.-Ing. Johann Lenz
KÖTTER Consulting Engineers GmbH & Co. KG

Abstract

Allein in Deutschland werden hunderte von Gasübernahmestationen betrieben, um sowohl für Privathaushalte als auch Gewerbe- und Industriegebiete eine zuverlässige Versorgung mit Erdgas sicherzustellen. Aus schwingungstechnischer Sicht sind diese Stationen meist unauffällig. Die Entspannung des Drucks aus dem Fernversorgungsnetz auf den Druck des Nahversorgungsnetzes stellt üblicherweise einen nahezu stationär stattfindenden Strömungsprozess dar.

Dennoch kommt es vereinzelt zu akustischen und schwingungstechnischen Phänomenen, welche den dauerhaften Betrieb solcher Gasübernahmestationen oder auch Gasdruckregel- und Messstationen gefährden können. KÖTTER Consulting Engineers (KCE) hat in der Vergangenheit bereits mehrfach strömungsinduzierte Effekte an unterschiedlichen Gasregelstationen identifizieren und beheben können.

In diesem Artikel wird ein Projektbeispiel geschildert, bei dem das Betriebspersonal in unregelmäßigen Abständen Rohrleitungsschwingungen an einer GDRM-Station beobachtet hat. Die Betriebsbedingungen, bei denen die erhöhten Schwingungen aufgetreten sind, waren jedoch unbekannt. Daher wurde zunächst eine zweiwöchige Dauermessung durchgeführt, um den Betriebszustand mit den vom Betreiber beobachteten Schwingungen zu ermitteln. Anschließend ist das auffällige Betriebsverhalten auf Basis von umfangreichen Pulsations- und Schwingungsmessungen detailliert erfasst worden. Über die Analyse der aufgezeichneten Daten konnte abschließend der verantwortliche Wirkmechanismus identifiziert und über die zeitnahe Umsetzung einer geeigneten Minderungsmaßnahme behoben werden.

Situation und Aufgabenstellung

In einer Gasübernahmestation (Abbildung 1) werden bei bestimmten Betriebsbedingungen subjektiv erhöhte Schwingungen am Rohrleitungssystem im Bereich der außen liegenden Filter beobachtet. Zur Beurteilung dieser Schwingungen soll im Rahmen einer messtechnischen Analyse die vorhandene Situation erfasst und das Gefährdungspotential dieser Schwingungen bewertet werden. Hierzu wird auf die VDI 3842 zurückgegriffen, welche eine frequenzselektive Bewertung von Rohrleitungsschwingungen definiert. Unabhängig von der ermittelten Gefährdung wurde vom Betreiber der Anlage die Erarbeitung von Minderungsmaßnahmen zur Behebung der Schwingungsursache gefordert.



Abbildung 1: Gasübernahmestation

Da der Betriebszustand mit den höchsten Rohrleitungsschwingungen vorab nicht bekannt war, ist die messtechnische Untersuchung in zwei Phasen durchgeführt worden:

Phase I: Dauermessung

In dieser Phase wurden Schwingungssensoren zusammen mit einem Datenerfassungssystem in der Gasübernahmestation installiert, um über einen Zeitraum von ca. 2 Wochen die Schwingungssituation an den Rohrleitungen permanent zu erfassen. Auf der Grundlage der aufgezeichneten Messdaten können die Betriebszustände ermittelt werden, die zu erhöhten Schwingungen an den Rohrleitungen führen („Worst Case“ Situation).

Phase II: Umfangreiche messtechnische Untersuchung in der „Worst Case“ Situation

Sind die Betriebszustände mit den höchsten Rohrleitungsschwingungen bekannt, kann im Rahmen einer umfangreichen messtechnischen Analyse bei diesen Betriebszuständen die Schwingungssituation an der kompletten Rohrleitung sowie an den Wärmetauschern im Gebäudeinneren erfasst und durch Messung von Druckpulsationen in den Rohrleitungen der Anregungsmechanismus für die erhöhten Schwingungen aufgezeigt werden.

Auf der Basis dieser Daten wird das Gefährdungspotential für die Rohrleitung ermittelt. Anschließend werden Maßnahmen aufgezeigt, die zu einem aus schwingungstechnischer Sicht sicheren Betrieb der Anlage führen.

Phase I – Dauermessung

In der Gasübernahmestation wird Erdgas aus einem Fernversorgungsnetz mit einem Druck zwischen 40 bar und 50 bar entnommen und mittels eines Regelventils auf den Druck des Nahversorgungsnetzes von ca. 12 bar entspannt. Vor der Entspannung wird das Gas über zwei parallele Wärmetauscherschienen vorgewärmt. Während der Messung wurden stets beide Schienen der Gasvorwärmung parallel betrieben. Ein Einzelbetrieb der Schienen ist nicht vorgesehen. Die Gastemperatur stromab des Regelventils unterliegt einer Regelung.

Der über die Gasübernahmestation geförderte Gesamt-Volumenstrom schwankte während des gesamten Messzeitraums in Abhängigkeit des Verbrauches im Nahversorgungsnetz zwischen 2.000 Nm³/h und 18.000 Nm³/h.

