

Analyse und Beseitigung störender Gleichlaufabweichungen zwischen einem Ultraschall- und einem Wirbelzähler in einer DN 600 PN 100 Erdgas-Verteilerstation

Dr.-Ing. Andreas Brümmer
Dipl.-Ing. Heiko Slawig
Dipl.-Ing. Horst Jäkel



KÖTTER Consulting Engineers
Bonifatiusstraße 400
48432 Rheine
Tel. 0 59 71/97 10-0
Fax 0 59 71/97 10-43



VNG Verbundnetz Gas AG
Braunstraße 7
04347 Leipzig
Tel. 03 41/4 43-22 26
Fax 03 41/4 43-25 32



Armaturen- und Anlagentechnik GmbH

**artec Armaturen- und
Anlagentechnik GmbH**
Eichenallee 40
16767 Leegebruch (Berlin)
Tel. 0 33 04/2 88-11
Fax 0 33 04/2 88-77

Analyse und Beseitigung störender Gleichlaufabweichungen zwischen einem Ultraschall- und einem Wirbelzähler in einer DN 600 PN 100 Erdgas-Verteilerstation

Andreas Brümmer, Heiko Slawig und Horst Jäkel

Messen · Steuern · Regeln, Wirbelzähler, Ultraschallzähler, Gleichlaufdifferenz, Pulsationsmessung, Vielochscheiben

Bei der Inbetriebnahme einer neu errichteten M & R-Station für Erdgas ergaben sich erhebliche Gleichlaufabweichungen zwischen dem in Reihe geschalteten Ultraschall- und Wirbelzähler. Zur Beseitigung der Differenz wurde unter anderem die Einlaufstrecke der Zähler um 40 D verlängert sowie für beide Zähler eine zweite Hochdruckprüfung durchgeführt. Die erneute Hochdruckprüfung zeigte für den Ultraschallzähler einen bis heute unerklärlichen Versatz um 0,5 %, der zu einer entsprechenden Minderung der Gleichlaufdifferenz führt. Die Verlängerung des Einlaufes brachte keine Verbesserung. Die Gleichlaufgüte der Messstrecke war weiterhin nicht akzeptabel. Durch die zusätzliche Installation eines Turbinenzählers konnte der Wirbelzähler als primäre Quelle des Versatzes erkannt werden. Gleichzeitig wurde eine Abhängigkeit des Gleichlaufes von der Stellung des ca. 50 D stromab gelegenen Regelkugelhahns festgestellt. Wie eine detaillierte Pulsationsmessung belegte, besteht ein systematischer Zusammenhang zwischen dem Differenzdruck über dem Regelkugelhahn, den stochastischen Druck- und Strömungsschwankungen innerhalb der Messstrecke sowie der Gleichlaufabweichung zwischen Ultraschall- und Wirbelzähler. Offenbar führt eine Zunahme der stochastischen Strömungsschwankungen am Wirbelzähler bei gleichbleibendem Volumenstrom zu einer verminderten Anzeige. Die Wirbelablösefrequenz (Strouhalzahl) wird bei konstanter Reynoldszahl mit zunehmender Turbulenz (Intensität bzw. Kohärenzlänge) kleiner. Zur Sanierung wurde der Regelkugelhahn mit zwei Vielochscheiben bestückt, so dass das Erdgas zur Entspannung nicht mehr nur durch einen Querschnitt, sondern durch eine Vielzahl von Bohrungen strömen muss. Die Bohrungsanzahl sowie der Bohrungsdurchmesser werden hierbei mit zunehmender Öffnung des Regelkugelhahns größer. Durch diese Maßnahme konnten die stochastischen Schwankungen im Erdgasstrom deutlich reduziert werden. Gleichzeitig konnte der Gleichlauf zwischen Wirbelzähler und Ultraschallzähler signifikant verbessert werden, so dass er von allen Beteiligten akzeptiert wurde.

