6. KÖTTER Workshop

Gasmengenmessung 2012

07. / 08. März

KCE Akademie, Rheine

Veranstalter:

KÖTTER Consulting Engineers KG
- KCE-Akademie -

Bonifatiusstraße 400
48432 Rheine

Herzlich Willkommen zum

6. KÖTTER Workshop Gasmengenmessung 2012!

Es freut mich, dass sich wieder zahlreiche Interessierte aus der Branche zu unserem „6. KÖTTER Workshop Gasmengenmessung 2012 – Gasanlagen, Gastechnik“ angemeldet haben. Ich möchte Sie an dieser Stelle ganz herzlich zu den beiden Veranstaltungstagen am 7. und 8 März hier in Rheine begrüßen.

Die Referenten dieser Veranstaltung werden uns über Innovationen und Erfahrungen in Bezug auf die verschiedenen Mengenmesseinrichtungen unterrichten. Z. B. erwarten wir Herrn Dr. Bert Anders von der Physikalisch Technischen Bundesanstalt, der über die „neuen Herausforderungen der gesetzlichen Gasbeschaffenheitsmessung“ berichten wird. Verschiedene Gasmengen-Messgeräte-Hersteller berichten über die Reaktionen auf die neuen Anforderungen an den Gasmarkt bzw. die Messungen. Verschiedene Innovationen bei der Messmehodik werden vorgestellt und Betreiber sprechen über die Biogaseinspeisung oder den Bau neuer Anlagen auf Modulbauweise.

Mit Beiträgen von 12 hochqualifizierten Referenten aus Industrie, Wissenschaft und Wirtschaft haben wir wieder ein interessantes Programm für Sie – unsere Teilnehmer – zusammenstellt. Mein Dankeschön hier auch an die Referenten, die sich zusätzliche Arbeit gemacht haben, um Ihnen ihre Erfahrungen und Eindrücke auf dieser Veranstaltung aufzuzeigen.

Ich wünsche Ihnen einen schönen Aufenthalt, anregende Diskussionen mit den Fachkollegen und insgesamt viele neue Erfahrungen und kollegiale Freundschaften, die Sie vielleicht demnächst schon bei Ihrer täglichen Arbeit einsetzen können!

Ihr

Erwin W. Kötter
KÖTTER Consulting Engineers

P.S.: Für die Inhalte der Vorträge zeichnen die Autoren verantwortlich.

6. KÖTTER Workshop Gasmengenmessung 2012
am 07. und 08. März

Inhaltsverzeichnis

Nr.	Referent	Titel des Vortrages	Seite
1	Dr.-Ing. Achim Zajc **Honeywell Process Solutions RMG Messtechnik GmbH**	Strömungsprofilanalyse mit 6-Pfad-Ultraschallgaszählern	9
2	Dr.-Ing. Osman Kurt **EWE Netz GmbH**	Biogaseinspeisung bei EWE Netz – EWE Netz setzt beim Bau der Anlagen auf Modulbauweise	47
3	Dipl.-Ing. (BA) Ralf Schneiderat **Inotech GmbH** Dipl.-Ing. Robert Missal **KÖTTER Consulting Engineers GmbH & Co.KG**	Effiziente Reihenkalibrierung von Drehkolbengaszählern kleiner Baugrößen mit kleiner Messunsicherheit unmöglich?	67
4	Hans Kullmann **Elster GmbH**	Umwandlung und Speicherung von regenerativen Energien und Messaufgaben	83
5	Dipl.-Ing. Lars Bertram **EnBW Vertriebs- und Service GmbH**	Untersuchung von strömungs- und druckbedingten Einflüssen auf das messtechnische Verhalten von Drehkolbengaszählern	99
6	Udo Bosch, Daniel Winter **Endress + Hauser Messtechnik GmbH & Co. KG**	Neue Möglichkeiten zur Energiemengenmessung und Konditionierung bei Methangaseinspeiseanlagen	113
7	Dr. Idriz Krajcin **Open Grid Europe GmbH**	Überwachung der Messtechnik in Gasmessanlagen	125
8	Raymond Richards Helmut Heid **Flow Meter Group**	Unsicherheit in der Gasmessung und wie diese Unsicherheitsbandbreite zu verringern ist	133
9	Dr.-rer.nat. Bert Anders **Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB)**	Neue Herausforderungen der gesetzlichen Gasbeschaffenheitsmessung	155
10	Alexander Jakschick **Sick Engineering GmbH**	Untersuchung zur Rückwirkung von Wandrauhigkeit und Korrosion auf die Kalibrierkurve eines USZ und Wege zur Diagnose	169
11	Dipl.-Ing. Heiko Slawig **caplog-x GmbH**	Anforderungen und Änderungen bei dem Betrieb von geeichten REKO-Systemen bezüglich Biogas- und Wasserstoffeinspeisungen	191
12	Martin Kurth **KROHNE Messtechnik GmbH**	Verschmutzung auf dem Prüfstand – Was erkennt ein Ultraschallzähler?	209

*) Leider lag dieser Vortrag bei Drucklegung nicht vor!

6. KÖTTER Workshop

Gasmengenmessung 2012

07. / 08. März 2012

Vortrag 01

Übersicht der Erdgasmessung mit Ultraschall –Strömungsprofilanalyse mit 6-Pfad-Ultraschallgaszählern–

Dr. Achim Zajc

RMG by Honeywell, Messtechnik GmbH

Schlüsselbegriffe: Ultraschall, Laufzeiten, Pfad, Pfadwinkel, Mehrpfad-Zähler, Strömungsprofil, Profilverzerrungen, Condition Based Monitoring (CBM), eingebaute Redundanz, Installationsflexibilität, "Live"-Trockenkalibrierung

Abriss: Diskutiert werden einführende Konzepte für die Messung von Erdgas auf der Grundlage des Prinzips der Messung von Signallaufzeiten. Außerdem typische Diagnosemethoden für Ultraschallgaszähler, die die Laufzeiten von Ultraschallimpulsen entlang mehrerer Messpfade messen. Weiterhin geht es um Mehrpfadkonfigurationen und Sensortypen. Hinweise werden gegeben hinsichtlich der ordnungsgemäßen Verwendung, Installation und umgebungsabhängigen Überwachung von Ultraschallgaszählern vor dem Hintergrund der Technologie für die kontinuierliche Validierung von RMG by Honeywell.