Zur Beschreibung des Betriebszustandes waren vom Betreiber nur Stundenmittelwerte des Normvolumenstroms sowie des Drucks und der Temperatur auf der Abnahmeseite stromab des Regelventils verfügbar. Um weitere Informationen über die Betriebszustände im Anlagenteil stromauf des Regelventils zu erhalten, wurde der Druck an drei Messpositionen aufgezeichnet. Des Weiteren wurde eine Temperaturmessung auf der Oberfläche der Rohrleitung hinter dem Wärmetauscher (WT2) installiert. Beide Wärmetauscher werden permanent mit der gleichen Heizleistung betrieben. Abbildung 2 zeigt eine Anlagenübersicht und die Lage der insgesamt acht Schwingungssensoren, der drei Drucksensoren und des Temperatursensors.

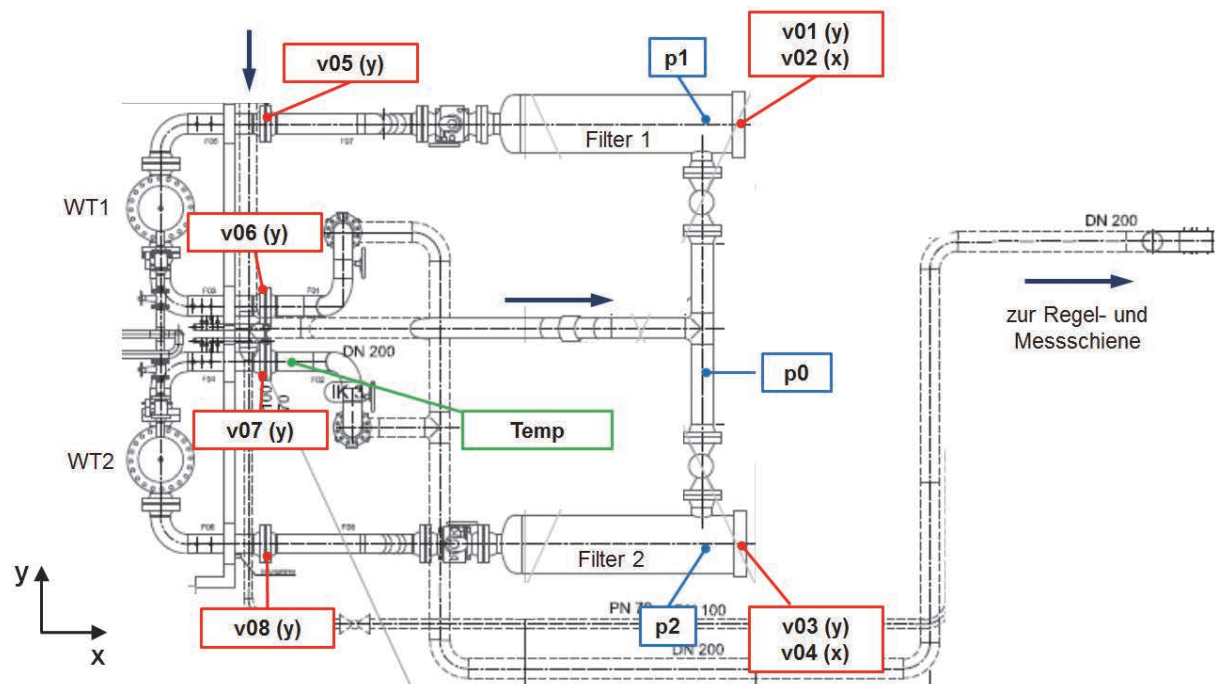


Abbildung 2: Lage der Messpunkte während der Dauermessung

Zur Beurteilung der Schwingungssituation an den Rohrleitungen der Gasübernahmestation werden die Effektivwerte der Schwinggeschwindigkeiten hinzugezogen. In Abbildung 3 ist exemplarisch für einen Zeitraum von einem Tag das Schwingungsniveau an den acht Messpunkten anhand der Effektivwerte dargestellt. Zur Identifizierung der kritischen Betriebszustände sind weiterhin der Normvolumenstrom sowie die Drücke und die Temperaturen stromauf und stromab des Regelventils dargestellt.

Anhand des Verlaufes der effektiven Schwinggeschwindigkeiten ist zu erkennen, dass die Schwingungen jeweils für ein kurzes Zeitintervall von ca. 5 bis 15 Minuten auftreten und anschließend wieder verschwinden. Eine Gegenüberstellung mit den Betriebsdaten für den gesamten Messzeitraum hat gezeigt, dass die Schwingungen nur bei Normvolumenströmen zwischen 4.500 Nm³/h und 10.000 Nm³/h auftreten.

