

# Gasmengenmessungen in pulsierenden Strömungen

## Mengenmessfehler erkennen, analysieren, sanieren

Andreas Brümmer

### Rohrnetz, Speicher, Pulsationen, Kolbenverdichter, Wirkdruckmesseinrichtung

Nach einer kurzen Beschreibung der Auswirkungen pulsierender Strömungen werden die physikalischen Gründe für pulsationsbedingte Mengenmessfehler an Wirkdruckmesseinrichtungen, Turbinenradzählern und Wirbelgaszählern erläutert. Abschließend werden zwei Fälle aus der Praxis vorgestellt, in denen es durch Pulsationen zu erheblichen Fehlmessungen kam. Die Vorgehensweise zur Analyse dieser Probleme sowie die Sanierungsmaßnahmen werden beschrieben.

After a short introduction to pulsating flows in pipes the physical reasons for disturbing flowrate deviations at differential pressure devices, turbine and vortex shedding flowmeters are explained. Subsequently two case studies with unacceptable high deviations caused by pulsating flows are discussed. A recommended way to analyze and solve these problems will be described.

## 1. Einleitung

In einer Untergrund-Kavernen-Speicheranlage werden zum Einspeichern von Erdgas mehrere Kolbenverdichter betrieben. Die eingelagerte Gasmenge wird über parallele Messstrecken mit Turbinenradzählern erfasst. Auch beim Ausspeichern des Erdgases werden die Messstrecken durchfahren, wobei in diesem Fall die Kolbenverdichter außer Betrieb sind.

Bei der Bilanzierung der ein- und ausgespeicherten Gasmassen wurde eine signifikante Abweichung festgestellt. Die eingelagerte Erdgasmenge war erheblich größer als die wieder ausgelagerte Menge. Es wurde zunächst vermutet, dass Erdgas aus der primären Speicherkaverne in benachbarte Kavernen diffundiert sei. Zur Prüfung dieser Annahme wurden aufwendige und kostenintensive seismologische Untersuchungen durchgeführt, die jedoch nicht den gewünschten Erfolg brachten. Für die Mengendifferenz zwischen Ein- und Ausspeicherung waren vielmehr – wie sich später zeigte – Volumenstrompulsationen verantwortlich, die beim Einspeichern durch den Betrieb der Kolbenverdichter angeregt wurden und an den Turbinenradzählern zu einem positiven Messfehler (angezeigte Menge > tatsächliche Menge) führten. Beim Ausspeichern waren die Verdichter nicht aktiv, so dass die Turbinenradzähler den tatsächlichen Durchfluss anzeigten. Insgesamt entstand auf diese Weise der Eindruck, aus der Kaverne würde Gas entweichen.

Das Beispiel zeigt deutlich, dass bereits das Erkennen möglicher pulsationsbedingter Mengenmessfehler ein Problem darstellt. Zur Beseitigung empfiehlt sich dann eine systematische Analyse der Ursache, bevor in Kenntnis der physikalischen Zusammenhänge eine gezielte und kostengünstige Sanierungsmaßnahme ausgearbeitet werden kann.

Zur Einführung in die Problematik wird im weiteren zunächst der physikalische Zusammenhang zwischen einer Pulsation und dem Mengenmessfehler für Wirkdruckmesseinrichtungen, Turbinenradzähler und Wirbelgaszähler beschrieben. Anhand von Fällen aus der Praxis werden anschließend verschiedene Anlagenausführungen vorgestellt, in denen es zu pulsationsbedingten Mengenmessfehlern kam. Die Vorgehensweise zur Analyse dieser Mengenmessfehler sowie die realisierten Abhilfemaßnahmen werden benannt.

## 2. Wirkung von pulsierenden Strömungen auf Mengenmesseinrichtungen

### 2.1 Wirkdruckmesseinrichtungen

Bei den Wirkdruckmesseinrichtungen wird in das vom Fluid durchströmte Rohr eine Querschnittsverengung (z. B. Blende, Düse, Venturirohr) eingebaut. In der Einschnürung erhöht sich die Strömungsgeschwindigkeit auf Kosten der Druckenergie. In Abhängigkeit vom Drosselgerät stellt sich entlang der Rohrachse ein typisches Strömungsbild mit einer entsprechenden Druckverteilung ein. Durch Abgreifen der Druckverteilung an zwei Positionen läßt sich ein Differenzdruck messen, der als Wirkdruck bezeichnet wird und proportional zum Quadrat der mittleren Strömungsgeschwin-

Dr.-Ing. Andreas Brümmer, Kötter Consulting Engineers, Bonifatiusstraße 400, D-48432 Rheine.

digkeit ist. Die Lage der Druckentnahmestellen ist für jedes Drosselgerät in [1] festgelegt.

Bei geringen Pulsationsfrequenzen (i. d. R. kleiner 20 Hz) und Messstellen mit möglichst großen Wirkdrucksignalen kann eine Wirkdruckmesseinrichtung als nahezu trägheitslos angesehen werden. Der beschriebene Zusammenhang ist dann näherungsweise fortwährend gültig, wobei jedoch sowohl der Wirkdruck als auch der Massenstrom zeitabhängige Funktionen werden.

