

# Gasmengenmessfehler und deren Ursachen am Beispiel der Wirkdruckverfahren

Gas-flow measuring errors and their causes, using the example of the differential pressure method

Nach einer kurzen Erläuterung der Arbeitsweise der Durchflussmessungen mittels Drosselgeräten werden die dominanten Fehlerquellen, die zum Teil beachtliche Mengenmessfehler verursachen, benannt und in drei Kategorien unterteilt: Die erste Kategorie beinhaltet Fehlerquellen, die zu einer Verfälschung der innerhalb des strömenden Fluids an den Druckentnahmestellen anliegender Drücke führen. Hierzu zählt zum Beispiel ein pulsierender Massenstrom. Die Fehlerquellen, die den Wirkdruck zwischen den Druckentnahmebohrungen und dem Differenzdruckgeber verfälschen, gehören in die zweite Kategorie. In diese Gruppe fallen zum Beispiel akustische Resonanzen innerhalb der Wirkdruckleitungen. Die dritte Kategorie umfasst die Fehlerquellen vom Differenzdruckgeber bis zur ausgegebenen Zahlenwert des Massenstromes. Als Beispiel wird der Einfluss der Grenzfrequenz des eingesetzten Differenzdruckgebers im Zusammenhang mit akustischen Resonanzen innerhalb der Wirkdruckleitungen dargestellt. Zum Schluss des Beitrages wird ein empfohlenes Vorgehen zum Erkennen, Abschätzen und Mindern dieser Fehlerquellen aufgezeigt.

Following a short discussion of the manner of operation of flow-measurement systems incorporating flow-restriction devices, the dominant sources of error, which in some cases cause significant flow-measurement inaccuracies are stated and subdivided into three categories: The first category consists of sources of error which cause falsification of the pressures which occur in the moving fluid at the pressure take-off points. These include, for instance, a surging mass flow. The sources of error which falsify the differential pressure between the pressure take-off borings and the differential pressure transducer make up the second category. This group includes, for example, acoustic resonance in the differential pressure line. The third category covers sources of error from the differential pressure transducer up to and including the numerical transmitted reading for mass flow. The influence of the limit frequency of the differential-pressure transducer used in conjunction with acoustic resonance in the differential pressure lines is shown as an example. A procedure recommended for the detection, estimation and reduction of these error sources is discussed at the conclusion of the article.

ber vorhandenen Volumina) verfälschen. In diese Gruppe fallen unter anderem die durch akustische Resonanzen innerhalb der Wirkdruckleitungen oder die durch Ausgleichsströmungen bedingten Fehler. Die dritte Kategorie beinhaltet letztlich die vom Differenzdruckgeber und der nachgeschalteten Auswertung verursachten Mengenmessfehler.

Nach einer kurzen Erläuterung der Mengennmessung mittels des Wirkdruckverfahrens werden im Weiteren die dominanten Fehlerquellen pro Kategorie erläutert und deren Erscheinungsbilder an Beispielen aus der Praxis dokumentiert. Anschließend werden verschiedene Vorgehensweisen zur Verminderung bzw. zur Korrektur der jeweiligen Mengenmessfehler aufgezeigt.

## Durchflussmessungen mittels Wirkdruckverfahren

Bei diesem Verfahren wird in das durchströmte Rohr eine Querschnittsverengung (zum Beispiel Blende, Düse, Venturirohr) eingebaut [1]. 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. Als