During the startup phase of a newly erected meter station for natural gas, considerable synchronism deviations were discovered between the ultrasonic and vortex meters arranged in series. In order to eliminate the difference, the inlet zone of the meters was extended by 40 D, among other things, and a second high pressure test was carried out for both meters. The renewed high pressure test showed for the ultrasonic meter a shift of 0,5% for which there is no explanation up to the present day, and this leads to a corresponding reduction of the synchronism difference. The extension of the inlet failed to produce any improvement. The synchronism quality of the measuring devices continued to be unacceptable. With the additional installation of a turbine meter, the vortex meter was positively identified as being the primary source of the shift. At the same time, a dependence of the synchronism on the position of the control ball valve located approx. 50 D downstream was determined. As verified by a detailed pulsation measurement, there is a systematic correlation between the differential pressure across the control ball valve, the stochastic pressure and velocity fluctuations within the measuring section as well as the synchronism deviation between the ultrasonic and vortex meters. Evidently, an increase of the flow turbulence at the vortex meter at constant volume flow led to a reduced indication. The vortex shedding frequencies (Strouhal number) decrease at constant Reynold's number with increasing turbulence (intensity and coherence length, respectively). As a remedial action, the control ball valve was equipped with two multi-hole discs so that the natural gas for expansion no longer has to flow through one cross-section but rather through a multitude of boreholes. In this case, the number of boreholes as well as the borehole diameters increase in amount and size with the increasing opening phase of the control ball valve. With this remedial action, the stochastic fluctuations in the natural gas flow were reduced significantly. At the same time, the synchronism between the vortex meter and the ultrasonic meter was improved significantly and was subsequently accepted by all participants.

Dr.-Ing. Andreas Brümmer, Kötter Consulting Engineers, Bonifatiusstraße 400, D-48432 Rheine, Dipl.-Ing. Heiko Slawig, VNG – Verbundnetz Gas AG, Braunstraße 7, D-04347 Leipzig, Dipl.-Ing. Horst Jäkel, artec Armaturen- und Anlagentechnik GmbH, Eichenallee 40, D-16767 Leegebruch b. Berlin.

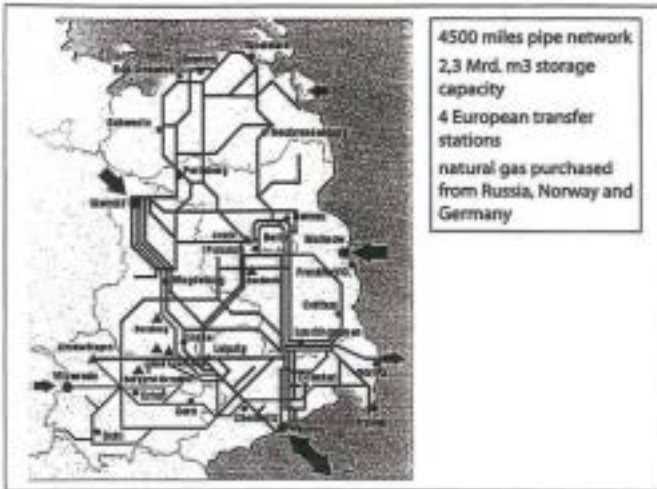


Bild 1. Lage der Station „Steinitz“ im Erdgasnetz der VNG-Verbundnetz Gas AG.

1. Einleitung

Die VNG betreibt im östlichen Teil Deutschlands ein etwa 7300 km langes Leitungsnetz für Erdgas (Bild 1). Eine der wichtigsten Stationen dieses Netzes ist die Gasübernahmestation Steinitz, die ca. 70 km nördlich von Magdeburg liegt. Seit der Inbetriebnahme ist die Station mit fünf Messschienen G4000 (max. 6500 m³/h) ausgerüstet, wobei jede Schiene aus einer Dauerreihenschaltung von Turbinenradzähler (TRZ) und Wirbelzähler (WBZ) besteht.

Aus systemplanerischer Sicht bestand ab dem Jahr 2000 die Notwendigkeit, die Übernahmekapazität der Station wesentlich zu erweitern. Hierfür ergab sich eine Variante in der zusätzlichen Montage von drei weiteren, baugleichen Messschienen. Aus Kostengründen und wegen der günstigeren Handhabung wurde jedoch der Neubau einer DN 600 PN 100-Messschiene favorisiert, die aus einer Dauerreihenschaltung eines Ultraschallzählers (USZ) und eines G25000 WBZ (max. 40 000 m³/h) besteht. Um eine kürzere Baulänge zu realisieren, wurde – auf Anregung der VNG – die Anordnung des USZ in der Einlaufstrecke des WBZ vorgesehen. Die Zulassungen sowohl für den USZ als auch für den WBZ mussten entsprechend geändert werden.