1. Einführung

In den letzten 20 Jahren hat sich der Ultraschallgaszähler von der Laboranwendung zum marktgängigen Produkt und zum Instrument der Wahl für die Gasvolumenmessung im eichpflichtigen Verkehr entwickelt. Die breite Akzeptanz und Verbreitung unter den Gasversorgern verdankt der Ultraschallzähler seiner

- Zuverlässigkeit
- Präzision
- Wiederholbarkeit
- Leistungsfähigkeit
- Messbereiche
- Wartungsfreundlichkeit
- Berücksichtigung der einschlägigen Industrienormen für eichamtliche Messanwendungen

Historisch begann die Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeitsmessung in geschlossenen Leitungen mit Schall in den 1920ern mit der Entdeckung, dass der wiederholte Ausstoß und Empfang von Schallimpulsen zur Lokalisierung und Geschwindigkeitsmessung beweglicher Objekte verwendet werden konnte; ein Prinzip, das schon bald zu ersten Sonar- und Radaranwendungen führte. Im Laufe der Zeit kam es auch zu Versuchen, dieses Prinzip auf die Messung von Strömungsgeschwindigkeiten in Leitungen anzuwenden; aber erst die Entwicklung wirtschaftlicher Hochgeschwindigkeitselektronik und der digitalen Signalverarbeitung in den späten 1970ern führte zu Instrumenten mit ausreichender Reproduzierbarkeit und Auflösung für Gasanwendungen.

In den 1980ern und frühen 1990ern wurden die praktischen Herausforderungen bei der Kommerzialisierung dieser Technik in Form eines Durchflussmessers beschrieben und innovativ angegangen, was zu einem Ultraschallgaszähler mit folgenden Merkmalen und Eigenschaften führte:

- Robuste Signalgeber, die wiederholbare Impulse generierten (Amplitude und Frequenz)
- Mehrpfadausführung zur Mittelung der axialen Geschwindigkeitskomponenten über den Querschnitt eines geschlossenen Systems (z. B. eines Rohrs)
- Hochgeschwindigkeitselektronik komplett mit präzisem Timer für die Erkennung, Auflösung und Zeitmessung beim Generieren und Empfangen von Ultraschallimpulsen mit ausreichend Zeitbereichsauflösung
- Verknüpfung von Signalgebertechnik und Elektronik, die hohe Impulsraten und deren Zeitmessung sowie die schnelle Integration der Strömungsgeschwindigkeiten zuließen, sodass sekündlich präzise gemessene Werte registriert werden konnten.

Praktisch alle Ultraschallmesser für eichamtliche Messungen werden in eichamtlich zugelassenen Laboren strömungskalibriert. Zur Ermittlung der Kalibrierkurve werden Strömungstests an mehreren Punkten entlang des Messbereichs des Instruments durchgeführt. Anschließend werden Zählerfaktoren bestimmt, um die Messergebnisse des Geräts korrektiv an die Referenzen des Labors anzupassen.

Ein Vorteil moderner Ultraschallgaszähler ist, dass nach der ersten Kalibrierung mit Hilfe von Diagnoseverfahren festgestellt werden kann, ob die Korrekturfaktoren aufgrund von Fehlern in den Betriebskomponenten (d.h. den Signalgebern bzw. der Verarbeitungselektronik) angepasst werden müssen, sodass eine Neukalibrierung normalerweise nicht erforderlich ist. (Allerdings bestehen einige Regulierungsbehörden auf regelmäßiger Neukalibrierung; dies hängt vom jeweiligen Gesetzesrahmen ab).

2. Funktionsprinzip

Die Kenntnis des Messprinzips der Ultraschallzähler ist die Voraussetzung für den optimalen Einsatz vor Ort sowie die Basis für die Beurteilung, ob das Instrument nach wie vor zuverlässig und genau arbeitet.

Mehrpfad-Ultraschallzähler, die typischerweise für eichamtliche Messungen eingesetzt werden, berechnen den Betriebsvolumendurchfluss auf der Basis von Geschwindigkeitsmessungen über den Querschnitt des Rohrs. Dabei kommt das folgende Verfahren zur Anwendung:

- Im Zählergehäuse sind Sensorenpaare installiert, die Ultraschallimpulse sowohl senden als auch empfangen und die Impulslaufzeiten messen. Dabei werden Impulse in Strömungsrichtung durch den Gasstrom beschleunigt und in der Gegenrichtung verlangsamt. (Bei Nullströmung ist die Laufzeit der Signale in beiden Richtungen gleich.)
- Für jedes Sensorpaar (bzw. jeden Messpfad) wird dann aus den Laufzeitdifferenzen der Signale in bzw. gegen die Strömungsrichtung die Strömungsgeschwindigkeit des Mediums berechnet.

- Die Geschwindigkeiten entlang der verschiedenen Pfade werden dann gemittelt und in einer 'gewichteten Strömungsgeschwindigkeit' zusammengefasst; dabei sind die Messpfade vor dem Hintergrund ihrer genauen Position innerhalb des Rohrquerschnitts unterschiedlich gewichtet
- Die gewichtete Strömungsgeschwindigkeit wird mit der Querschnittsfläche des Instruments multipliziert, was den (unkorrigierten) Betriebsvolumendurchfluss ergibt.

Die Geschwindigkeitsmessungen erfolgen entlang mehrerer Messpfade unter Verwendung von Sensorpaaren, die in genau bekannten Positionen im Zählergehäuse angeordnet sind. Da hier die "absolute digitale Laufzeitmessmethode" zur Anwendung kommt, (Aussendung von gegenläufigen Impulsen in rascher Folge entlang desselben Pfads), wird die Messung aufgrund der quasi instantanen Impulse der Sensorpaare durch Druck, Temperatur und Gaszusammensetzung nicht beeinträchtigt.

Unten dargestellt sind die Gleichungen [1, 2] für die Laufzeitmessung (Gleichung 1, 2), gewichtete Strömungsgeschwindigkeit (Gleichung 3), Schallgeschwindigkeit (Gleichung 4), Strömungsberechnung (Gleichung 5) sowie ein Diagramm (Abb. 1) der Geometrie eines Sensorpaars zur Veranschaulichung der Zusammenhänge zwischen den Vektorsummen. Zu beachten ist, dass c (Schallgeschwindigkeit) ein thermodynamischer Term ist (der einzige in den Gleichungen). Dabei handelt es sich um eine Eigenschaft des Mediums und somit den einzigen Term in den Gleichungen, der mit Zusammensetzung, Druck und Temperatur (d.h. mit der Dichte des Mediums) variiert.