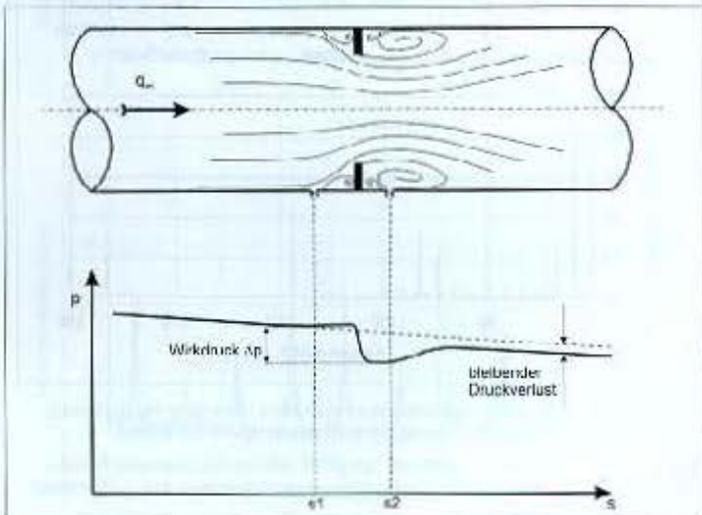
Mit der Liberalisierung des Gasmarktes steigt der Bedarf an hochgenauen und zuverlässigen Mengenmessenrichtungen. Zwar sind die im Prüfstand festgestellten Messgenauigkeiten verschiedener Messeinrichtungen bereits durchaus beachtlich, die Praxis zeigt jedoch, dass die in ausgeführten Anlagen erreichten Genauigkeiten häufig ganz erheblich geringer sind. Die Gründe hierfür lassen sich bei den nach dem Wirkdruckprinzip arbeitenden Messeinrichtungen (zum Beispiel Blenden, Düsen, Venturirohre) in drei Kategorien einteilen. Die erste Kategorie beinhaltet alle Ursachen, die zu einer Verfälschung<sup>1</sup> der innerhalb des Fluids an den Druckentnahmestellen anliegenden Drücke führen. Hierzu zählen zum Beispiel die strömungstechnisch bedingten Fehldrücke infolge von Drall-

strömungen oder Volumenstrom- bzw. Druckpulsationen. In die zweite Kategorie gehören alle Einflussfaktoren, die den Wirkdruck zwischen den Druckentnahmestellen und dem Differenzdruckgeber (einschließlich der im Differenzdruckge-

<sup>1</sup> Mit einer Verfälschung ist die Abweichung des anliegenden, zeitlich gemittelten Wirkdruckes von dem Wert gemeint, der sich bei gleichem Massenstrom an der Messeinrichtung unter idealen (fehlerfreien) Verhältnissen einstellen würde.

Dr.-Ing. Andreas Brümmer,  
Beratender Ingenieur bei KÖTTER Consulting Engineers, Rheine  
www.koetter-consulting.com

**Bild 1:** Qualitativer Strömungs- und Druckverlauf durch eine Blende  
**Fig. 1:** Qualitative plot of flow and pressure through a orifice



Beispiel hierfür ist in **Bild 1** der qualitative Strömungsverlauf und die Druckverteilung für eine Blendenströmung dargestellt.

Durch Abgreifen der Druckverteilung an zwei Positionen lässt sich ein Differenzdruck messen, der als Wirkdruck bezeichnet wird. Die Lage der Druckentnahmestellen ist für jedes Drosselgerät in [1] festgelegt. Anhand des Wirkdruckes und der Betriebsdichte kann der Massenstrom berechnet werden [1]. Für die Berechnung der geförderten Menge muss dieser Massenstrom noch über die Zeit integriert werden.

## Erkennen, abschätzen und mindern von Fehlerquellen

### Einfluss der Strömungsverhältnisse

Die Bedingungen, unter denen die Durchflussmessungen mittels der Wirkdruckverfahren zu den ausgewiesenen Genauigkeiten führen, werden in [1] genannt. Hierzu zählt unter anderem eine drallfreie und stationäre Zuströmung. Die drallfreie Strömung lässt sich durch den Einsatz von Strömungsgleichrichtern relativ einfach und kostengünstig realisieren. Grundsätzlich wird der Einfluss einer drallbehafteten Strömung auf die Messgenauigkeit von Blenden sowie die Wirkung von Gleichrichtern in [2] untersucht. Schwieriger wird es hingegen mit der Forderung einer stationären Strömung, also mit der Vermeidung von Druck- bzw. Volumenstrompulsationen. Die Gründe hierfür sind verschieden. Zum einen ist den Betreibern häufig das Vorhandensein

von Pulsationen (zum Beispiel hervorgerufen durch akustische Resonanzen innerhalb einzelner Rohrleitungsabschnitte) gänzlich unbekannt. Zum anderen sind pulsationsmindernde Maßnahmen zum Teil sehr aufwendig und kostenintensiv. Bei der Ausführung der Maßnahmen stellt sich zudem die Frage nach den noch zulässigen Restpulsationen.