Für den im zeitlichen Mittel transportierten Massenstrom ergibt sich weiterhin die Proportionalität

$$\overline{q_m(t)} \sim \sqrt{\overline{\Delta p(t)}} \quad (1)$$

Aus strömungstechnischer Sicht kommt es folglich an der Messstelle durch eine niederfrequente Pulsation zu keinem Messfehler. Erst die Arbeitsweise der üblicherweise installierten Differenzdrucktransmitter führt zu einem Mengenmessfehler. Der Grund hierfür ist die zeitliche Mittelung des Wirkdruckes  $\overline{\Delta p(t)}$  – und nicht wie erforderlich des radizierten Wirkdruckes  $\sqrt{\overline{\Delta p(t)}}$  – im Differenzdrucktransmitter.

Infolge der Ungleichheit

$$\sqrt{\overline{\Delta p(t)}} \neq \overline{\sqrt{\Delta p(t)}} \quad (2)$$

ist der mit dem zeitlichen Mittelwert des Wirkdruckes berechnete Massenstrom fehlerbehaftet. Dieser pulsationsbedingte Messfehler wird Wurzelfehler genannt.

Für eine sinusförmige Massenstrompulsation der Kreisfrequenz  $\omega$

$$q_m(t) = \overline{q_{m,IST}}(1 + I \sin \omega t) \quad (3)$$

mit

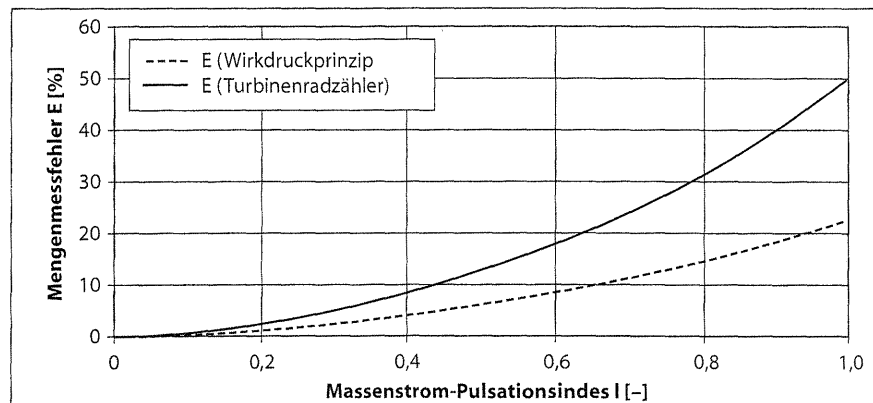
$I \in [0,1]$  Massenstrom-Pulsationsindex  
(Amplitude der Massenstrompulsation  
bezogen auf den mittleren Massenstrom)

kann der Mengenmessfehler E

$$E[\%] = \frac{q_{m,Fehl} - \overline{q_{m,IST}}}{\overline{q_{m,IST}}} \cdot 100 \quad (4)$$

mit

$q_{m,Fehl}$  angezeigter, fehlerhafter Massenstrom  
 $q_{m,IST}$  tatsächlicher, wahrer Massenstrom



**Bild 1.** Mengenmessfehler einer Wirkdruckmessstelle sowie maximaler Messfehler eines Turbinenradzählers infolge einer sinusförmigen Massenstrompulsation.

näherungsweise analytisch über die Beziehung

$$E[\%] = (\sqrt{1 + 0,5I^2} - 1)100 \quad (5)$$

berechnet werden ((Bild 1) [2]).

Die Volumenstrom- bzw. Massenstromschwankung einer pulsierenden Strömung führt an einer Wirkdruckmesseinrichtung zu einem positiven Messfehler. Im Vergleich zum tatsächlichen Durchfluss ist der angezeigte Mengenstrom entsprechend zu groß.

Sofern die Pulsationsfrequenz nicht mehr als gering einzustufen ist, muss der Proportionalität (1) ein Term zur Beschreibung der Wirkdruckänderung infolge der lokalen, zeitabhängigen Beschleunigung des Fluids angehängt werden [3, 4]. Bei einer sinusförmigen Pulsation hat diese Erweiterung jedoch keinen Einfluss auf den Wurzelfehler.

## 2.2 Turbinenradzähler

Die Arbeitsweise von Turbinenradzählern basiert auf einem weitgehend linearen Zusammenhang zwischen dem Volumenstrom, der durch den Turbinenradzähler strömt, und der Drehgeschwindigkeit des Turbinenrades. In der Regel sind im Gehäuse eines Turbinenradzählers sogenannte HF-Geber installiert, die jeweils beim Passieren eines Flügels vom Turbinenrad einen Impuls ausgeben. Jeder Impuls entspricht einer bestimmten durchgesetzten Gasmenge.