Neben den offensichtlichen Vorteilen dieser Lösung (keine bewegten mechanischen Teile und daher hohe Überlastsicherheit, Langzeitstabilität, große Durchsatzleistung, Diagnosemöglichkeiten des USZ, kurze Baulänge) wurden von vornherein die Ultraschallemissionen des einzusetzenden Regelgerätes hinsichtlich des USZ als kritisch eingestuft. Um eine Planungssicherheit für die Neuinstallation zu erlangen, wurde daher der Einfluss unterschiedlicher Bauformen von Regelarmaturen auf den USZ in einer DN 300 Erdgas-Messstrecke in Sayda untersucht. Hierbei erwiesen sich Regelkugelhähne als günstigste Variante. Gleichzeitig zeigten die Regelkugelhähne im Vergleich zu anderen Armaturen im Vollastbereich deutlich kleinere Druckverluste, so dass für Steinitz die Installation eines Regelkugelhahns vorgesehen wurde (Bild 2).

2. Voruntersuchungen

Die neue Messstrecke ging im November 1998 in Betrieb. Bereits bei geringen Volumenströmen (Strömungsgeschwindigkeit etwa 3 m/s) kam es jedoch durch Ultraschallstörpegel zum Totalausfall des Ultraschallzählers. Die Quelle für diese Störpegel war nicht der Regelkugelhahn, sondern der zusätzlich installierte Ultraschalldämpfer. Durch Ausbau und Rückgabe des Ultraschalldämpfers konnte diese Störung schnell beseitigt werden.

Weiterhin zeigte sich bei der Inbetriebnahme eine erhebliche Gleichlaufabweichung zwischen USZ und WBZ von etwa 1,3%. Diese Tatsache war unverständlich, da bei der Hochdruckprüfung beide Zähler maximal 0,5% voneinander abwichen und diese Differenz sogar im Mengenumwerter korrigiert wurde.

Zur Beseitigung der Gleichlaufabweichung wurden verschiedene Maßnahmen geprüft und realisiert, bevor eine zweite Hochdruckprüfung sowie die Verlängerung der Einlaufstrecke um 40 D umgesetzt wurden. Während der WBZ bei der erneuten Hochdruckprüfung annähernd seine HD-Kurve wieder fand, ergab sich am USZ ein systematischer Versatz von 0,5%. Die Ursache für diesen Versatz konnte bis heute nicht geklärt werden.

Bei der Inbetriebnahme der umgebauten Messstrecke zeigte sich jedoch, dass lediglich die erneute Hochdruckprüfung eine Verringerung des Versatzes auf jetzt 0,8% bewirkte. Die Verlängerung des Einlaufes hatte keinen Einfluss auf die Gleichlaufgüte der Zähler. Da dieser Zustand für eine Abrechnungsmessung weiterhin unbefriedigend war, wurde als dritte Messeinrichtung ein G16000 Turbinenradzähler (TRZ) (max. 25 000 m³/h) installiert. Durch den Vergleich der Zähler konnte der WBZ als primäre Quelle des Versatzes identifiziert werden. Damit stand fest, dass die Anlage den WBZ beeinflusst.

Um den physikalischen Grund für diese Beeinflussung zu ergründen, wurden in einem ersten Schritt durch den Hersteller des Zählers Pulsationsmessungen durchgeführt. Hierbei ergaben sich keinerlei kritische Werte für den WBZ. Anschließend wurden durch mehrfachen Umbau weitere anlagenbedingte Einflüsse (Einlaufstörungen, Funktion des Mengenumwerter, Druck- und Temperaturtransmitter) aus-

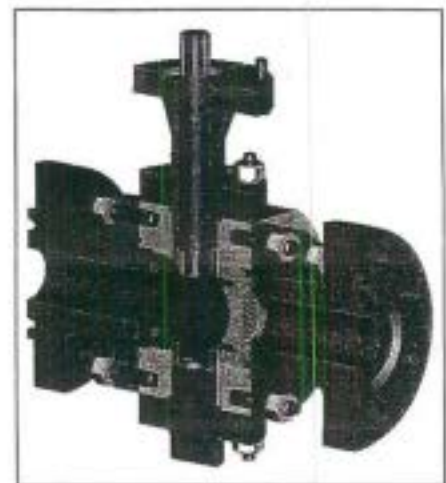


Bild 2. ARTEC-Regelkugelhahn mit geringen Ultraschallemissionen und Druckverlusten bei Vollast.

geschlossen, so dass als letzter möglicher Ursache der etwa 30 Meter (ca. $50 \times D$) stromab befindliche Regelkugelhahn verblieb. Zur Prüfung dieser Einflussgröße wurde in einem aufwendigen Versuch der Differenzdruck über der Station kurzzeitig abgesenkt, so dass der Öffnungswinkel des Regelkugelhahns von 20% auf 80% vergrößert werden konnte. Die Änderung des Messverhaltens des WBZ bezogen auf den USZ ist in Bild 3 dargestellt.