Ob es im Bereich der Messeinrichtung zu störenden Pulsationen innerhalb der durchströmten Rohrleitung kommt, kann durch die Messung des Differenzdruckes unmittelbar am Drosselgerät – also ohne eventuell vorhandene lange Wirkdruckleitungen – überprüft werden. Hierzu sollte ein Differenzdrucktransmitter mit einer hohen Grenzfrequenz verwendet werden. Es sollte das Zeitsignal bzw. das in den Frequenzbereich transformierte Differenzdrucksignal abgespeichert werden, wobei die Messungen möglichst bei verschiedenen Betriebs- und Anlagenzuständen (zum Beispiel Volumenströme, Temperaturen) zu wiederholen sind.

Ein Beispiel für ein derartiges Differenzdrucksignal ist in **Bild 2** zusammen mit dem zugehörigen Amplitudenspektrum dargestellt. Im Gegensatz zu dem gewünschten, konstanten Signal unterliegt der Differenzdruck ganz erheblichen Schwankungen. Die Schwankungen um den zeitlichen Mittelwert von  $\Delta p_0 = 67$  mbar führen zum Teil sogar zu einem negativen Differenzdruck, was ein Rückströmen des Mediums innerhalb der Rohrleitung vermuten lassen könnte. Wie später gezeigt wird, kommt es im vorlie-

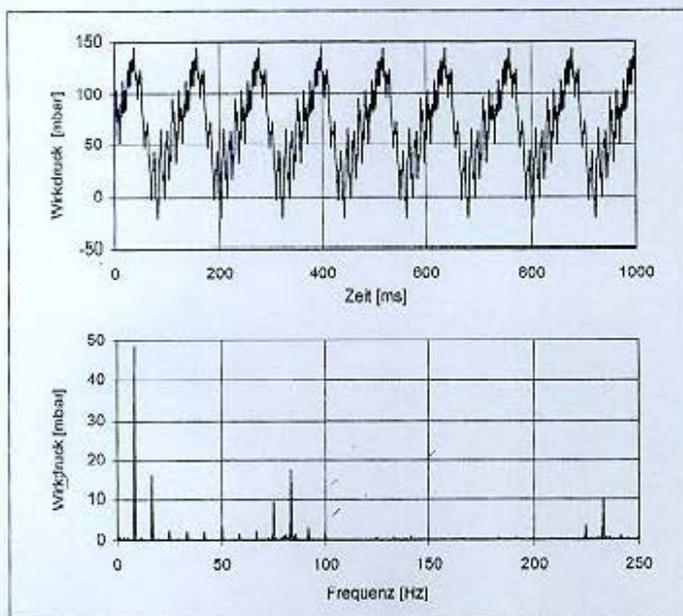
genden Fall jedoch nicht zu einer Rückströmung.

Anhand des Amplitudenspektrums wird unmittelbar die Ursache für die Differenzdruckschwankung ersichtlich. Sie liegt im diskontinuierlichen Fördervorgang des stromauf gelegenen Hubkolbenverdichters, der eine Volumenstrompulsation zur Folge hat. Die Frequenzen dieser Volumenstromschwankungen stimmen mit den festgestellten Frequenzen der Differenzdruckpulsation überein.