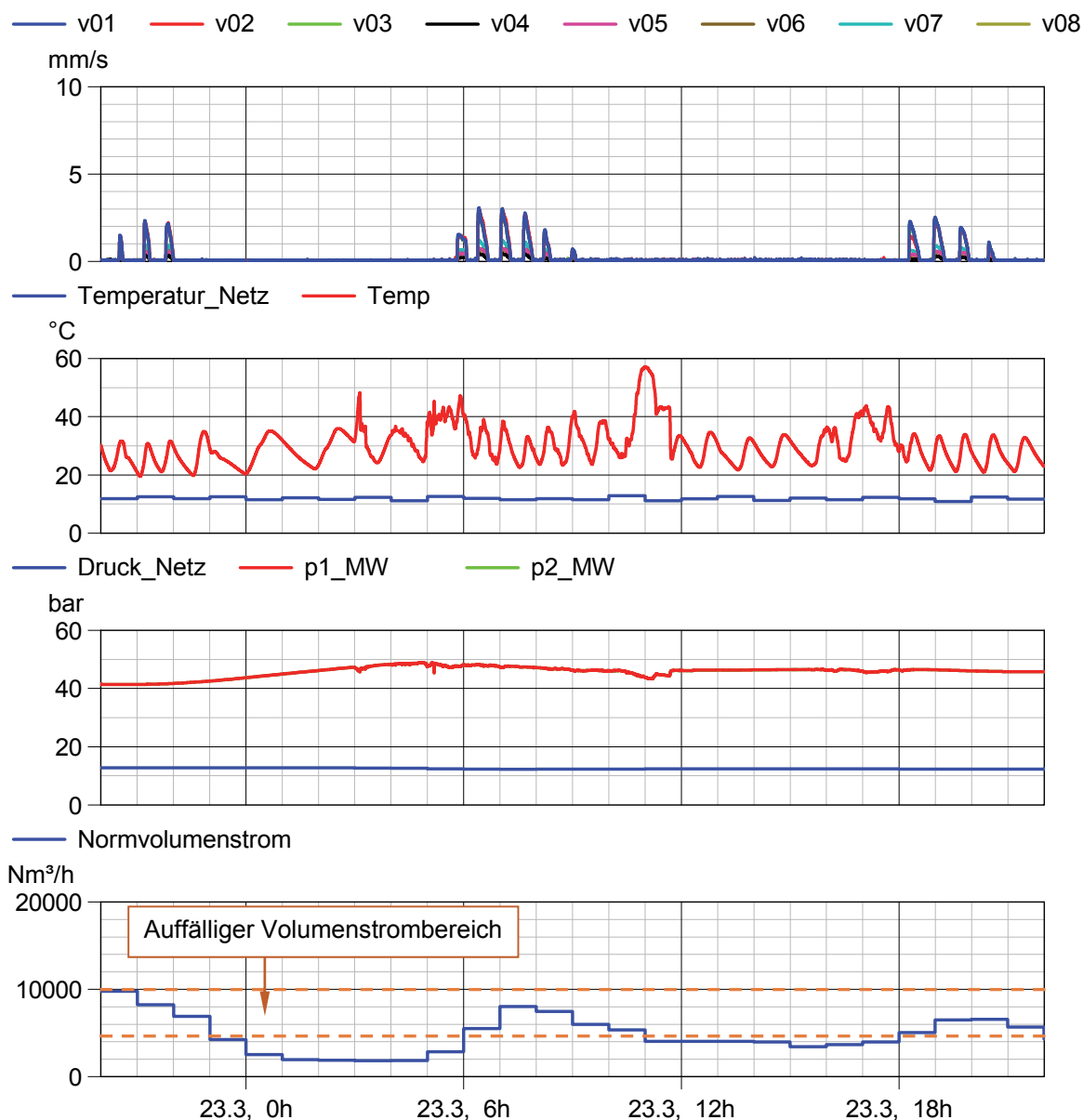


Abbildung 3: Effektivwerte der ermittelten Schwinggeschwindigkeiten zusammen mit den Betriebsdaten der Gasübernahmestation (Messzeitraum: 1 Tag)
 (von oben: 1. Schwinggeschwindigkeiten; 2. Temperatur vor und nach dem WT; 3. Drücke, 4. Normvolumenstrom)

Die größten Schwinggeschwindigkeiten liegen am Schwingungsmesspunkt v01 vor. Zur näheren Charakterisierung des Schwingungsverhaltens ist in Abbildung 4 der zeitliche Verlauf der lokalen Schwinggeschwindigkeiten v01 und der Druckpulsationen p1 mit dem Temperaturverlauf Temp auf der Rohrleitungsoberfläche stromauf des Regelventils dargestellt.