Als Ergebnis zeigten der WBZ und der USZ in verschiedenen Arbeitspunkten nur noch eine Gleichlaufabweichung von ca. 0,3%. Es entstand ein Versatz von ca. 1%. Damit ergaben sich zur Lösung des Problems „Gleichlaufdifferenz“ die folgenden Fragen:

- Wie kann eine Regelarmatur einen $50 \times D$ stromauf liegenden WBZ beeinflussen?
- Welche technischen Änderungen sind zur Minderung der Gleichlaufabweichung notwendig?

3. Pulsations- und Schwingungsmessung

Zur Klärung dieser Punkte wurde KÖTTER Consulting Engineers eingeschaltet und entschieden, eine umfassende

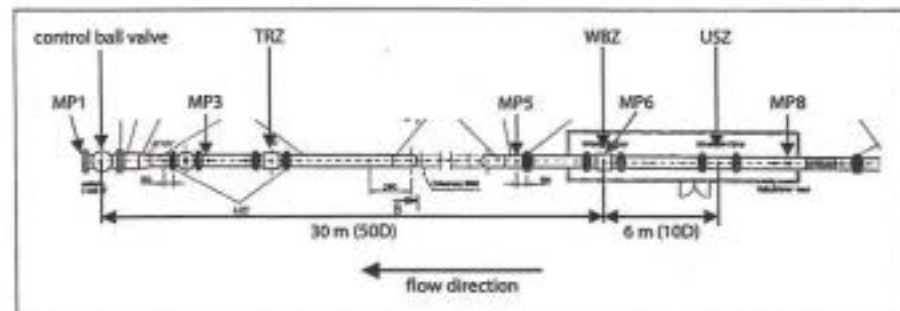


Bild 4. Aufbau der DN600 PN100 Messstrecke sowie Lage und Bezeichnung der Druckmesspunkte.

(TRZ Turbinenradzähler)
(WBZ Wirbelzähler)
(USZ Ultraschallzähler).

messtechnische Untersuchung an der Messstrecke durchzuführen. Hierbei wurden die Druckschwankungen im Erdgas an verschiedenen Stellen (Bild 4) zeitgleich mit den Strukturschwingungen am WBZ und den Schalldruckpegeln neben der Messstrecke erfasst. Gleichzeitig wurden die Nutzsignale der Mengenmessenrichtungen sowie weitere PLS-Daten aufgezeichnet. Die Messungen wurden bei verschiedenen Volumenströmen und Differenzdrücken über dem Regelkugelhahn bei nahezu konstantem statischem Druck innerhalb der Messstrecke durchgeführt.

Aus den gemessenen Rechteckimpulsen wurden anschließend pro Zähler die Betriebsvolumenströme ermittelt. Über die Beziehung

$$E_{WBZ} [\%] = \frac{\dot{V}_{WBZ} - \dot{V}_{USZ}}{\dot{V}_{USZ}} \cdot 100 \quad (1)$$

ergibt sich die Abweichung E_{WBZ} , die in Bild 5 für verschiedene Normvolumenströme über dem Differenzdruck aufgetragen ist. Aufgrund der fehlenden Berücksichtigung der

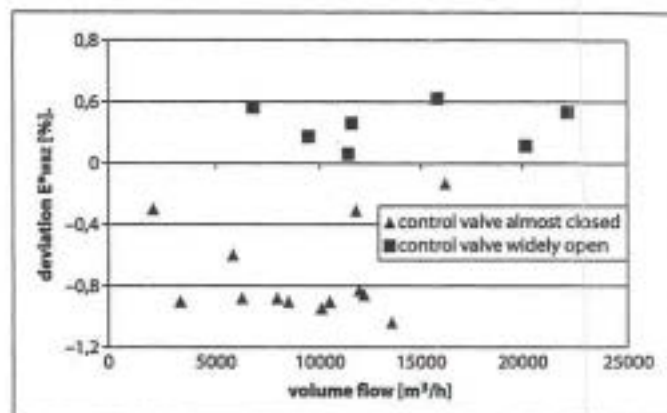


Bild 3. Abweichung der korrigierten Normvolumenströme E_{WBZ} zwischen Ultraschall- und Wirbelzähler über dem Betriebsvolumenstrom für verschiedene Stellungen des Regelkugelhahns.