(Gleichung 1) $$t_U = \frac{L}{c - v \bullet \cos\varphi}$$

(Gleichung 2) $$t_D = \frac{L}{c + v \bullet \cos\varphi}$$

(Gleichung 3) $$v = \frac{L}{2 \bullet \cos\varphi}\left(\frac{1}{t_D} - \frac{1}{t_U}\right)$$

(Gleichung 4) $$c = \frac{L}{2} \bullet \frac{(t_u + t_d)}{t_u \bullet t_d}$$

(Gleichung 5) $$Q = A \bullet V$$

Es seien:

L = Pfadlänge (ft oder m)

t_U = Laufzeit mit dem Gasfluß (sec)

t_U = Laufzeit gegen den Gasfluß (sec)

c = Schallgeschw. (fps oder m/s)

φ = Pfadwinkel zum Rohr (Grad)

v = Pfadgeschw. (fps oder m/s)

Q = unkorr. Betriebsvolumendurchfluss (acfs oder m^3/s)

V = gewichtete Strömungsgeschw. (fps oder m/s)

A = Rohrquerschnittfläche (ft^2 oder m^2)

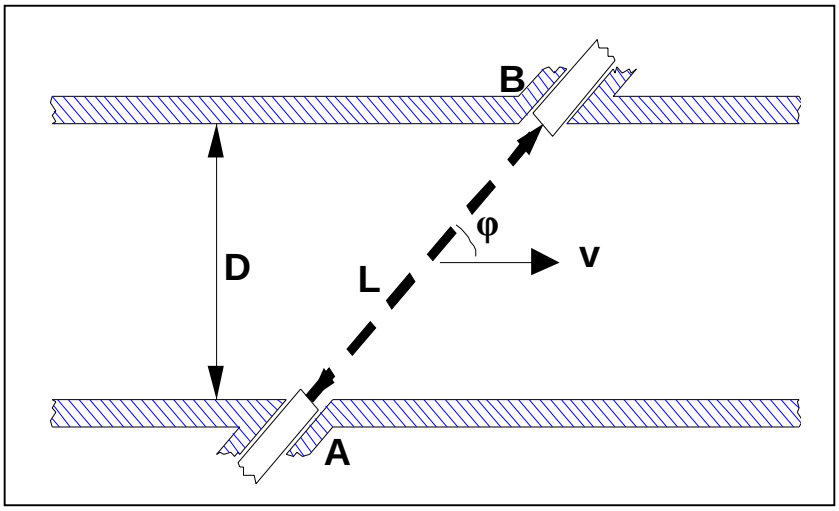


Abb. 1: Funktionsschema der Ultraschallmessung nach dem Laufzeitprinzip

Durch die Auflösung nach Geschwindigkeit, ν (Gleichungen 1 + 2) und die Kombination ihrer Terme erhalten wir das gewünschte Ergebnis: die Fluidgeschwindigkeit ν (Gleichung 3). Beachtenswert ist, dass der dichteabhängige Term ***c*** (Schallgeschw.) in Gleichung 3 heraus gekürzt wird. Das ist möglich, weil davon ausgegangen werden darf, dass die Fluiddichte (d. h. Zusammensetzung, Druck, Temperatur) während des Laufs der gegenläufigen Impulse gleich bleibt (eine zulässige Annahme, da beide Impulse innerhalb von Millisekunden folgen). Dieses Phänomen, dass sich die Effekte in den gegenläufigen Signalen aufheben und so den Term ***c*** eliminieren, führt uns zur Beschreibung des Funktionsprinzips des Zählers als absolute digitale Laufzeitmessmethode ("absolute digital transit time measurement method"). Die Anwendung dieser Methode liefert uns die benötigte Technik für eine präzise Gaszählermessung; ihre Integrität hängt von folgenden Faktoren ab:

- Kenntnis der **Pfadlänge** (Laufweg der Impulse)
- Zuverlässigkeit der **Timer-Präzision** (genaue Laufzeitmessungen)
- Genaue Bestimmung der Rohr-**Querschnittfläche** (Präzision bei der Durchflussberechnung + Laufzeitmessung)
- Genaue Bestimmung des **Durchflussprofils** (Genauigkeit der Berechnung d. gew. Geschw. aus Geschw.messungen d. verschiedenen Pfade).

Zur Beurteilung der Arbeitsbedingungen des Zähles ist durch die Überwachung bestimmter Diagnosewerte die Konstanz der fettgedruckten Listenelemente (ganz oder teilweise) zu beobachten.

3. Abwägungen in der Anwendung

Jede Gasmesstechnologie hat ihre Grenzen, und der Ultraschallzähler ist keine Ausnahme. Vor jeder Installation irgendeiner derartigen Technik sind die Beschränkungen des zur

Anwendung kommenden Primärgeräts in der jeweiligen konkreten Situation abzuwägen. Durch sorgfältige Betrachtungen vor der Konstruktion und Installation lässt sich vermeiden, dass sich die ausgewählte Technologie für die konkrete Situation als suboptimal erweist und kostspielige Nacharbeiten nötig werden.

3.1. Störgeräusche

Wie im Kapitel "Funktionsprinzip" ausführlich erläutert, hängt die Durchflussmessung mit Ultraschall von der präzisen Laufzeitmessung von Ultraschallimpulsen ab. Schall wird durch seine Tonhöhe (Frequenz) und Lautstärke (Amplitude) gekennzeichnet. Im Falle von ***Ultra***schall liegt die Impulsfrequenz jenseits der oberen Hörschwelle des Menschen (20 kHz) --- ultra = lat. *jenseits*.

Geräusche im Rohrsystem sind daher geeignet, die Sensoren beim Empfang der Impulse zu stören, wenn die Frequenzen zufällig zusammen fallen und die Ultraschallimpulse (bei ausreichend hoher Amplitude) übertönt werden. Geschieht dies, ist die Aufnahme der Impulse durch die Sensoren unmöglich; Laufzeiten (und damit auch der Betriebsvolumendurchfluss) können nicht gemessen werden.

Bei Konstruktion und Auslegung ist stets die Möglichkeit von Störgeräuschen zu berücksichtigen; die Installation von Ultraschallzählern in der Nähe von Geräuschquellen sollte vermieden werden. So offensichtlich dies sein mag, ist es in der Praxis oft leichter gesagt als getan, da die häufigsten Geräuschquellen Mengen- und Druckregelventile sind, die sich in Übernahmestationen immer in der Nähe der Zähler befinden. Wichtig zu wissen ist auch, dass die für einen ***Ultra***schallzähler schädlichen Geräusche für Menschen unhörbar sind, sodass die häufigsten Störquellen geräuschlose oder 'flüsternde' Garnituren sind. Dabei wird durch die Konstruktion ein 'Lärmschutz' erzielt, bei dem das Geräusch aus dem menschlichen Hörbereich verbannt, aber dafür in den Ultraschallbereich verschoben wird, wo der Ultraschallzähler arbeitet.