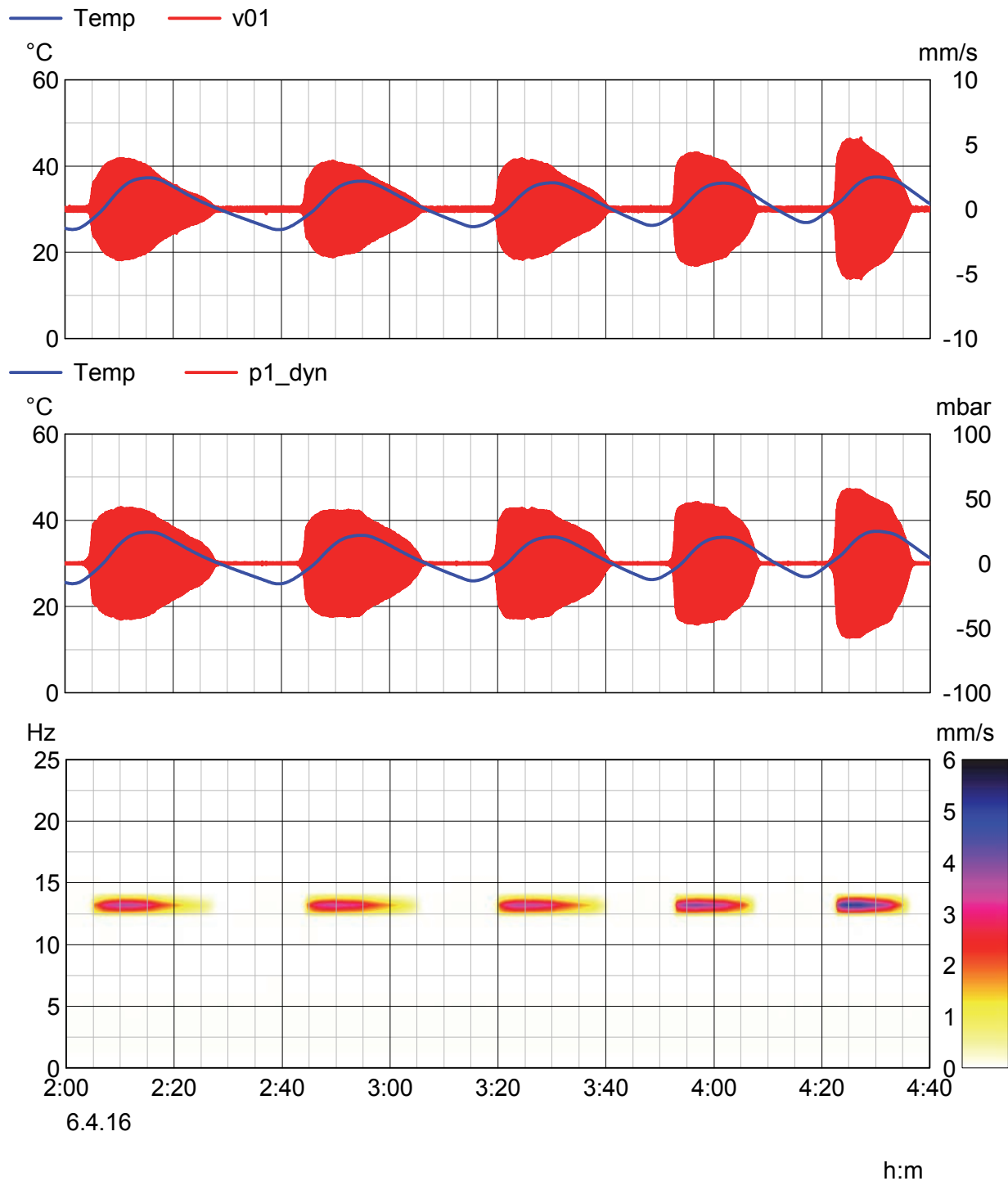


Abbildung 4: Zeitverlauf und Frequenzspektrum¹⁾ der am Messpunkt v01 ermittelten Schwinggeschwindigkeiten zusammen mit dem Zeitverlauf der Druckschwankungen am Messpunkt p1 und der Temperatur am Messpunkt Temp

¹⁾ Das Frequenzspektrum wird als Farbspektrogramm dargestellt. Auf der Abzisse ist die Zeit dargestellt und die Ordinate zeigt die Frequenz. Die Amplitude wird durch die Farbe widerspiegelt.

Der Vergleich des Temperaturverlaufs zeigt, dass die Pulsationen und die Schwingungen zeitgleich mit dem Anstieg der Temperatur infolge der Gaserwärmung durch die beiden Wärmetauscher auftreten. Zudem liegt ein proportionaler Zusammenhang zwischen den Pulsationen und den Schwingungen vor. Die Druckpulsationen stellen somit eindeutig den Erregermechanismus für die auftretenden Schwingungen dar. Wie aus dem Frequenzspektrum der Schwingungen ersichtlich ist, treten die Schwingungen mit einer dominanten Frequenz von 13,2 Hz auf.

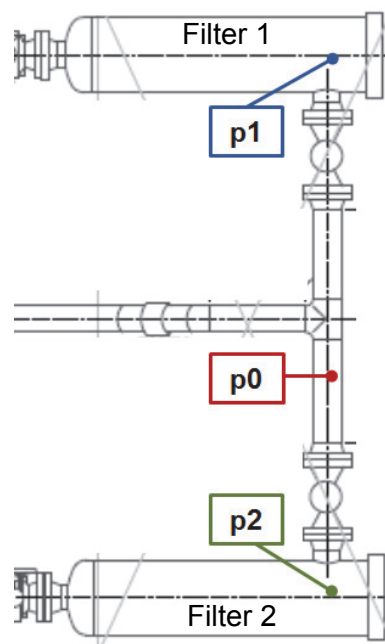
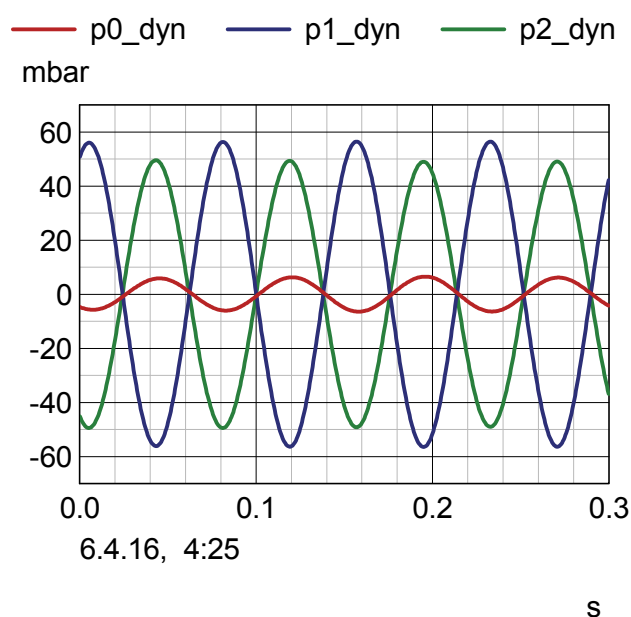


Abbildung 5: Exemplarische Darstellung des zeitlichen Verlaufs der gemessenen Druckschwankungen an den Abscheidern

An den Druckmesspunkten p1 und p2 stromauf der Filter treten Druckpulsationen mit Amplituden von ca. 55 mbar bei der dominanten Frequenz von 13,2 Hz auf, Abbildung 5. Am Druckmesspunkt p0 ist ebenfalls eine Druckpulsation mit gleicher Frequenz, jedoch mit deutlich geringerer Amplitude zu erkennen.