Wird ein Turbinenradzähler einer pulsierenden Strömung ausgesetzt, dann zeigt er einen zu großen Durchsatz an. In einem einfachen Versuch lässt sich dieser Fehler erläutern:

Eine plötzlich einsetzende Strömung  $q_{m,IST}$  (Bild 2a) führt binnen kurzer Zeit zu einer entsprechenden Drehzahl des Turbinenrades. Die Minderanzeige  $q_{m,Fehl} - q_{m,IST}$  (gerasterte Fläche) des Zählers infolge seiner Trägheit ist gering. Setzt die Strömung jedoch plötzlich aus, dann läuft das Turbinenrad lange nach. In diesem Fall zeigt der Turbinenradzähler einen deutlich zu großen Durchsatz an (schraffierte Fläche). Der insgesamt von einem Turbinenradzähler festgestellte Massenstrom ist demnach im intermittierenden Betrieb zu groß.

Vergleichbare Verhältnisse ergeben sich bei einer pulsierenden Strömung (Bild 2b). Dem ansteigenden Volumenstrom kann das Turbinenrad besser folgen (geringe Minderanzeige) als dem abfallenden Volumenstrom (große Mehranzeige). Entsprechend ist auch bei diesen Betriebsbedingungen der insgesamt vom Turbinenradzähler gemessene Durchsatz größer als der tatsächliche Wert.

Auch für Turbinenradzähler kann der pulsationsbedingte Messfehler näherungsweise analytisch berechnet werden [1, 5, 6, 7]. Für einen bekannten Massenstrom-Pulsationsindex I (vgl. Gl. (3)) ergibt sich der maximale Messfehler E (vgl. Gl. (4)) eine monofrequente Pulsation anhand von

$$E[\%] = 50 I^2 \quad (6)$$

Der Zusammenhang ist ebenfalls in Bild 1 dargestellt. Bei gleicher Pulsationsstärke zeigt ein Turbinenradzähler

gegenüber einer Wirkdruckmeseinrichtung im ungünstigsten Fall einen deutlich größeren pulsationsbedingten Messfehler an.

Dieser maximale Fehler wird jedoch nur bei relativ hohen Pulsationsfrequenzen und/oder geringen mittleren Massenströmen erreicht. Mit abnehmender Frequenz und/oder zunehmendem Massenstrom kann das Turbinenrad der Massenstromschwankung besser folgen, so dass der Messfehler kleiner wird. Bei sehr langsamen Pulsationen und großen Durchsetzen tendiert der pulsationsbedingte Messfehler eines Turbinenradzählers gegen Null.

### 2.3 Wirbelgaszähler

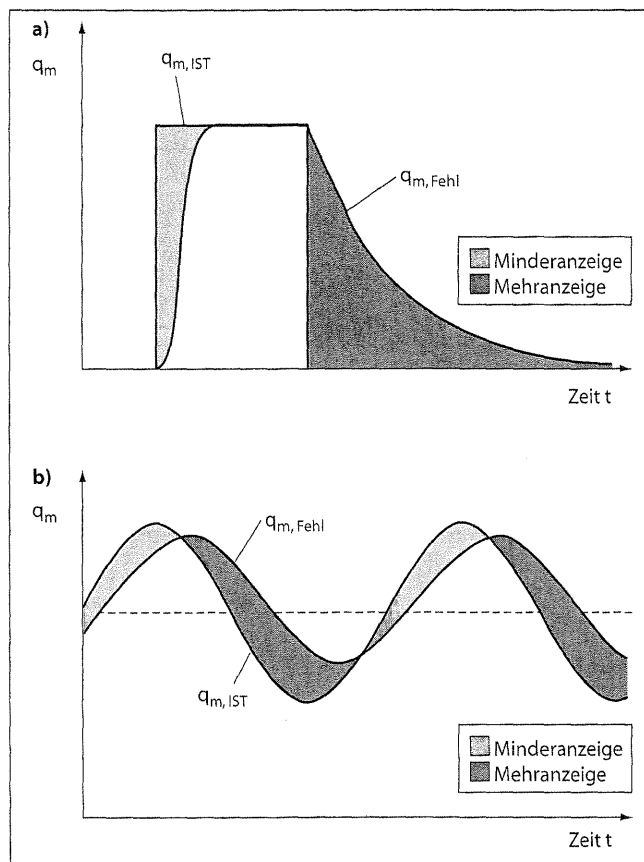
Wirbelgaszähler bestehen aus einem Rohrleitungsabschnitt mit einem quer zur Strömung eingesetzten Störkörper bestimmter Geometrie. An diesem Störkörper lösen auf der Abströmseite periodisch Wirbel ab. Die Ablösefrequenz der Wirbel ist im Arbeitsbereich des Zählers nahezu proportional zur mittleren Strömungsgeschwindigkeit. Die Anzahl der abgelösten Wirbel ist folglich ein Maß für die transportierte Gasmenge.

Verschiedene Hersteller benutzen unterschiedliche Prinzipien bei der Erfassung der Wirbel. Es werden Drucksensoren, Dehnungsmessstreifen oder Thermistoren verwendet, wobei jedes Verfahren seine spezifischen Vor- und Nachteile hat. Eine ungewollte Beeinflussung der Proportionalität zwischen der Wirbelablösefrequenz und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit kann jedoch von keinem Verfahren ausgeglichen oder erkannt werden.