Wird der gemessene, zeitlich gemittelte Wirkdruck von  $\Delta p_0 = 67$  mbar zur Berechnung des Massenstroms verwendet, dann ergibt sich ein Wert von  $q_{m, \text{Fehl}} = 7776$  kg/h. Dieser Massenstrom entspricht jedoch nicht dem tatsächlich im zeitlichen Mittel durch die Normblende fließenden Massenstrom  $q_{m, \text{IST}}$ . Um den tatsächlichen Durchfluss zu ermitteln, bietet sich die instationäre Bernoulli-Gleichung an [3]. Mit den in [4, 5] genannten Annahmen kann die instationäre Bernoulli-Gleichung in eine gewöhnliche, nichtlineare Differenzialgleichung überführt werden.

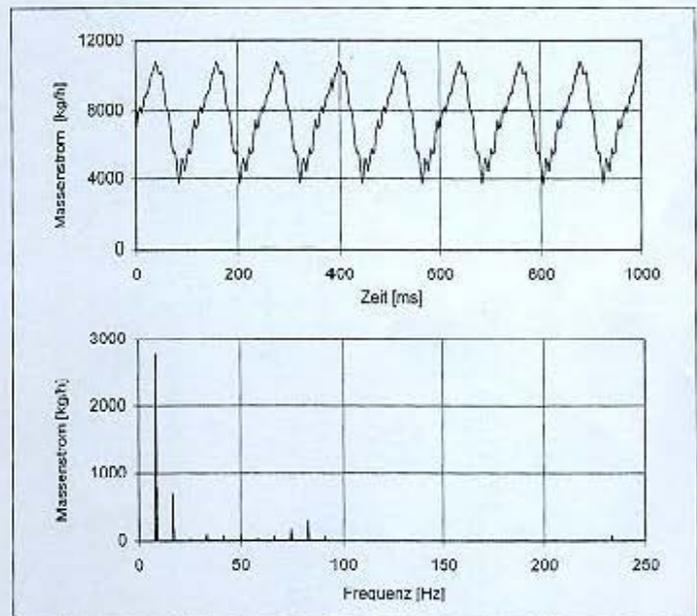
In Kenntnis der gemessenen Wirkdruckschwankung sowie der geometrischen Abmessungen und Stoffgrößen kann diese Differenzialgleichung numerisch integriert werden. Hierzu bietet sich zum Beispiel ein Runge-Kutta Verfahren an [6]. Als Ergebnis liegt anschließend die Massenstromschwankung vor.

Für den gemessenen Wirkdruckverlauf nach **Bild 2** ergibt sich auf diese Weise



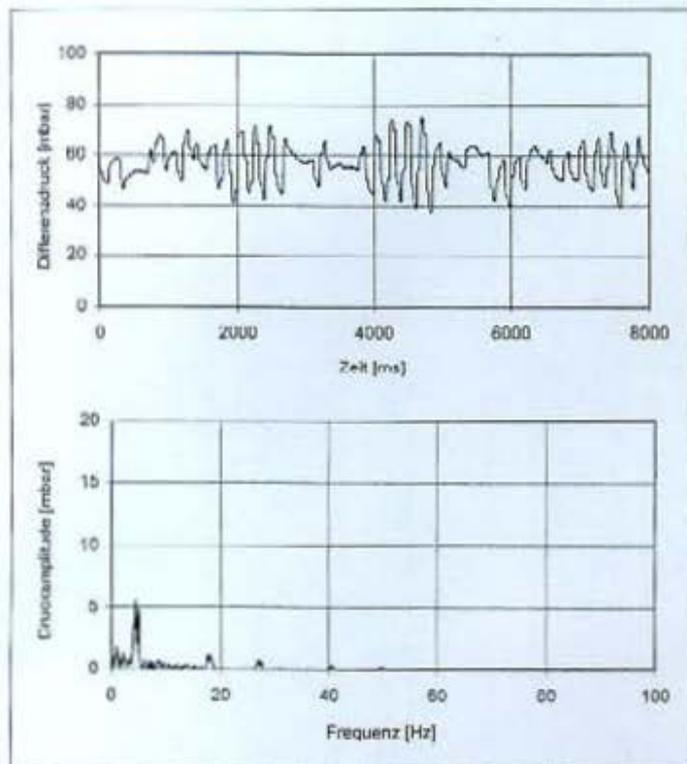
**Bild 2:** Zeitsignal und Amplitudenspektrum des über eine Normblende gemessenen Wirkdruckes (zeitlicher Mittelwert  $\Delta p_0 = 67$  mbar)