Die zeitlichen Verläufe der dynamischen Druckanteile zeigen, dass die an den Messpunkten p0 und p2 gemessenen Druckschwankungen zu jedem Zeitpunkt gegenphasig zu den Druckschwankungen an Messpunkt p1 sind. Eine derartige zeitliche und örtliche Druckverteilung (stehende Welle) deutet auf die Existenz einer akustischen Resonanz im Rohrleitungsabschnitt zwischen den beiden Filtern hin. Eine genauere Analyse erfolgt in Phase II.

Ein Vergleich der gemessenen, effektiven Schwinggeschwindigkeiten mit den Richtwerten nach VDI 3842 hat an keinem Messpunkt Überschreitungen ergeben. Da nicht auszuschließen ist, dass an anderen Stellen des Rohrleitungssystems oder an den beiden Wärmetauschern erhöhte Schwingungen, z. B. durch strukturelle Resonanzen, auftreten, wurden - wie geplant - umfangreiche Messungen mit weiteren Druck- und Schwingungsmesspunkten durchgeführt.

Phase II – „Worst Case“-Analyse

Die Auswahl der zusätzlichen Messpunkte ist in Abbildung 6 dargestellt. Es wurden gezielt mehrere Druckmesspunkte im Gebäudeinneren der Gasübernahmestation genutzt, um die mögliche Ausprägung akustischer Resonanzen zu erfassen. Des Weiteren wurden Schwingungsmesspunkte an schwingungsanfälligen Bereichen der Wärmetauscher ergänzt. Die Anlage wurde gezielt im kritischsten Betriebsbereich durch Variation des Volumenstroms und der Wärmezufuhr (z. B. Änderung durch die Vorlauftemperatur) gefahren.

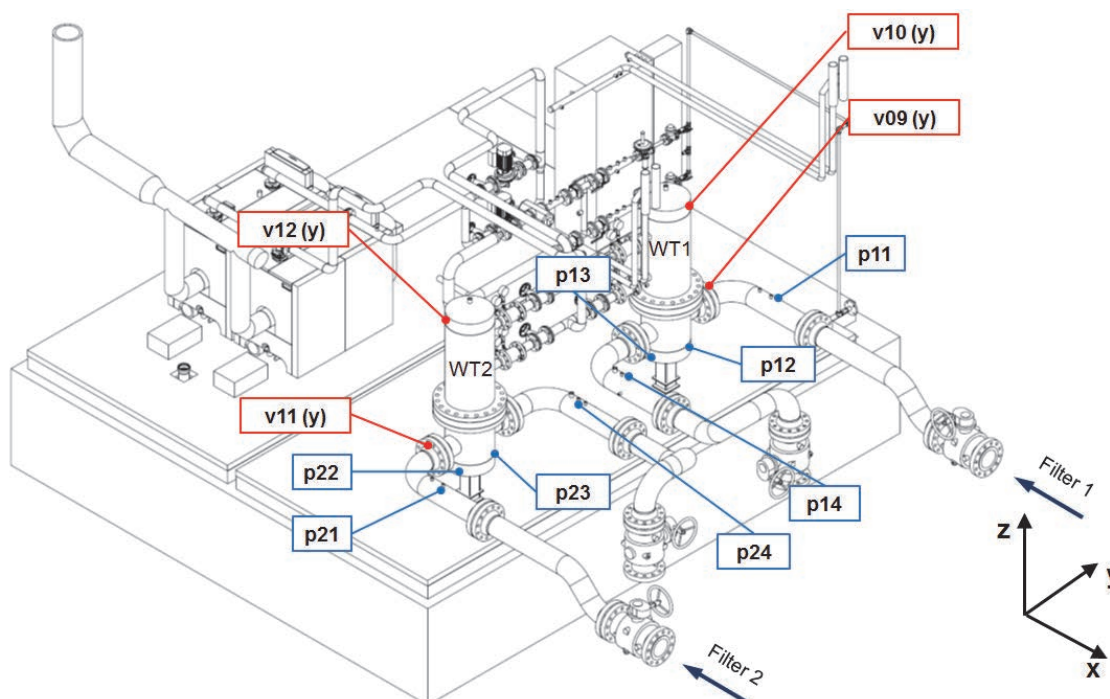


Abbildung 6: Weitere Messpunkte zur detaillierten Untersuchung des akustischen und strukturellen Betriebsverhaltens

Das akustische und schwingungstechnische Verhalten der Anlage konnte reproduziert werden. An den zusätzlichen Messpunkten am Wärmeübertrager wurden effektive Schwinggeschwindigkeiten von bis zu 12 mm/s gemessen. Die Anregung kann hier ebenfalls auf die lokale Ausprägung der Druckschwankungen zurückgeführt werden. Abbildung 7 zeigt den zeitlichen Verlauf und die Phasenbeziehungen der zusätzlichen Druckmesspunkte zum Zeitpunkt der höchsten Schwingungen.