Gerade dieser Effekt wird aber durch eine pulsierende Strömung an einem Wirbelgaszähler ausgelöst [1; 8]. Neben dem Pulsationsindex I ist hierbei das Verhältnis der Pulsationsfrequenz  $f_p$  zur Wirbelablösefrequenz  $f_v$  ein entscheidender Parameter. Bei bestimmten Verhältnissen  $f_p/f_v$  kommt es zu einem sogenannten „Einrasten“ der Wirbelablösefrequenz. Die Ablösefrequenz ist dann nicht mehr proportional zur Strömungsgeschwindigkeit, sondern bleibt zum Teil über breite Volumenstrombereiche konstant. Der hierbei auftretende absolute Messfehler eines Wirbelgaszählers kann sehr groß werden (z. B. größer 80%). In der Regel wird vom Zähler eher ein zu kleiner Durchfluss angezeigt ( $E < 0$ ), es sind jedoch auch durchaus erhebliche Mehranzeigen möglich. Im Gegensatz zu den Wirkdruckmeseinrichtungen und den Turbinenradzählern ist eine Berechnung des Messfehlers E bei Wirbelgaszählern – auch bei bekannten Strömungsverhältnissen – zur Zeit noch nicht möglich. Es lässt sich jedoch eine maximal zulässige Pulsationsamplitude benennen, unterhalb der ein signifikantes „Einrasten“ der Wirbel nicht beobachtet wird.

Das „Einrasten“ oder „lock-in“ der Wirbelablösung auf die Pulsationsfrequenz wird primär bei den Verhältnissen  $f_v/f_p = 0,5$  (1. Mode),  $f_v/f_p = 1$  (2. Mode),  $f_v/f_p = 1,5$  (3. Mode) und  $f_v/f_p = 2$  (4. Mode) beobachtet. Mit Hilfe der experimentell ermittelten Verdrängungsamplitude A [9; 10] lässt sich der maximal zulässige Pulsationsindex  $I_{max}$  für jeden Mode anhand von

$$I_{max} = A \frac{2\pi f_p \delta}{v_0} \quad (7)$$



**Bild 2.** Qualitativer Verlauf des angezeigten Massenstromes  $q_{m,Fehl}$  eines Turbinenradzählers bei intermittierendem (a) und pulsierendem (b) tatsächlichen Massenstrom  $q_{m,IST}$ .

mit

- A Verdrängungsamplitude, bei der zum ersten Mal das „Einrasten“ der Wirbelablösung beobachtet wird ( $A = 0,01$  (1. Mode),  $A = 0,02$  (2. Mode),  $A = 0,04$  (3. Mode),  $A = 0,1$  (4. Mode))
- $\delta$  Störkörper-Durchmesser des Wirbelgaszählers
- $f_p$  Pulsationsfrequenz
- $v_0$  mittlere Strömungsgeschwindigkeit am Wirbelgaszähler
- $I_{max}$  maximal zulässiger Massenstrom- bzw. Volumenstrom-Pulsationsindex am Wirbelgaszähler

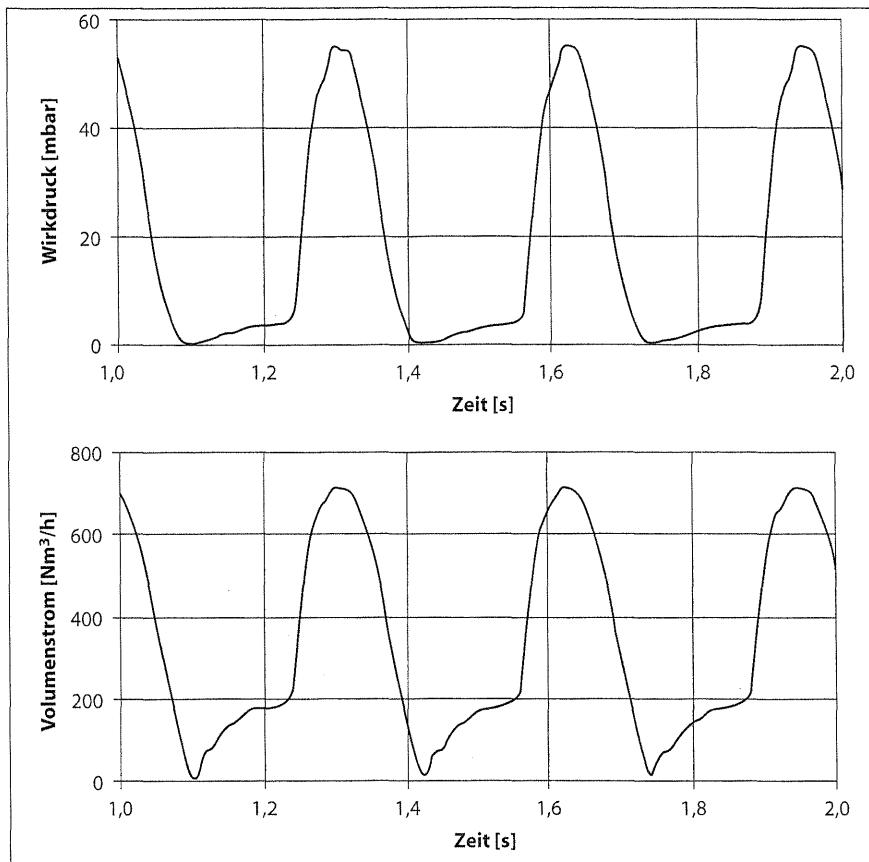
berechnen. Wird dieser maximale Pulsationsindex nicht überschritten, dann wird der pulsationsbedingte Messfehler voraussichtlich unterhalb von einem Prozent liegen.