Deshalb müssen sie an Orten installiert werden, wo sie durch solche Ventile am wenigsten beeinträchtigt werden. Die meisten Hersteller können spezielle Hinweise für ihre jeweiligen Produkte geben. Im Allgemeinen gilt:

- **Installation**: Ultraschallzähler sollten vor von Steuer- und Regelgeräten installiert werden
- **Schalldämpfer**: Zwischen Zähler und Störquelle sollten Schalldämpfer installiert werden (T-Stücke, Separatoren etc.)
- **Hilfe durch den Hersteller**. Der Hersteller hat evtl. Signalgeber mit anderen Frequenzen, die vor Ort weniger störanfällig sind, und/oder genaue Gerätedaten, sodass eine geplante Installation aufgrund der installierten Ventile sowie Strömungs- und Druckabfälle analysiert und Schalldämpfungsmaßnahmen empfohlen werden können.

3.2. Verunreinigungen

Verunreinigungen und Flüssigkeiten können (wie bei allen Strömungsmessmethoden) die Leistungsfähigkeit und Präzision von Ultraschallzählern beeinträchtigen. Die Auswirkungen variieren je nach verwendeter Technik. Zum Beispiel verändern bei Blendendurchflussmessern Ablagerungen an der Blende die Maßhaltigkeit, auf der die Messung beruht. Bei einem Turbinenradzähler können Verunreinigungen die Reibung in den Lagern erhöhen und den Zähler so verlangsamen. Beim Ultraschallzähler können die Sensoren blockiert und wichtige Maße verändert werden (Durchmesser, Pfadlängen).

Was die Durchmesser betrifft, muss stets im Auge behalten werden, dass der Ultraschallzähler lediglich Geschwindigkeit misst und dass der (unkorr.) Betriebsvolumendurchfluss aus dem Produkt dieses Wertes und der Querschnittfläche berechnet wird. Eine Abweichung von einem Prozent in der Querschnittsfläche zieht eine einprozentige Abweichung in der berechneten Menge nach sich! Das heißt, zwischen Querschnittfläche und dem Volumen-Messfehler besteht ein 1:1-Verhältnis. Auch Pfadlängenänderungen aufgrund von Ablagerungen an den Sensoren können Messfehler verursachen; allerdings lassen sich diese mit Hilfe von Schallgeschwindigkeitsvergleichen leicht aufspüren (siehe unten: "Diagnose").

Ablagerungen im Zählergehäuse verursachen schwerwiegendere Fehler, sind aber auch schwieriger aufzuspüren. Es gibt subtile Diagnoseindikatoren, die beobachtet werden können, aber lediglich einen Anfangsverdacht darstellen; eine visuelle Inspektion und ggf. die Reinigung des Gehäuseinneren ist normalerweise unumgänglich. Empfohlene Maßnahmen:

- Ortsauswahl bei der Installation von Anfang an mit Blick auf mögliche Kontamination durch Flüssigkeiten / Schmutz; ggf. zusätzliche Einlaufseparatoren, Filter und Abflüsse in der Zählerstrecke, um die Kontamination von vornherein auszuschließen oder zumindest eine Möglichkeit zum Ablassen von Flüssigkeiten zu schaffen.
- Ggf. ist die Gerätestrecke mit Gefälle ins Auge zu fassen, sodass sich Flüssigkeiten im Zähler bzw. Messbereich nicht ansammeln können. Flüssigkeiten sammeln sich vorzugsweise am tiefer liegenden Ende der Zählerstrecke an, wo dann idealerweise ein Abfluss installiert werden könnte.
- Installation von Kontrollöffnungen oder sogar T-Stücken mit Verschlüssen mit UNI-Schrauben für die visuelle Inspektion mit einem Endoskop und (im Falle von T-Stücken / Deckeln) für die Reinigung der Zählerstrecke.
- Regelmäßige Programme mit Diagnosemaßnahmen und visueller Inspektion, um Ablagerungen aufzuspüren und Messfehler aufgrund von Maßänderungen zu vermeiden.

3.3. Profilveränderungen

Wie im Kapitel "Funktionsprinzip" ausführlich dargestellt, müssen die gemessenen Pfadgeschwindigkeiten gemittelt und in eine 'gewichtete Strömungsgeschwindigkeit' umgerechnet werden, um zu einem (unkorr.) Betriebsvolumendurchfluss unter

Betriebsbedingungen zu kommen. Deshalb sollte sichergestellt werden, dass das aktuelle Strömungsprofil mit dem bei der Kalibrierung nicht maßgeblich abweicht und außerdem, dass das Profil symmetrisch ist (Abb. 2), sodass die Wichtungsfaktoren der einzelnen Pfade, wie sie vom Hersteller definiert wurden, nach wie vor ihre Gültigkeit haben.