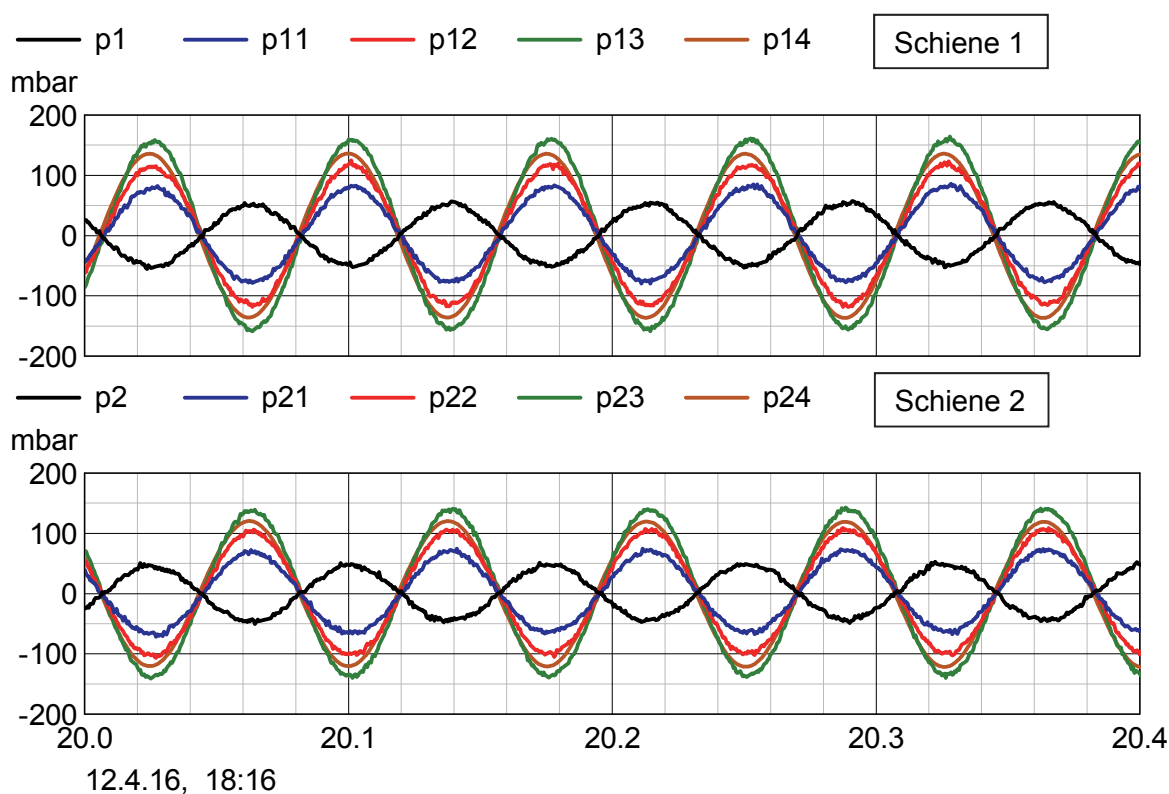


Abbildung 7: Zeitlicher Verlauf der gemessenen Druckschwankungen an den zusätzlichen Messpositionen im Bereich der Wärmeübertrager (oben: Schiene 1; unten: Schiene 2)

Die dominante Frequenz liegt hier ebenfalls bei 13,2 Hz. Die Verläufe der Druckschwankungen an den Messpunkten p11 bis p14 und an den Messpunkten p21 bis p24 sind trotz des örtlichen Versatzes jeweils gleichphasig zueinander. Vergleicht man die Verläufe der beiden parallelen Schienen miteinander, dann pulsieren diese hingegen gegenphasig. Neben der Ausprägung von Druckschwankungen prägen sich auch lokale Geschwindigkeitsschwankungen bei akustischen Vorgängen aus. Diese örtliche Verteilung der Druck- und Geschwindigkeitsschwankungen (Schalldruck und Schallschnelle) ist in Abbildung 8 (oben) qualitativ dargestellt. Die sich einstellende Wellenform bestätigt die ursprüngliche Vermutung einer akustischen Resonanz, welche sich maßgeblich zwischen den beiden Filtervolumina ausprägt.