Referenzdrücke und Temperaturen ist ein Vergleich der dargestellten Kurven unterschiedlicher Volumenströme nicht direkt möglich.

Auffällig ist ein pro Normvolumenstrom vorhandener systematischer Zusammenhang zwischen der Abweichung E_{WBZ} und dem Differenzdruck über dem Regelkugelhahn. Mit steigendem Differenzdruck zeigt der Wirbelzähler gegenüber dem Ultraschallzähler einen zunehmend kleineren Betriebsvolumenstrom an. Diese Gleichlaufänderung von bis zu 0,8% wird eindeutig durch den Regelkugelhahn verursacht, da bei konstantem Normvolumenstrom und statischem Druck keine weiteren Einflussparameter (z.B. Strömungsprofil, Drall) verändert werden.

Auch die effektiven Druckschwankungen zeigen einen systematischen Zusammenhang zwischen dem Volumenstrom und dem Differenzdruck

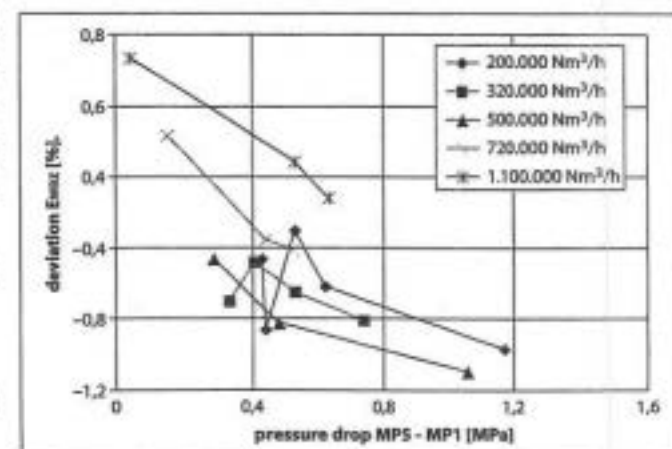


Bild 5. Prozentuale Abweichung E_{WBZ} der Betriebsvolumenströme zwischen Wirbel- und Ultraschallzähler über dem Differenzdruck für verschiedene Normvolumenströme.

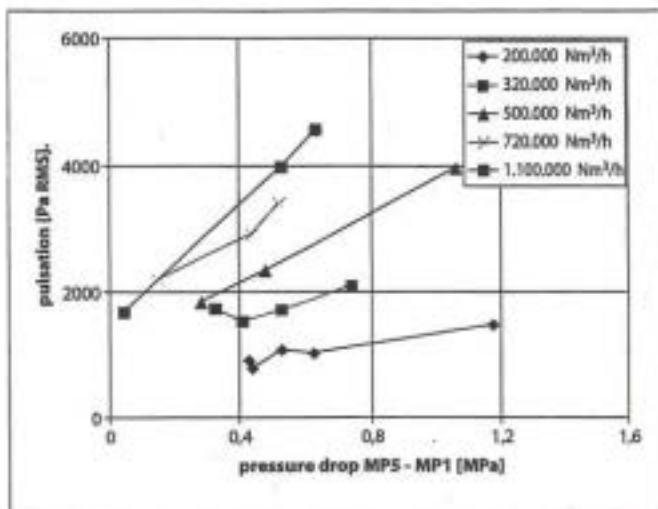


Bild 6. Effektivwerte der Druckschwankungen (2 bis 1.500 Hz) am Messpunkt MP8 über dem Differenzdruck für verschiedene Normvolumenströme (inkl. Stutzenresonanzen).

(Bild 6). Sie werden mit zunehmendem Durchsatz und Differenzdruck stärker.

Offenbar besteht ein innerer Zusammenhang zwischen der Gleichlaufgüte und den Druckschwankungen im Erdgasstrom. Zur weiteren Analyse wurde daher überprüft, ob sich in der Messstrecke relevante akustische Resonanzen (ebene Wellen oder Quermoden) ausbilden. Diese Resonanzen sind dafür bekannt, dass sie an Wirbelzählern primär zu Minderanzeigen führen. Durch den Vergleich der zeitgleich an verschiedenen Positionen gemessenen Drucksignale konnte diese Ursache jedoch eindeutig ausgeschlossen werden.