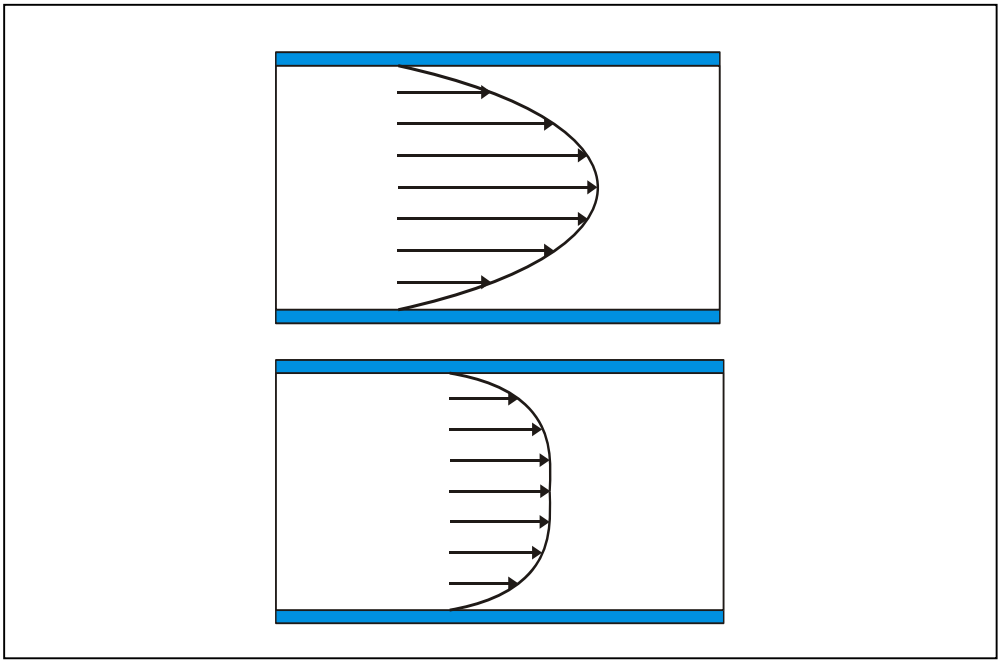


Abb. 2: Laminare und turbulente Strömungsprofile

Aus diesem Grund sollten die Pfadgeschwindigkeiten bei der Kalibrierung und der Definition der Zählerfaktoren im Labor aufgezeichnet und bei späteren Inspektionen vor Ort mit dem aktuellen Profil verglichen werden. Bei dem Versuch, die Strömungsprofile zu charakterisieren und die gewichtete Strömungsgeschwindigkeit möglichst genau zu berechnen, gelangen die verschiedenen Hersteller zumeist zu unterschiedlichen Pfadkonfigurationen. Einige Konzepte erweisen sich dabei als effektiver als andere, obwohl durchaus argumentiert werden kann, dass leistungsfähige Strömungsgleichrichter alle diesbezüglichen Versuche und Unterschiede irrelevant machen. Unabhängig davon, ob ein Strömungsgleichrichter verwendet wird oder nicht, ist es immer noch von entscheidender Bedeutung, dass ein Mehrpfad-Zähler Hinweise liefert, wenn das Ist- vom Soll-Profil (d. h. dem Kalibrierungsprofil) abweicht. Eine gute Zählerpfadkonstruktion ermöglicht die Berechnung und Dokumentation von Drall und Asymmetrien.

Profiländerungen können durch Hindernisse in der Zählerstrecke, Ansammlungen von Fremdkörpern oder variierende Oberflächenrauhigkeiten der Rohrwände oder durch Vorsprünge oberhalb des Zählers auftreten (letztere z.B. für Probesonden und

Eintauchschutzrohre). Die häufigste Ursache für Profilstörungen sind allerdings Standardkomponenten, wie z. B. T-Stücke, Krümmer und Sammler. Sie erzeugen Drall, Asymmetrien und Kombinationen aus beidem (Abb. 3).

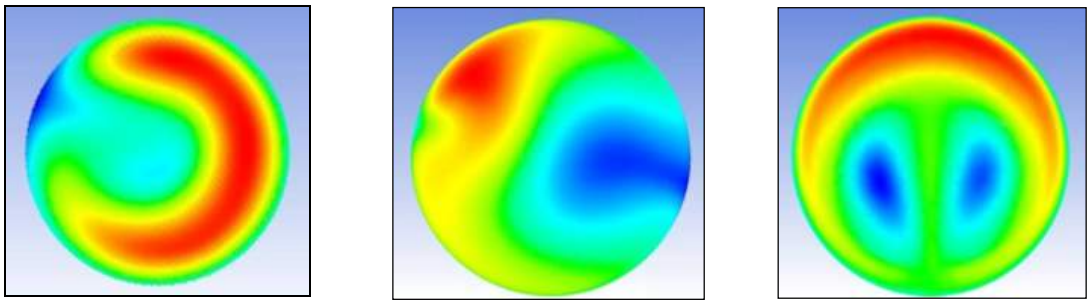


Abb. 3: Drall, Asymmetrie und Querströmungen (vom Rohrende aus gesehen)

Allgemeine Maßnahmen zur Gewährleistung gleichbleibender Strömungsprofile:

- Profilveränderungen durch konstruktive Maßnahmen beim Zählereinbau minimieren (lange Stücke geraden Rohrs) oder Einbau von Elementen zu deren Normalisierung, z. B. Strömungsgleichrichter***. (Hinweis: Bei Einbau eines Strömungsgleichrichters muss der Zähler im Labor mit diesem zusammen und in derselben Einbaulage kalibriert werden, genau so, wie die beiden Geräte später vor Ort zueinander positioniert sein werden.)***
- Installiert werden sollte ein Zähler mit einer Mehrpfadkonfiguration, die das Strömungsprofil angemessen charakterisiert ***und*** über die Diagnosefunktionen melden kann, ob Drall und / oder Asymmetrien auftreten.
- Bei der Erstinbetriebnahme ist das Strömungsprofil noch einmal zu kartieren und zu überprüfen, ob die Übertragung des strömungskalibrierten Zählersystems (Zählerstrecke und ggf. Strömungsgleichrichter) an den Einsatzort erfolgreich war: Ist das Profil vor Ort anders als das Kalibrationsprofil im Labor kann das den Zählerfaktor beeinflussen!

Die Hersteller richten ihre Forschungsarbeit nach wie vor intensiv auf Entwicklung neuer Messpfade, die wiederholbare Störungsbeschreibungen und die Messung ihrer Auswirkungen auf die Zählerfaktoren ermöglichen. Mit diesen Konstruktionen und Daten über die Veränderungen der Zählerfaktoren lässt sich die Datenausgabe der Geräte anschließend entsprechend korrigieren. Allerdings stellt dies eine große Herausforderung dar, da Art und Schwere der Störungen variieren und die Charakterisierung der Reaktion des Instruments auf so viele verschiedene Einflüsse eine umfangreiche und statistisch zuverlässige, akkurate Datenbasis verlangt.

3.4. Anforderungen an die Installation

Wie in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt, ist es für eine korrekte Messung sehr wichtig, dass das Strömungsprofil voll entwickelt ist. Typische vorgeschaltete Rohrelemente, wie z. B. Blenden, Sammelrohre, T-Stücke, Strömungsgleichrichter, Filteranlagen, Rohrweitenänderungen (Stufen, Expander und Reduzierstücke) sowie Ventile verursachen im Strömungsprofil Drall und Asymmetrien. In der ISO 17089-1 [2] wird hierzu ausgeführt,

dass asymmetrische Profile ggf. einen Einlaufschieber von 50 DN ohne Strömungsgleichrichter benötigen und Drall ggf. eine gerade Einlaufstrecke von 200 DN ohne Strömungsgleichrichter erforderlich macht, bevor man ein voll entwickeltes Strömungsprofil erhält.