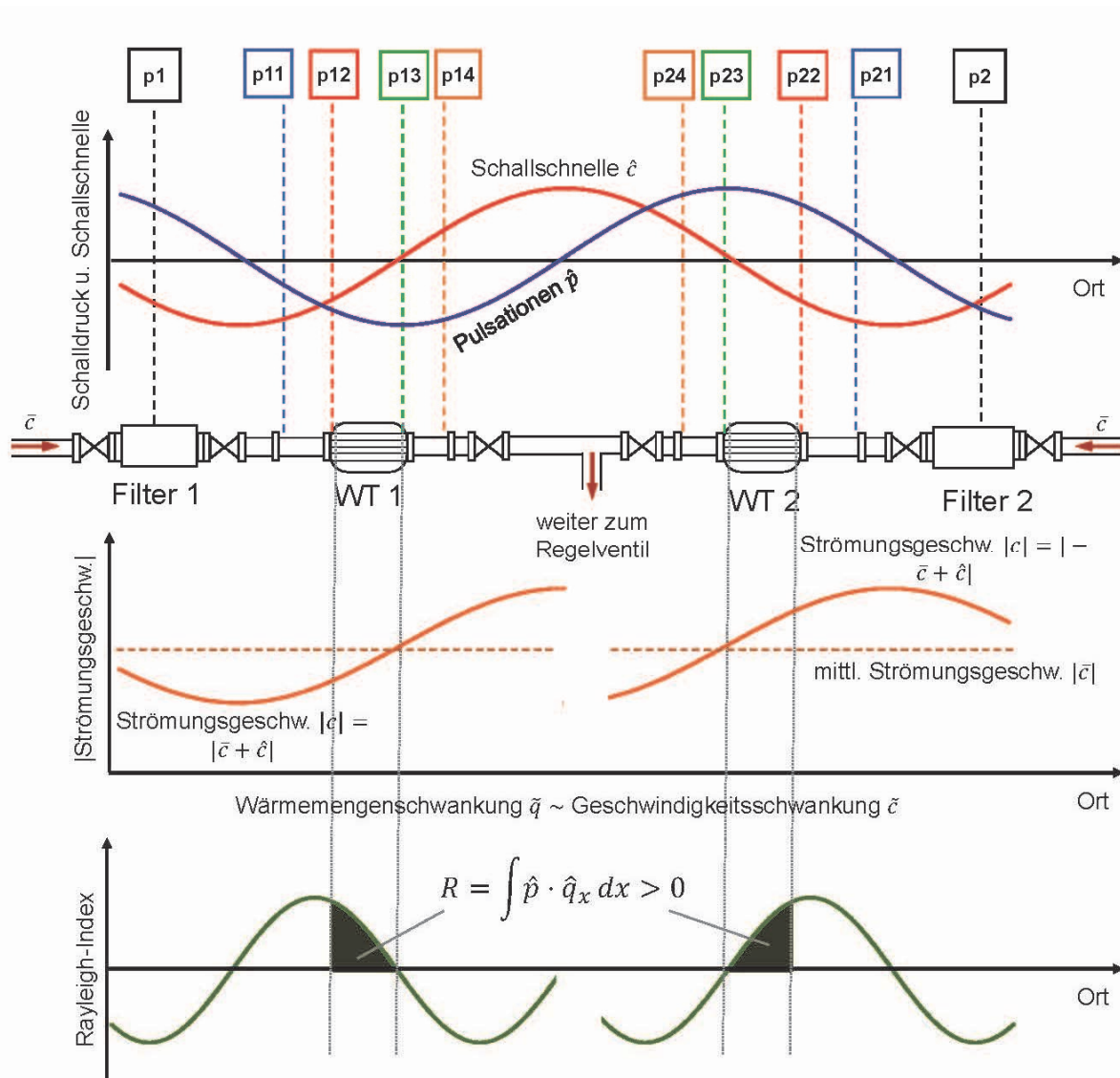


Abbildung 8: Örtliche Verteilung der Druck- und Geschwindigkeitsschwankungen, der lokalen absoluten Strömungsgeschwindigkeit und des sich ergebenden Rayleigh-Indexes für die lokalen Druck- und Wärmemengenschwankungen bei der sich einstellenden akustischen Resonanz

Die durchgeführten Messungen zeigen weiterhin einen Zusammenhang zwischen der lokalen Gaserwärmung durch die beiden Wärmetauscher und den Druckpulsationen im Rohrleitungssystem. Die Druckpulsationen und Schwingungen treten ebenfalls nur bei Temperaturzunahme des Gases auf (vgl. Abbildung 4). Eine Reduzierung der in den Wärmetauschern übertragenen Wärmemenge durch das Abschalten der Pumpen und Kessel für den Heizwasservorlauf führt darüber hinaus zu einer Verminderung der auftretenden Schwingungen und Druckpulsationen.

Ein solcher Einfluss der übertragenen Wärmemenge deutet auf eine thermoakustische Instabilität hin. Dabei wird eine stehende Welle in einem Rohrleitungssystem durch eine periodische Schwankung des Wärmeeintrages, z. B. durch eine Gasvorwarnung, angefacht. Die verantwortlichen Wärmemengenschwankungen verhalten sich näherungsweise proportional zu den Schwankungen der lokalen Strömungsgeschwindigkeit, vgl. Abbildung 8. Da die Strömungsrichtungen in beiden Schienen gegenläufig sind, ergibt sich ein lokaler Sprung für die mit den Schnelleschwankungen überlagerte Absolutströmung.

Um abschließend die Anregung durch eine thermoakustische Resonanz zu überprüfen, wird der sogenannte Rayleigh-Index betrachtet, welcher ein hinreichendes Kriterium für thermoakustische Instabilitäten darstellt. Dieser beschreibt die Kopplung zwischen akustischen Druckschwankungen und instationären Wärmemengenschwankungen:

$$R = \int_t^{t+T} \tilde{p} \cdot \tilde{q} dt = \hat{p} \cdot \hat{q}$$

Für beliebige Signale wird der Rayleigh-Index über die Integration innerhalb einer Periode bestimmt. Alternativ kann für harmonische Schwankungsgrößen, wie es hier der Fall ist, auch auf die komplexen Amplituden zurückgegriffen werden. Damit eine thermoakustische Instabilität vorliegen kann, muss der Rayleigh-Index $R > 0$ sein.