Die Effektivwerte der Druckschwankungen werden vielmehr durch ein breitbandiges Rauschen und die jeweiligen Stutzenresonanzen (MP8 ca. 1100 Hz) dominiert (Bild 7). Oberhalb von 200 Hz steigen die Schalldruckpegel mit dem Differenzdruck an. Der Regelkugelhahn emittiert in diesem Frequenzbereich mit zunehmendem Differenzdruck eine stärkere Schalleistung, die sich sowohl stromab als auch stromauf – also in Richtung der Messstrecke – ausbreitet.

Da keinerlei weitere systematische Zusammenhänge zwischen der Stellung des Regelkugelhahns und dem Gleichlauf

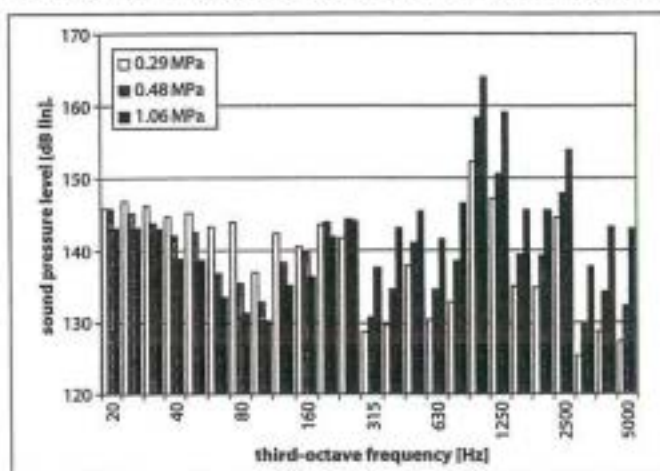


Bild 7. Schalldruckpegel am Messpunkt MP8 über den Terzmittenfrequenzen für verschiedene Differenzdrücke MP5 – MP1 bei einem Normvolumenstrom von 500.000 Nm³/h (inkl. Stutzenresonanzen).

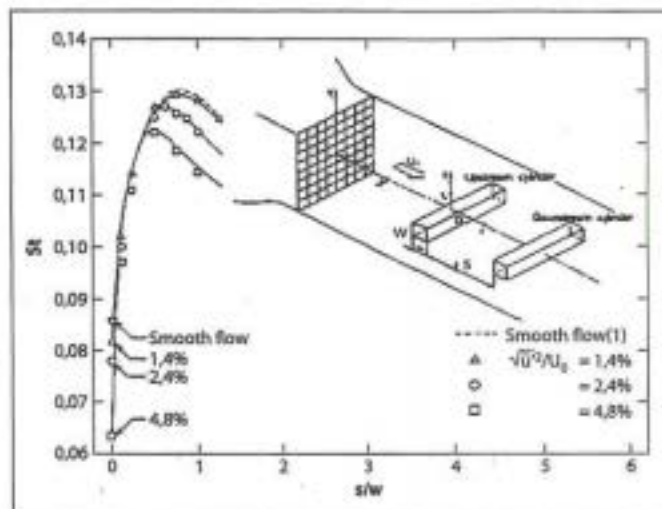


Bild 8. Versuchsaufbau und gemessene Strouhalzahlen (St) über dem Abstand zweier Prismen für verschiedene Turbulenzgrade und Kohärenzlängen innerhalb der Windkanalströmung [5].

zwischen WBZ und USZ festzustellen waren, lag die Vermutung nahe, dass der WBZ durch die stochastischen Druckschwankungen bzw. die zugehörigen Geschwindigkeitschwankungen beeinflusst wird. Durch eine gezielte Literaturrecherche konnte diese These untermauert werden [1–5]. Wie Windkanaluntersuchungen belegen, ist die Wirbelablösefrequenz (Strouhalzahl) nicht nur eine Funktion der Reynoldszahl, sondern auch vom Turbulenzgrad der Strömung und der zugehörigen Kohärenzlänge der Turbulenz abhängig (Bild 8) [5]. Mit zunehmender Turbulenz wird die Strouhalzahl kleiner. Bei konstanter mittlerer Strömungsgeschwindigkeit wird folglich der von einem WBZ angezeigte Volumenstrom mit steigender Turbulenz innerhalb des Gasstroms kleiner. Das entspricht dem im vorliegenden Fall beobachteten Verhalten des WBZ.