**Fig. 2:** Time signal and amplitude range of differential pressure measured across a standardized orifice (chronological average  $\Delta p_0 = 67$  mbar)



**Bild 3:** Zeitsignal und Amplitudenspektrum des berechneten, durch die Normblende fließenden Massenstromes (zeitlicher Mittelwert  $q_{m, \text{IST}} = 7500$  kg/h)

**Fig. 3:** Time signal and amplitude range of calculated mass flow through a standardized orifice (chronological average  $q_{m, \text{IST}} = 7500$  kg/h)



**Bild 6:** Zeitsignal und Amplitudenspektrum des von einem programmierbaren Differenzdruckgeber ausgegebenen Signals (anliegender Differenzdruck siehe Bild 5 unten)

**Fig. 6:** Time signal and amplitude spectrum of the signal transmitted by a programmable differential-pressure transducer (see Figure 5 bottom, for actual differential pressure)

rien auffälligen zeitlichen Schwankungen unterliegt, sind am Ende der 21,3 m langen Wirkdruckleitungen deutliche Druckpulsationen im Differenzdrucksignal vorhanden. Die Frequenzen dieser Pulsationen stimmen mit den akustischen Eigenfrequenzen der Wirkdruckleitungen überein. So ergibt sich die erste akustische Resonanzfrequenz anhand der Länge der Wirkdruckleitungen und der Schallgeschwindigkeit von 400 m/s zu 4,7 Hz ( $\lambda/4$ -Resonator). Die weiteren Resonanzfrequenzen der Gassäule innerhalb der Wirkdruckleitungen liegen bei 14 Hz ( $3/4 \lambda$ ), 23,5 Hz ( $1 1/4 \lambda$ ), 32,9 Hz ( $1 3/4 \lambda$ ), 42,3 Hz ( $2 1/4 \lambda$ ) usw. Aus Bild 5 wird deutlich, dass genau bei diesen Frequenzen am Ort des Differenzdruckgebers resonant überhöhte Druckamplituden vorhanden sind.

Diese akustischen Resonanzen können auf unterschiedliche Weise zu Messfehlern führen. Zum einen dürfen die Druckschwankungen nicht – anhand des oben vorgestellten Verfahrens – in Volumenschwankungen umgerechnet werden, da sonst primär die Quadratwurzel der niederfrequenten Druckpulsation gemittelt würde. Zur Kompensation der akustischen Resonanzen ist aber eher eine lineare zeitliche Mittelung des Differenzdrucksignals angebracht. Zum ande-

ren können die Resonanzen zu einer Veränderung des zeitlich gemittelten Drucks entlang der Wirkdruckleitungen führen. Diese Verteilung des zeitlich gemittelten Drucks entlang der Wirkdruckleitungen kann zum Beispiel dadurch verursacht werden, dass der Strömungswiderstand beim Einströmen in die Wirkdruckleitungen nicht gleich dem Wert beim Ausströmen ist oder nichtlinear dämpfende Bauelemente in den Wirkdruckleitungen integriert sind. Eine entsprechende, gemessene Verteilung des Druckmittelwertes entlang einer Wirkdruckleitung ist in [9] dargestellt. Der vom Differenzdruckgeber gemessene Wirkdruck ist in diesem Fall nicht mehr proportional zum Volumenstrom, der durch das Drosselgerät fließt. Folglich kommt es zu Messfehlern, die zum Teil ganz erheblich sein können.