Gerade Einlaufstrecken von 50 oder 200 DN sind für Standardinstallationen natürlich nicht geeignet. In der ISO 17089-1 [2] wird eine gerade Einlaufstrecke von 30 bis 50 DN ohne Strömungsgleichrichter empfohlen sowie eine Auslaufstrecke von 3 DN als Minimum. Mit Strömungsgleichrichter wird eine gerade Strecke von 10 DN zwischen Strömungsgleichrichter und Ultraschallzähler empfohlen.

Dies steht klar im Widerspruch zu den Empfehlungen des AGA Report Nr. 9 [1]. Hier wird vor dem Strömungsgleichrichter eine gerade Strecke von 10 DN angesetzt, gefolgt vom Strömungsgleichrichter und einer weiteren geraden Strecke von 10 DN hin zum Ultraschallzähler. Nach diesem sollte dann eine gerade Auslaufstrecke von 5 DN folgen.

Unglücklicherweise stellen weder die ISO 17089-1 noch der AGA 9 Report deutlich die Installationsbedingungen oder -anforderungen für den uni- bzw. bidirektionalen Betrieb dar, und was ausgeführt wird, widerspricht sich. Dies kann zu Verwirrung führen und ggf. sogar verhindern, dass höher entwickelte Technologie mit kleineren geraden Einlaufschiebern verwendet wird, weil die Ausführungen in beiden Standards sehr konservativ gehalten sind. Viele Endnutzer wollen sicher gehen und halten sich an etablierte Normen und Standards, verlieren dabei aber durch das Ignorieren neuer Trends Geld (höhere Investitionen) und verschwenden Platz.

Dieselbe Verwirrung existiert bei den Vorsprüngen und Variation des inneren Durchmessers [1, 2]. Sowohl in der ISO 17089-1 als auch im AGA 9 wird ausgeführt, dass Einlauf- und Auslaufstrecke gerade sein und dieselbe Weite wie der Ultraschallzähler haben sollten. Der AGA 9 Report führt aus, dass die Innendurchmesser des Einlaufs und des Zählers innerhalb von 1 % liegen müssen. Die ISO 17089 nennt 1 % als Vorzugswert und 3 % als Maximum.

Abb. 4 zeigt die Installationsanforderungen für den USZ 08 von RMG by Honeywell im unidirektionalen Betrieb. Abb. 5 zeigt die Installationsanforderungen für den USZ 08 von RMG by Honeywell im bidirektionalen Betrieb. Beide Varianten entsprechen den Bauartzulassungen für eichamtliche Messungen gem. PTB und MID [3, 4].

Zunächst sind die Anforderungen für den Einlaufschieber wesentlich geringer, als in ISO und AGA gefordert (10 DN ohne Strömungsgleichrichter, 5 DN mit), und zwar für beide Betriebsarten; und dies wird auch in der Bauartzulassung bestätigt. Die Strömungstests gem. MID, TRG 13 und OIML 137-1 erfüllt der USZ 08 auch mit diesen wesentlich kürzeren Auslaufstrecken [5, 6 and 7]. Das Ergebnis ist eine kleinere Anlage und entsprechend geringere Investitionskosten.

Zum zweiten dürfen die Durchmesser zwischen - 2 % und + 5 % (7 %) variieren, ohne dass der Ultraschallzähler seine Messgenauigkeit gem. ISO und AGA 9 verliert. Das heißt, die Anforderungen sind wesentlich weniger streng als im AGA 9 Report bzw. in der ISO-Norm gefordert und lassen mehr Flexibilität für die Installation. Die Tests wurden auf zugelassenen Prüfanlagen durchgeführt und die Ergebnisse sind in der Bauartzulassung für eichamtliche Messungen dokumentiert [3, 4].