4. Sanierungsmaßnahmen

Die Ursache für die Beeinflussung des Gleichlaufes zwischen WBZ und USZ durch den Regelkugelhahn ist also in einer Zunahme der Schalldruckpegel und damit vermutlich auch der Turbulenz zu sehen. Mit steigender Turbulenz wird die Wirbelablösefrequenz bei unveränderter mittlerer Strömungsgeschwindigkeit (Reynoldszahl) kleiner. Der WBZ zeigt entsprechend einen zu kleinen Volumenstrom an.

Die Maßnahmen zur Sanierung müssen demnach auf eine Minderung der innerhalb der Messstrecke vorhandenen Schalleistung bzw. Turbulenzen abzielen. Die erforderliche Dämpfung konnte jedoch anhand der Messergebnisse nicht explizit benannt werden. Hierzu hätte die Schall- bzw. Turbulenzsituation während der Hochdruckprüfung dokumentiert werden müssen.

Als mögliche Maßnahmen wurde die Installation

- eines Absorptions-Schalldämpfers
- alternativer Regelarmaturen
- von Schallminderungsmaßnahmen für den Regelkugelhahn

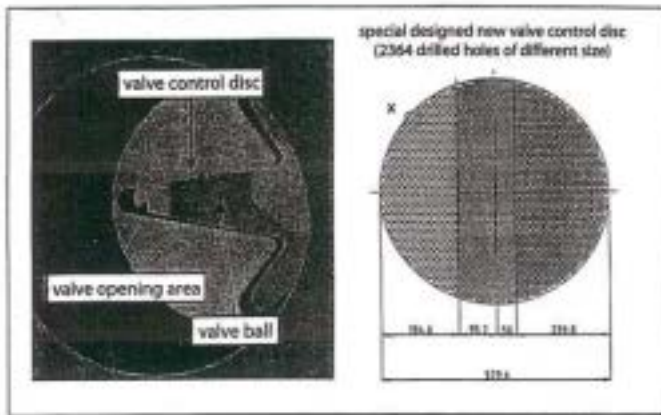


Bild 9. Skizze des Regelkugelhahns in der Position 25° geöffnet sowie der durch KÖTTER Consulting Engineers speziell ausgelegten Regelscheibe zur Minimierung der Schall- und Turbulenzemissionen des Regelkugelhahns.

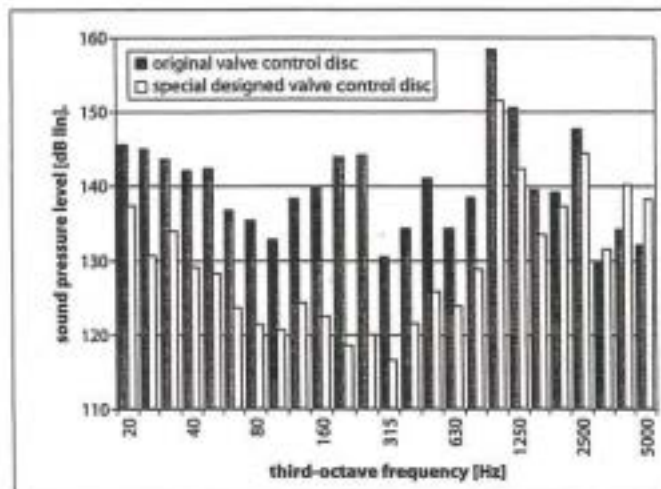


Bild 10. Schalldruckpegel am Messpunkt MP8 (inkl. Stützenresonanzen) über den Terzmittenfrequenzen für die ursprüngliche Ausführung und die speziell ausgelegten Regelscheiben (Viellochscheiben) für einen Normvolumenstrom von 500.000 Nm³/h und einem Differenzdruck von 0,5 MPa.

gegenübergestellt und bewertet. Parallel hierzu wurde die mögliche Schallminderungsmaßnahme für den Regelkugelhahn erarbeitet. Diese besteht in einem Austausch der Regelscheiben unmittelbar an der Regelkugel durch speziell ausgelegte Viellochscheiben (Bild 9). Mit öffnendem Regelkugelhahn wird der Strömung nicht mehr eine Fläche, sondern auf der Ein- und Austrittsseite eine zunehmende Zahl von Bohrungen freigegeben. Gleichzeitig wird der Bohrungsdurchmesser mit zunehmender Öffnung größer. Auf diese Weise konnte der bleibende Druckverlust des Regelkugelhahns im voll geöffnetem Zustand auf einem weiterhin akzeptablem Maß gehalten werden.