Prinzipiell erweist sich als günstig, die Wirbelablösefrequenz – bei möglichst kleinem Störkörper-Durchmesser  $\delta$  – im Vergleich zur Pulsationsfrequenz möglichst hoch zu wählen. Für Verhältnisse  $f_v/f_p > 3$  führen sogar Pulsationsindizes I von 20% zu keinen signifikanten pulsationsbedingten Messfehlern mehr.

## 3. Praxisbeispiele

### 3.1 Blendenmessstelle in einer $H_2$ -Abfüllanlage

In einer neu errichteten Anlage zur Erzeugung und Abfüllung von Wasserstoff in Flaschenpakete werden drei Mem-



**Bild 3.** Wirkdruckschwankung (oben) sowie zugehörige Volumenstromschwankung (unten) einer Blendenmessstelle innerhalb der Saugsammelleitung dreier Membranverdichter.

branverdichter eingesetzt. Die Verdichter sind drehzahlregelt und können je nach gewünschter Menge zugeschaltet werden. In der Saugsammelleitung der Verdichter findet kurz hinter dem Sammelbehälter eine Gasmengenmessung anhand einer Messblende statt.

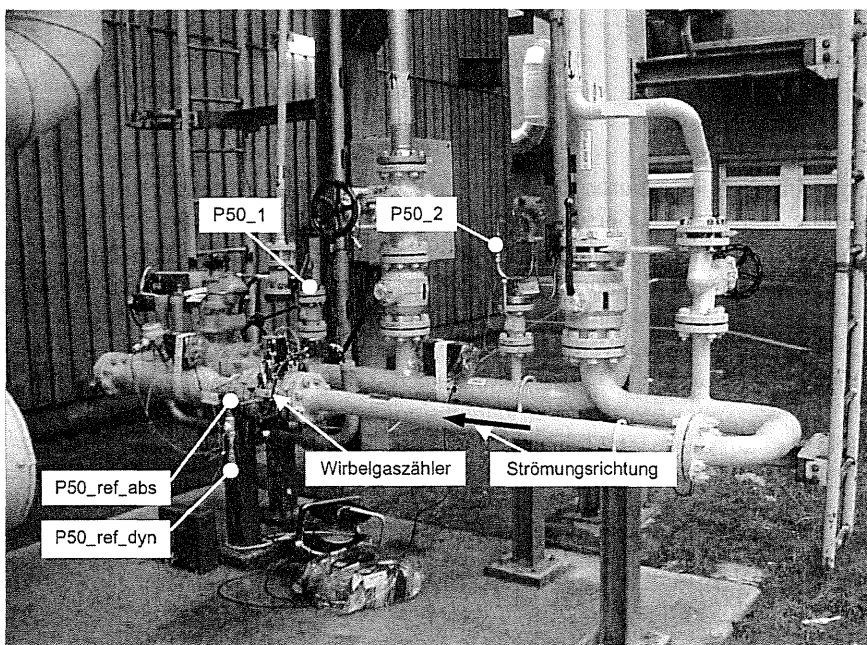
anhand der Proportionalität (1) direkt aus der Wirkdruckschwankung berechnen.

Auch der pulsationsbedingte Messfehler der Blendenmessstelle kann im vorliegenden Fall unmittelbar aus der Wirkdruckschwankung  $\Delta p(t)$  über

$$E[\%] = \frac{\sqrt{\overline{\Delta p(t)^2}} - \sqrt{\overline{\Delta p(t)}}}{\sqrt{\overline{\Delta p(t)}}} \cdot 100 \quad (8)$$

ermittelt werden. Es ergibt sich ein Messfehler von  $E = 26\%$ . Unter der Annahme, dass es sich um eine nahezu sinusförmige intermittierende Volumenstrompulsation handelt, kann der Pulsationsindex mit  $I = 1$  abgeschätzt werden. Über Gleichung (5) ergibt sich damit ein auf einfache Weise bestimmter Messfehler von 22%, der bereits relativ gut mit dem tatsächlichen Messfehler übereinstimmt.