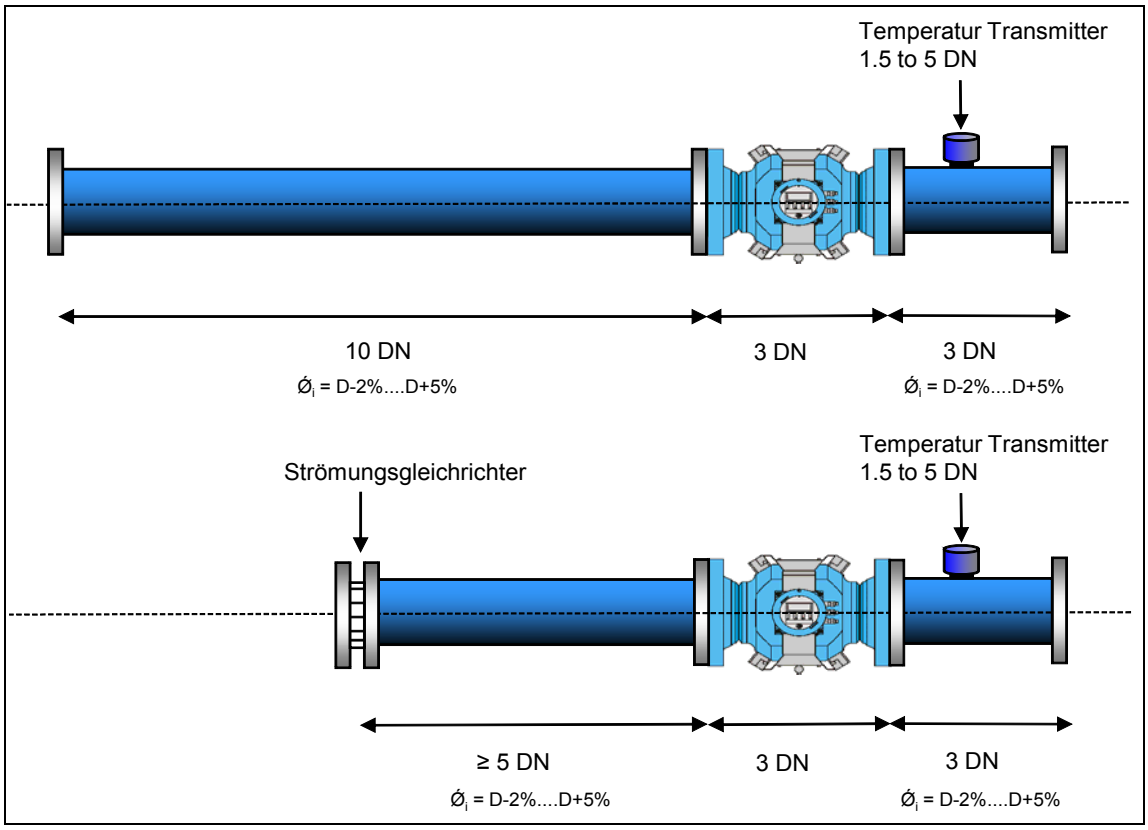


Abb. 4: Typische Installationsanforderungen für den unidirektionalen Betrieb

Für die Installation der Temperaturmessung schlagen sowohl die ISO-Norm als auch der AGA 9 Report die Installation 2 bis 5 DN nach dem Ultraschallzähler vor (unidirektionaler Betrieb). Für den bidirektionalen Betrieb sollte die Temperaturmessung 3 bis max. 5 DN nach dem Ultraschallzählerflansch installiert werden. Ganz allgemein muss die

Temperaturmessung so installiert werden, dass die Gastemperatur korrekt gemessen und die Messung nicht von der Umgebungstemperatur beeinträchtigt wird.

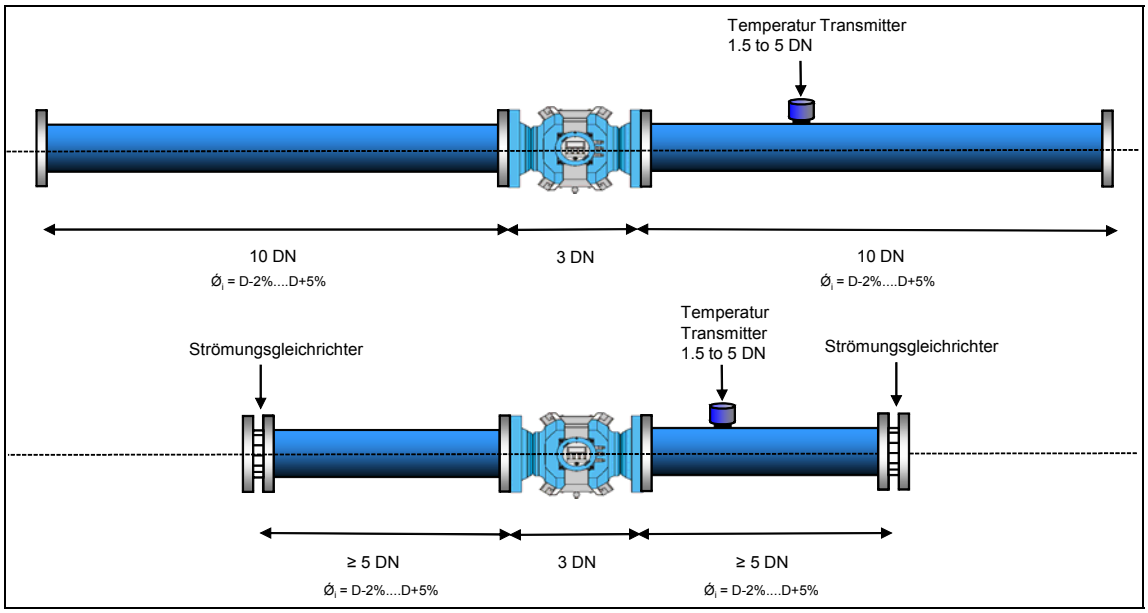


Abb. 5: Typische Installationsanforderungen für den bidirektionalen Betrieb

4. Konstruktive Entscheidungen

4.1. Allgemein

Bei der Entwicklung von Ultraschallgaszählern müssen die Hersteller zwei Dinge unter einen Hut bringen: den Wunsch nach einem 'perfekten' Instrument und die Notwendigkeit einer wirtschaftlichen Lösung, die sowohl die Anforderungen der Kunden als auch der einschlägigen Normen erfüllt – in diesem Fall AGA TMC Report No. 9 [1] und ISO 17089 [2]. Obwohl alle Ultraschallgaszähler auf demselben Prinzip beruhen (absolute digitale Laufzeitmessmethode), machen die Entscheidungen ihrer Hersteller doch jedes Produkt einzigartig. Unterschiede:

- Konstruktion der Ultraschallsensoren
- Geometrie & Orientierung der Messpfade
- Anzahl der Messpfade
- Algorithmen für die Impulserkennung

4.1.1. Anzahl der Messpfade

In den Abschnitten über Profilveränderungen und die Notwendigkeit von reproduzierbaren Strömungsprofilen wurde deutlich, dass die Messung umso besser wird, je mehr 'Geschwindigkeitsproben' aus dem Strom gewonnen werden, d.h. je mehr Messpfade der Zähler aufweist. Offensichtlich ist aber auch, dass mehr Pfade mit höheren Kosten verbunden sind und die SPU mehr Daten verarbeiten muss, was aufgrund längerer Berechnungen wiederum die Messwertausgabe verlangsamen könnte. Außerdem können kleinere Zähler aufgrund von Platzproblemen keine unbeschränkte Zahl von Sensoren aufnehmen.

4.1.2. Pfadanordnung

Beschränkungen bei der Anzahl der Pfade und der Wunsch nach möglichst vielen 'Proben' aus dem Strömungsprofil können immerhin bis zu einem gewissen Grad durch sorgfältige Positionierung (Orientierung) der Sensorpfade in Einklang gebracht werden. Wieder sind Kompromisse nötig, hier zwischen der Anzahl der 'Stücke' aus dem zu messenden Querschnitt und einer eher axialen Orientierung, die Drall, Querströmungen und Asymmetrien erfassen kann. Bei einigen Fabrikaten wird die axiale Orientierung durch einen V-Pfad und Reflektion von der Rohrwand erhöht, während in anderen Fällen der direkte Weg zwischen den Sensoren vorgezogen wird, um Signalabschwächungen und -verzerrungen zu vermeiden, die deren Detektion kompromittieren könnten.

4.1.3 Konstruktion der Sensoren

Die Qualität der Ultraschallsensoren ist das Herzstück eines jeden zuverlässigen Ultraschallzählers. Sie sind so konstruiert, dass sie bei einer gegebenen Frequenz eine maximale Amplitude und möglichst gleichförmige Impulse mit hoher Wiederholqualität erzeugen, die zuverlässig detektiert werden können. Diese Herausforderung wurde von verschiedenen Herstellern unterschiedlich gelöst, wieder mit Kompromissen zwischen konstruktiven Vorteilen, Kosten und Zuverlässigkeit. Einige bieten Sensoren mit freiliegenden Elementen an, sodass das Signal nicht von einer Kappe abgeschwächt wird – die den Sensor aber andererseits vor Fremdkörpern und Schmutz schützen würde. Andere verwenden Kappen und konzentrieren sich auf die Balance für eine bessere Signalintegrität.