Leider ist eine globale Regel zur Berechnung der noch zulässigen Längen der Wirkdruckleitungen und damit zur Vermeidung der beschriebenen Fehlerquellen zurzeit noch nicht verfügbar. Bei der Gestaltung der Wirkdruckleitungen sollten jedoch die folgenden Grundregeln beachtet werden [4]:

- Querschnittsprünge und Volumina innerhalb der Wirkdruckleitungen sind zu vermeiden.

- Die Wirkdruckleitungen sollten so kurz wie möglich sein; insbesondere sollte die erste akustische Resonanzfrequenz der Wirkdruckleitungen ( $\lambda/4$  Resonanz) deutlich oberhalb einer zu erwartenden Druckpulsation innerhalb der durchströmten Rohrleitung liegen.
- Die Wirkdruckleitungen sollten geometrisch gleich aufgebaut sein (zum Beispiel gleiche Längen).
- Die Grenzfrequenz des Differenzdruckgebers sollte deutlich unterhalb der ersten akustischen Resonanzfrequenz der Wirkdruckleitungen liegen.

### **Einfluss des Differenzdruckgebers**

Liegt die Grenzfrequenz des Differenzdrucktransmitters nicht deutlich unterhalb der ersten akustischen Resonanzfrequenz der Wirkdruckleitungen, dann hat das Ausgangssignal zum Beispiel den in Bild 6 dargestellten Verlauf.

Im Vergleich zum tatsächlich anliegenden Differenzdruck (Bild 5 unten) wird die Filtereigenschaft des Aufnehmers ersichtlich. Während die niederfrequente Druckpulsation von 4,7 Hz vom Aufnehmer noch erfasst und ausgegeben wird, werden alle höherfrequenten Druckschwankungen herausgefiltert. In Relation zum Messbereich der Annubar-Sonde (0 bis 90 mbar) sind die ausgegebenen Signalschwankungen dennoch deutlich zu groß. Außerdem handelt es sich um Signale, die nicht in Verbindung mit einer tatsächlich vorhandenen Volumenstrompulsation innerhalb der durchströmten Rohrleitung stehen, sondern allein durch eine akustische Resonanz innerhalb der Wirkdruckleitungen verursacht werden. Vom nachgeschalteten Mengenumwerter wird diese Unterscheidung jedoch nicht gemacht, so dass es zu einer Fehlmessung kommt, die im vorliegenden Fall zu erheblichen regelungstechnischen Problemen am Radialverdichter geführt hat.

### **Empfohlenes Handeln**

Aufgrund der erläuterten Zusammenhänge wird empfohlen, insbesondere die kostenintensiven oder prozesstechnisch relevanten Durchflussmeseinrichtungen hinsichtlich des Vorhandenseins der genannten Störeinflüsse zu untersuchen.

Hierzu sollte im ersten Schritt der Wirkdruck unmittelbar am installierten Drosselgerät – also ohne eventuell vorhandene lange Wirkdruckleitungen – mit einem schnellen Differenzdruckgeber gemessen werden. Sofern sich bei dieser Messung effektive Wirkdruckschwankungen ergeben, die kleiner als 10 % vom zeitlichen Mittelwert des Wirkdruckes sind, sind Messfehler infolge pulsierender Volumenströme nicht zu erwarten [10]

(Bild 4). Andererseits sollten die Messfehler  $E_T$  mit dem oben vorgestellten Verfahren berechnet werden. Ist eine Zuordnung der festgestellten Wirkdruckschwankungen zu den Anlagen- und Betriebsbedingungen eindeutig und reproduzierbar möglich, können die einmal berechneten Messfehler  $E_T$  anschließend für eine Korrektur der unter Annahme stationärer Strömungsverhältnisse ermittelten, fehlerbehafteten Massenströme herangezogen werden (Korrektur nach Tabelle). Falls diese eindeutige Zuordnung nicht möglich ist, könnte der Wirkdruck kontinuierlich mit einem schnellen Differenzdruckgeber gemessen und „online“ der jeweils aktuelle Korrekturfaktor  $E_T$  berechnet werden („online“-Korrektur).