Zur Ausarbeitung einer Sanierungsmaßnahme wurde für den betreffenden Rohrleitungsabschnitt zwischen Sammelbehälter und Verdichter eine numerische Simulation der Strömungsverhältnisse durchgeführt. Nach einer Abstimmung des theoretischen Modells mit den Messdaten wurden verschiedene Maßnahmen hinsichtlich ihrer Wirkung numerisch geprüft. Ziel



**Bild 4.** Lage und Bezeichnung der Messstellen im Bereich des H<sub>2</sub>-Wirbelgaszählers auf dem Gelände des Erzeugers.

war es hierbei, den pulsationsbedingten Messfehler der Blendenmessstelle auf unter ein Prozent zu reduzieren. In Verbindung mit dem Betreiber wurde letztendlich die Installation eines speziell ausgelegten Pulsationsdämpfers innerhalb der Saugsammelleitung vorgesehen.

### 3.2 Wirbelgaszähler in einer H<sub>2</sub>-Transportleitung

In einer neu errichteten H<sub>2</sub>/CO-Anlage wird zum Transport von Wasserstoff ein Kolbenverdichter betrieben. Die geförderte Gasmenge wird auf der Druckseite des Verdichters sowohl beim Erzeuger als auch beim Abnehmer durch Wirbelgaszähler erfasst. Bei der Inbetriebnahme der Anlage kam es zu Störungen bzw. zum Ausfall der Messeinrichtungen, als deren Ursache die vom Verdichter erzeugten Pulsationen vermutet werden.

Zur Analyse der Fehlmessungen wurden die Druckpulsationen im Bereich des Wirbelgaszählers beim Erzeuger (Bild 4) an mehreren Messorten zeitgleich mit den Nutzsignalen des Zählers (Wirbelablösesignale) für verschiedene Betriebsbedingungen gemessen. Die an den Messpunkten P50\_1 und P50\_2 festgestellten Druckpulsationen sind in Bild 5 aufgetragen. Die dominante Pulsationsfrequenz von 20 Hz entspricht der doppelten Drehzahl des Verdichters.

Mittels der zeitgleich gemessenen Druckpulsationen der beiden Messpunkte lassen sich pro Frequenz die Amplituden der Volumenstrompulsationen am Ort des Wirbelgaszählers ermitteln (Bild 6).

Zur Verdeutlichung der Wirkung dieser Volumenstrompulsation auf die Ausbildung der Wirbelstraße am Störkörper des Zählers ist in Bild 7 die Wirbelablösefrequenz über der Zeit dargestellt. Entgegen der in einer stationären Strömung aufgrund des mittleren Volumenstroms erwarteten 48 Hz rastet die Wirbelablösefrequenz temporär auf die Pulsationsfrequenz von 20 Hz ein und springt dann in den Bereich von 48 Hz zurück.

Die zur Sanierung der Messeinrichtung benötigte minimale Dämpfung kann über den maximal zulässigen Pulsationsindex  $I_{max}$  anhand von Gleichung (7) bestimmt werden (Bild 8).

Zusammen mit dem Betreiber der Anlage wurde entschieden, diese Dämpfung durch die Installation einer regelbaren Drosselstelle (Regelventil) sowie eines Helmholtz-Resonators zu verwirklichen. Zur Auslegung des Helmholtz-Resonators wurden die strömungstechnischen Verhältnisse zwischen dem Verdichter und dem Wirbelgaszähler ohne und mit Minderungsmaßnahmen numerisch simuliert. Der optimierte Helmholtz-Resonator wurde anschließend als