In Abbildung 8 unten ist der resultierende Verlauf des Rayleigh-Indexes schematisch dargestellt. Dabei wird von einem zu der lokalen Strömungsgeschwindigkeit proportionalen Wärmeübergang ausgegangen. Das Produkt der lokalen Wärmemengenschwankungen mit den lokalen Druckpulsationen liefert abschließend den ortsabhängigen Verlauf des Rayleigh-Indexes. Zur Prüfung der Anregung durch die Wärmetauscher (WT1 und WT2) wird der Rayleigh-Index entlang der Wärmetauscher aufintegriert (grüne Flächen, Abbildung 8). Das Ergebnis des Integrals ist ein positiver Rayleigh-Index $R > 0$. Neben den bisherigen Indizien für eine thermoakustische Resonanz wurde somit auch das hinreichende Kriterium für dieses Phänomen erfüllt. Eine thermoakustische Anregung kann somit eindeutig als Wirkmechanismus für das beobachtete Schwingungsphänomen identifiziert werden.

Minderungsmaßnahmen

Die abschließende Beurteilung der Messergebnisse hat gezeigt, dass keine Richt- bzw. Erfahrungswerte für Schwingungen überschritten werden. Auf Wunsch des Betreibers soll dennoch eine effektive Minderungsmaßnahme umgesetzt werden. Dadurch können auch mögliche dynamische Werkstoffspannungen an unzugänglichen Bauteilen innerhalb des Wärmetauschers ausgeschlossen werden.

Während der durchgeführten Untersuchungen wurde bereits gezielt eine Messreihe mit angedrosselten Armaturen stromab der Filtervolumina durchgeführt. Dadurch werden die akustischen Randbedingungen maßgeblich verändert. Die für eine thermoakustische Anfachung notwendige akustische Resonanz wird dabei dermaßen gedämpft und verstimmt, dass die Druckpulsationen direkt verschwinden.

Für die dauerhafte Behebung des Problems wird ein äquivalenter Lösungsansatz verfolgt. Von KCE wurden Pulsations-Dämpferplatten zur Installation am Austrittsflansch der beiden Filterbehälter ausgelegt, Abbildung 9. Bei der abschließenden Kontrollmessung konnte der Erfolg dieser Maßnahme direkt nachgewiesen werden. Bei den durchgeführten Untersuchungen im ursprünglich kritischen Betriebsbereich wurde ein nahezu stationäres Betriebsverhalten vorgefunden. Durch diese geringe Modifikation kann die Anlage dauerhaft weiter betrieben werden.

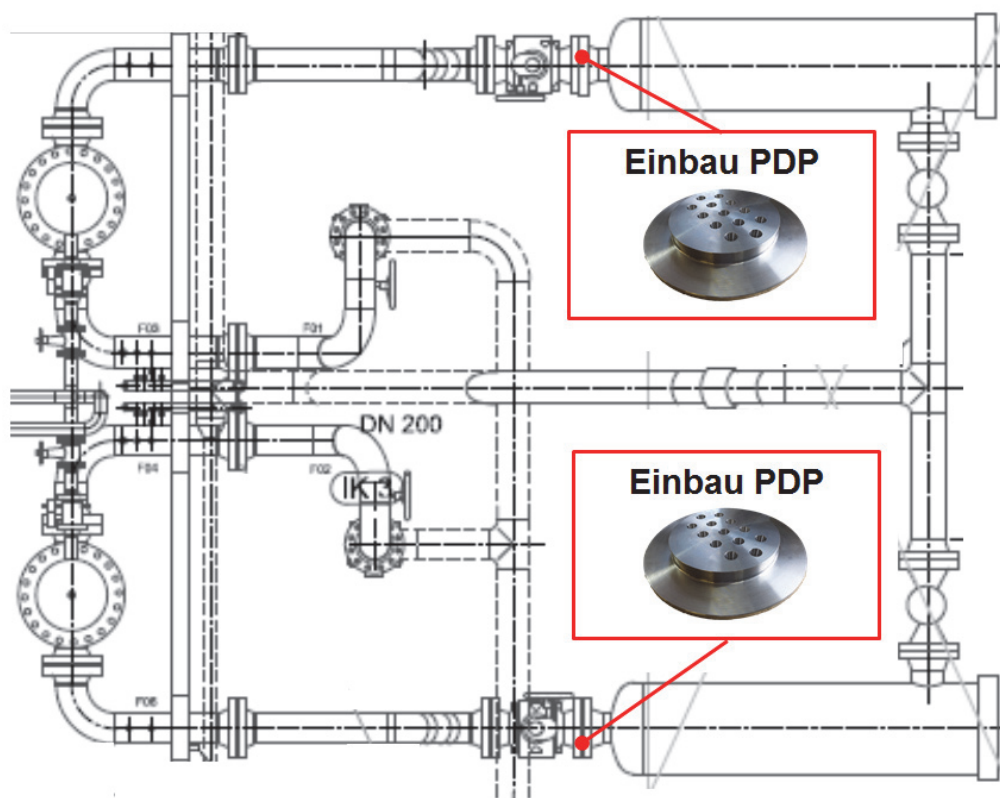


Abbildung 9: Einbauposition für anlagenspezifisch ausgelegte Pulsationsdämpferplatten als zielführende Minderungsmaßnahme