Nachdem die gute Wirksamkeit dieser Vorgehensweise an einem kleineren Regelkugelhahn experimentell verifiziert werden konnte, wurde entschieden, den DN 600 PN 100 Regelkugelhahn umzubauen. Im Mai 2001 ging die Schiene mit installierten Viellochscheiben in Betrieb. Exemplarisch ist die Wirkung der Modifikation hinsichtlich der Schalldruckpegel im Erdgas in Bild 10 dargestellt.

Der Summenpegel wird durch die Viellochscheiben um ca. 8 dB reduziert. Gleichzeitig konnte die vom Regelkugel-

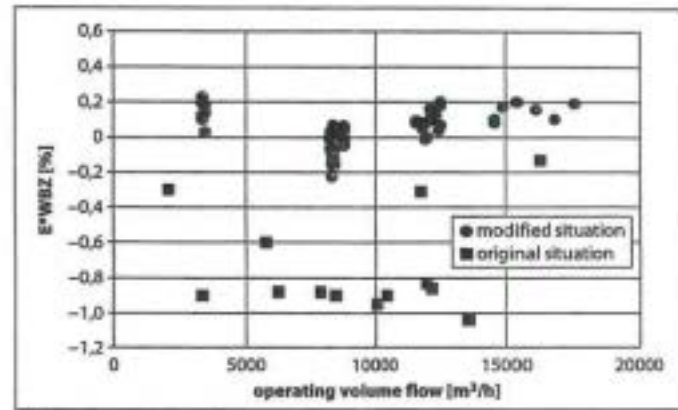


Bild 11. Prozentuale Abweichung der Normvolumenströme zwischen Wirbelzähler und Ultraschallzähler inklusive aller Korrekturen (Hochdruckprüfung, Druck, Temperatur) E^*_{WBZ} für die Situation vor und nach Umsetzung der Abhilfemaßnahme.

hahn und den angrenzenden Rohrleitungen emittierte Schalleistung auf ca. 89 dB(A) bei 720.000 Nm³/h und einen Differenzdruck von 3,6 bar reduziert werden. Diese Minderung setzt sich aus einer Zunahme der Druckschwankungen oberhalb und einer starken Pegelabnahme unterhalb von 3 kHz zusammen. Erwartungsgemäß führen die Viellochscheiben demnach zu einem Anstieg der Frequenz der maximalen Schallemissionen.

Auch auf den Gleichlauf von WBZ und USZ hat die Maßnahme einen entscheidenden Einfluss. Die Minderung der Druck- und Strömungsschwankungen führt zu einem Versatz der vom WBZ angezeigten Betriebsvolumenströme von bis zu einem Prozent. Unter Berücksichtigung der Zählerkennlinien aus den HD-Prüfungen sowie der Temperatur- und Druckkompensation stellte sich endlich ein für alle Beteiligten zufriedenstellender Gleichlauf ein (Bild 11).

Formelzeichen

D	Rohrleitungs-Innendurchmesser
E_{WBZ}	prozentuale Abweichung der Betriebsvolumenströme zwischen WBZ und USZ (Gleichung (1))
E^*_{WBZ}	prozentuale Abweichung der korrigierten Normvolumenströme zwischen WBZ und USZ
s	Abstand zweier Prismen
\dot{V}_{WBZ} (\dot{V}_{USZ})	Betriebsvolumenströme vom WBZ (USZ)
w	Dicke eines Prisma
TRZ	Turbinenradzähler
USZ	Ultraschallzähler
WBZ	Wirbelzähler

Literatur

- [1] Ericsson, Reding: Criterion for vortex periodicity in cylinder wakes. AIAA Journal Vol 17, (1979).
- [2] Surry, D.: Some effects of intense turbulence on the aerodynamics of a circular cylinder at subcritical Reynolds number. Journal of Fluid Mechanics, Volume 52, (1972).
- [3] Wu, J.-S.: The structure of sphere wakes at intermediate Reynolds number in still and turbulent environments. Dissertation der Michigan Univ., (1994).
- [4] Novak, J.: Strouhal number of bodies and flat grid in the air flow. Acta Technica CSAV, Volume 19, (1974).
- [5] Sakamoto, Hani: Effect of free-stream turbulence on characteristics of fluctuating forces acting on two square prisms in tandem arrangement. Transactions of the ASME, 140, vol. 110 (1988).