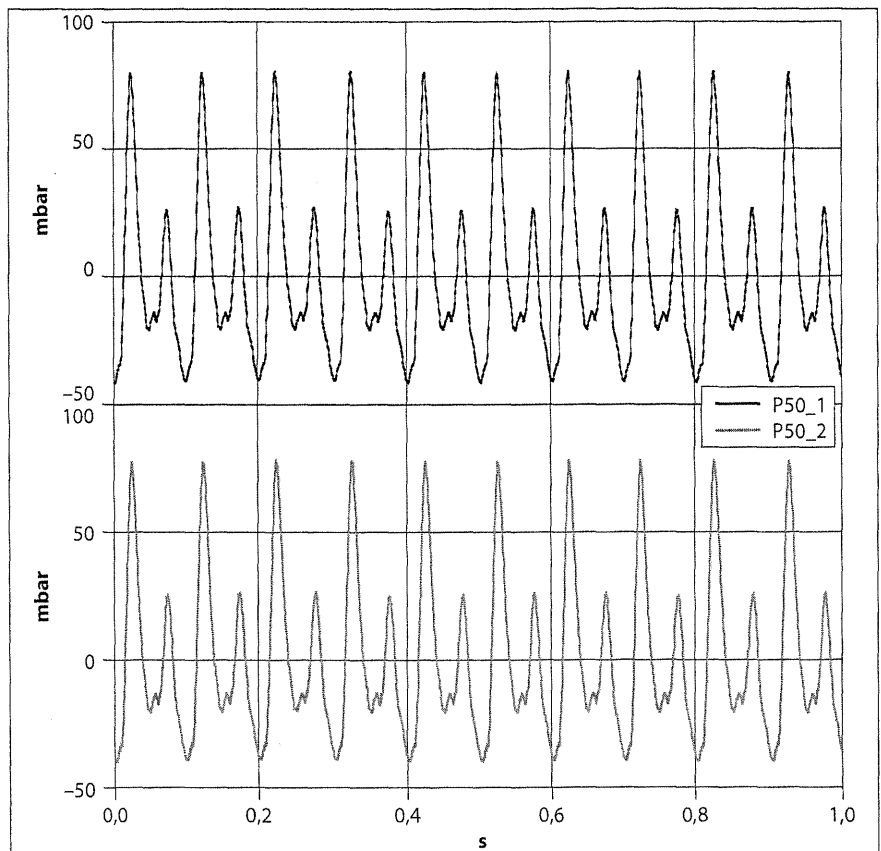


Bild 5. Zeitgleich erfasste Druckpulsationen an den Messstellen P50\_1 und P50\_2.

Abzweig-Resonator ausgeführt (Bild 9) und zusammen mit der Drosselstelle installiert. Durch diese Maßnahmen konnte die Pulsation um insgesamt über 30 dB gemindert und der pulsationsbedingte Messfehler der beiden Wirbelgaszähler auf unter 1 % reduziert werden.

## 4. Zusammenfassung

Nach einer kurzen Beschreibung der Auswirkungen pulsierender Strömungen werden die physikalischen Gründe für pulsationsbedingte Mengemessfehler an Wirkdruckmeseinrichtungen, Turbinenradzählern und Wirbelgaszählern erläutert.

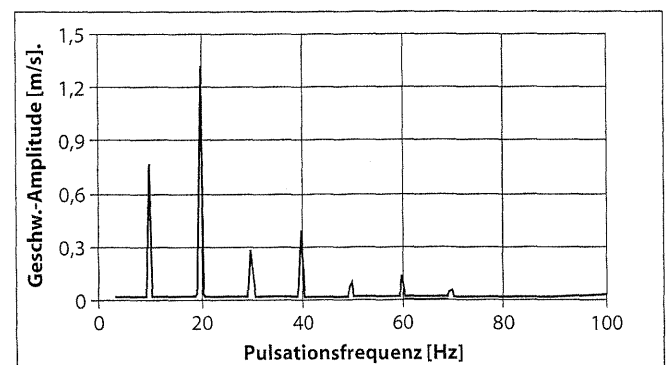
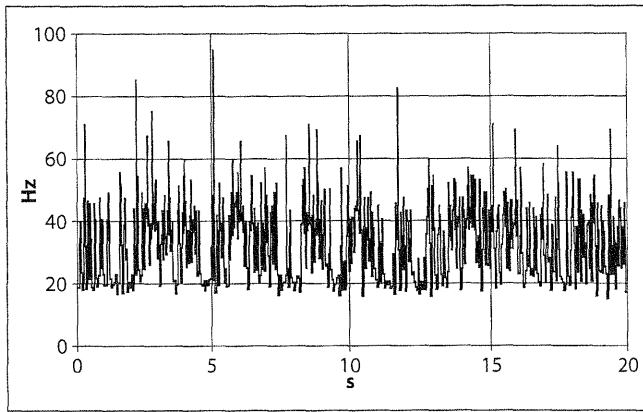
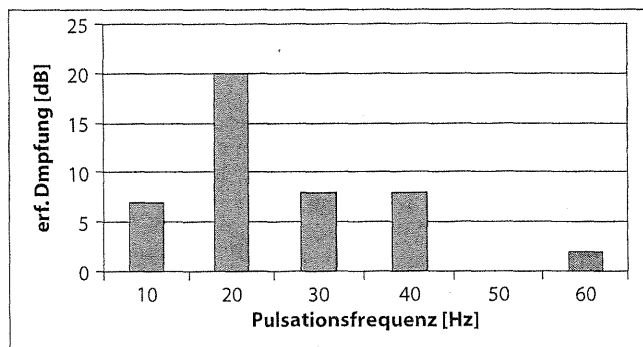


Bild 6. Aus den Druckpulsationen berechnetes Amplitudenspektrum der Geschwindigkeitsschwankung am Ort des Wirbelgaszählers.