Grundsätzlich ist es einer Korrektur jedoch vorzuziehen, die Ursache für die festgestellten Pulsationen zu bestimmen. In Kenntnis der Wirkungsmechanismen können zum Teil überraschend kostengünstige Minderungsmaßnahmen realisiert werden (zum Beispiel durch den Einsatz von Pulsations-Dämpferplatten nach dem KÖTTER-Prinzip [11]) und auf diese Weise die Messgenauigkeit erheblich verbessert werden.

Im zweiten Schritt ist der Einfluss der vorhandenen Wirkdruckleitungen und des benutzten Differenzdruckgebers zu

überprüfen. Hierzu bietet es sich an, zunächst den unmittelbar am Drosselgerät gemessenen, zeitlich gemittelten Wirkdruck mit dem vom installierten Differenzdruckgeber ausgegebenen Mittelwert zu vergleichen. Sind störende Abweichungen vorhanden, deutet das auf akustische Resonanzen innerhalb der Wirkdruckleitungen hin. Die Wirkdruckleitungen sind in diesem Fall zu kürzen, wobei die oben genannten Hinweise zu beachten sind. Insbesondere in Verbindung mit einer „online“-Korrektur sind die maximal zulässigen Längen der Wirkdruckleitungen sehr genau auf die im Einzelfall vorliegenden Erfordernisse abzustimmen.

**Literatur**

[1] DIN EN ISO 5167-1N „Durchflussmessung von Fluiden mit Drosselgeräten Teil 1: Blenden, Düsen und Venturiröhre in voll durchströmten Leitungen mit Kreisquerschnitt“ (1995) und DIN EN ISO 5167-1/A1 (1998)

[2] Morrow, T. B.; Behring K. A.: Effects of swirl and velocity profile asymmetry on flow conditioner performance for orifice meters. In: Proceedings of the 9<sup>th</sup> International conference on flow measurement, FLOMEKO '98 in Lund, Sweden, 1998, Pg. 429-434

[3] Truckenbrodt, E.: Fluidmechanik. Band 1: Grundlagen und elementare Strömungsvorgänge dichtebeständiger Fluide. 3. überarbeitete Auflage, Heidelberg: Springer-Verlag, 1989

[4] N.N.: Measurement of pulsating 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)

[5] Hebrard, P.; Biecos, Y.; Gajan, P.; Plotet, B.: An investigation of the behaviour of orifice meter in pulsation flow conditions, International conference on flow measurement in Melbourne, Australia, 1985, Pg. 223-230

[6] Meyberg, K.; Vachenauer, P.: Höhere Mathematik 2. Differentialgleichungen, Funktionentheorie, Fourier-Analyse, Variationsrechnung. Heidelberg: Springer-Verlag, 1991

[7] Brümmer, A.: Gasmengemessfehler und deren Ursache am Beispiel der Wirkdruckverfahren. Erdöl Erdgas Kohle 114 (1998) Nr. 11, S. 552-557

[8] Downing, P. M.; Mottram, R. C.: The effects of flow pulsations on orifice plate flow meters. Symposium on fluid flow measurements 19/0, National Engineering Laboratory, east Kilbride, 1985

[9] Sparks, G. R.; Durke, R. D.; McKee, R. J.: Pulsation-induced errors in the primary and secondary systems of orifice meters. VDI Bericht Nr. 768, 1989

[10] Studzinski, W.; Karnik, U.; Geerligs, J.; McBrien, R.: Pulsation effects on orifice meter performance. In: Proceedings of the 9<sup>th</sup> international conference on flow measurement, FLOMEKO '98 in Lund, Sweden, 1998, Pg. 417-422

[11] Klein, M.; Hansen, G.: Pulsations- und Schwingungsminderung durch spezielle Einbauten in Hohlleitungen. 3R internat. 36 (1997) Nr. 4-5, S. 210-210