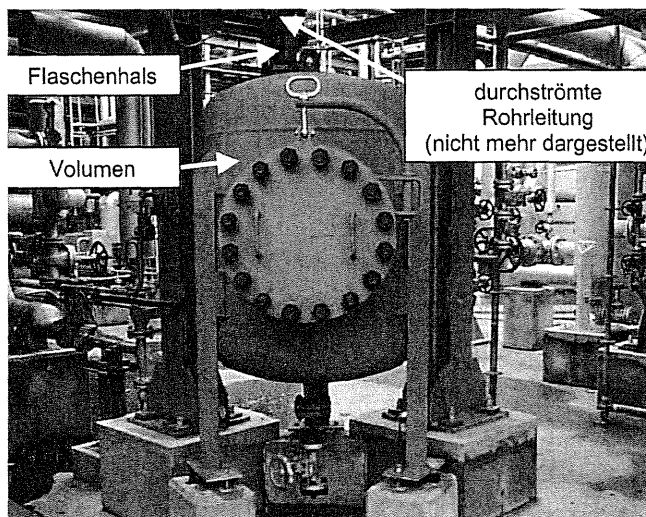


**Bild 7.** Wirbelablösefrequenz über der Zeit für eine entsprechend Bild 6 pulsierende Strömung.



**Bild 8.** Mindestens erforderlichen Dämpfung zur Sanierung der Messstelle über der Pulsationsfrequenz.

Mengenmessstellen, die nach dem Wirkdruckprinzip arbeiten, zeigen infolge einer pulsierenden Strömung einen zu großen Durchsatz an. Der primäre Grund hierfür liegt in der zeitlichen Mittelung des dynamischen Wirkdruckes – und nicht des radizierten Wirkdruckes – im Differenzdruck-



**Bild 9.** Foto des installierten Helmholtz-Resonators zur Reduktion des pulsationsbedingten Messfehlers an einem Wirbelgaszähler auf unter 1% (Dämpfung über 30 dB bei 20 Hz).

transmitter. Dieser sogenannte Wurzelfehler kann für eine monofrequente Pulsation bekannter Stärke analytisch berechnet werden.

Auch Turbinenradzähler zeigen infolge einer pulsierenden Strömung einen zu großen Volumenstrom an. Verantwortlich hierfür ist das ungleiche Verhalten des Turbinenrades in einer beschleunigten und verzögerten Strömung. Bei einer vorgegebenen Volumenstrompulsation wird der prozentuale Messfehler mit zunehmender Pulsationsfrequenz und abnehmendem Durchsatz größer. Ist die Pulsationsstärke bekannt, dann kann der maximale pulsationsbedingte Messfehler eines Turbinenradzählers auf einfache Weise analytisch bestimmt werden.

Wirbelgaszähler zeigen infolge pulsierender Strömungen eher einen zu geringen Volumenstrom an. Die Gassäulenschwingung führt zu einem veränderten Ablöseverhalten der Wirbel am Störkörper des Zählers. Es kommt zum sogenannten „Einrasten“ der Wirbelablösung auf die Pulsationsfrequenz. Der hierdurch bedingte Messfehler kann sehr groß werden, ist zur Zeit jedoch auch bei bekannter Pulsationsstärke noch nicht berechenbar. Die Grenzwerte für die Volumenstrompulsationen, bei denen noch kein signifikantes „Einrasten“ beobachtet wird, werden benannt.

Abschließend werden zwei Fälle aus der Praxis vorgestellt, in denen es durch Pulsationen zu erheblichen Fehlmessungen kam. Die Vorgehensweise zur Analyse dieser Probleme sowie die Sanierungsmaßnahmen werden beschrieben.

## Literatur

- [1] N.N.: Durchflußmessung von Fluiden mit Drosselgeräten. Teil 1: Blenden, Düsen und Venturirohre in voll durchströmten Leitungen mit Kreisquerschnitt. DIN EN ISO 5167-1, (1995) und DIN EN ISO 5167-1/A1 (1998).
- [2] N.N.: Measurement of pulsation fluid flow in a pipe by means of orifice plates, nozzles or Venturi tubes. Technical Report ISO/TR 3313, (1992) (E); ersetzt durch ISO/TR 3313, 1998) (in Vorbereitung).
- [3] *Downing, P.M. and Mottram, R.C.*: The effects of flow pulsations on orifice plate flow meters. Symposium on fluid flow measurements 1970, National Engineering Laboratory, east Kalbride, 1985.
- [4] *Brümmer, A.*: Gasmengenmeßfehler und deren Ursache am Beispiel der Wirkdruckverfahren. Erdöl, Erdgas, Kohle 114 (1998), H. 11, S. 552–557.
- [5] *Aschenbrenner, A.*: Intermittierender Betrieb und pulsierender Durchfluß bei Turbinenradgaszählern. Mitteilung der PTB; 1989.
- [6] *Lee, W. F. Z.; Kirik, M. J. and Bonner, J. A.*: Gasturbine flowmeter measurement of pulsating flow. Journal of engineering for Power, (1975), pp. 531–539.
- [7] *Brümmer, A.*: Der Einfluß von Volumenstrompulsationen auf die Meßgenauigkeit von Turbinenradzählern. GASWÄRME International 47 (1998), H. 11, S. 619–623.
- [8] *Peters, M. C. A. M.; Bokhart van, E. and Limpens, G. H. L.*: Impact of pulsations on vortex flowmeters. Presented at FLOMENKO'98, Lund, Sweden, 15–17. June 1998.
- [9] *Al-Asmi, K. and Castro, P.*: Vortex shedding in oscillatory flow, geometrical effects, Flow Meas. Instrum. Vol 3, no 3, pp. 187–202, 1992.
- [10] *Barbi, C.; Favier, D. P., Marscea, C. A. and Telionis, D. P.*: Vortex shedding and lock-on of a circular cylinder in oscillatory flow, J. Fluid Mech. Vol 170, pp. 527–544, 1986.

Manuskripteingang: 23. Mai 2002