4.1.4 Algorithmen für die Impulserkennung

Eine weitere Schlüsselkomponente für einen zuverlässigen Gaszähler ist eine SPU (Signal Processing Unit), die Ultraschallimpulse auch in einem schwierigen Betriebsumfeld (Störgeräusche, Schmutz etc.) sicher erkennt. Ultraschall ist anfällig für Störgeräusche, und manchmal lässt sich die SPU durch andere Geräuschquellen täuschen. Das kann zu großen Fehlermargen führen.

Auch können Fehldetektionen auftreten ("Cycle Jumps", "Peak Skips"), die zu systematischen Fehlern bei der Laufzeitmessung führen. (Abb. 6 zeigt das typische 'Wellenpaket' eines Ultraschallsignals.) Die Impulserkennungsalgorithmen vieler Hersteller verwenden einzelne Peaks in den Impulsflanken als Start- / Stopppunkte für die Laufzeitmessung, um die erforderliche Auflösung für genaue Strömungsmessungen zu bekommen. Ein Peak Skip liegt vor, wenn die SPU für diesen Zweck den falschen Peak auswählt. Ein solcher Fehler kann mit Hilfe der Korrelation Pfad / Schallgeschw. aufgespürt werden (siehe Kapitel 5.3).

Vor diesem Hintergrund kommen diverse Kriterien für die Impulsvalidierung zum Einsatz, z. B. das Abzählen der Peaks oder Messen individueller Peak-Amplituden und die Auswahl eines speziellen Peaks für die Messung. Bei einer anderen Technik werden wiederkehrende Impulse erfasst und miteinander verglichen; diese wird häufig als "Stacking" bezeichnet. Und wieder geht es um Kompromisse und Entscheidungen: Stacking beispielsweise kann eine exzellente Methode für die Impulsvalidierung sein. Gleichzeitig aber wird die Datenverarbeitung verlangsamt und die Anzahl der validierten Impulse verringert, sodass statistisch evtl. nur sehr kurzzeitige Messungen vorliegen, die ihre Empfindlichkeit und Zuverlässigkeit beeinträchtigen. Manchmal ist die Datenverarbeitung so langsam, dass Auffrischungsraten von über 1 Sekunde 'erreicht' werden.

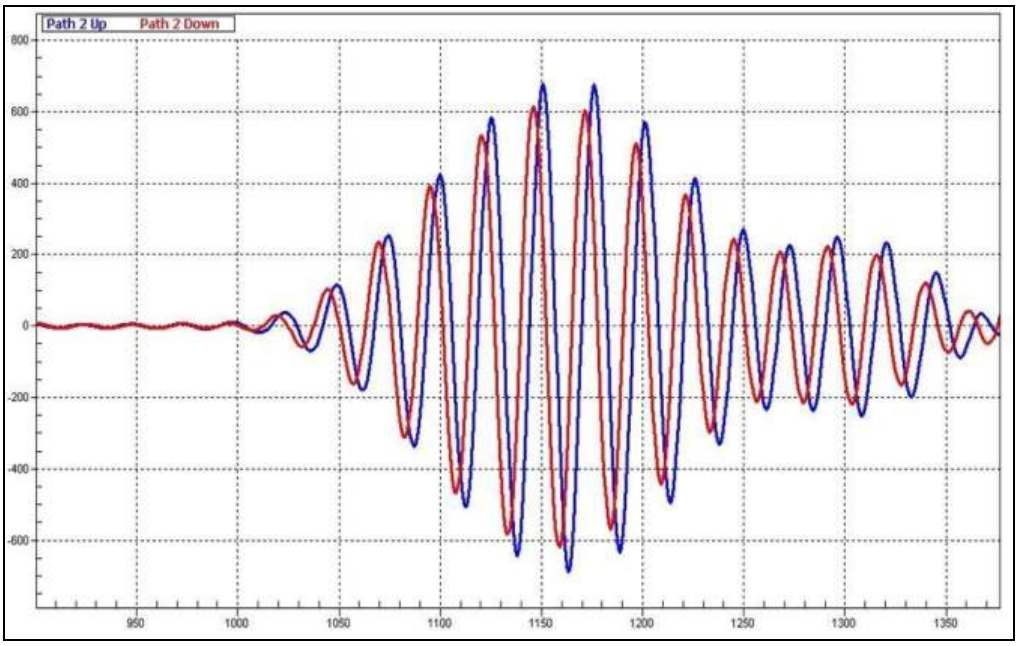


Abb. 6: Typischer Ultraschallimpuls (Rohsignal) eines USZ 08

4.1.5 Zählerdurchmesser

Einige Hersteller sind zu der Ansicht gelangt, dass ein reduzierter oder konisch zulaufender Zählerdurchmesser das Geschwindigkeitsprofil verbessert, sodass weniger Pfade benötigt werden. Außerdem wirkt ein reduzierter Durchmesser ein bisschen wie eine Düse, sodass das Geschwindigkeitsfeld im Messbereich von der Rohrwand ferngehalten und dort weniger Turbulenzen verursacht werden, die die Signalerfassung durch Impulse mit einer geringeren Amplitude (d. h. mit weniger Energie) beeinträchtigen könnten. Mit einem reduzierten Durchmesser kann evtl. auch die Notwendigkeit umgangen werden, Gehäuse für unterschiedliche Maßsysteme anzubieten. Wieder sind Kompromisse im Spiel, diesmal im Hinblick auf die Messbereichskapazität. Außerdem können sich an den tiefsten Punkten am Ein- und am Ausgang des Zählers Flüssigkeiten und Fremdkörper ansammeln.

4.2. RMG by Honeywell macht den Unterschied

Vor diesem Hintergrund ist man bei RMG by Honeywell hinsichtlich der Konstruktion zu folgenden Entscheidungen gelangt [8, 9]:

4.2.1. Anzahl und Orientierung der Messpfade

6 Pfade in drei übereinander gelagerten, horizontalen Ebenen, in jeder Ebene zwei X-förmig angeordnete Pfade: eine Zentralebene und zwei geometrisch gleiche Nebenebenen. Diese Orientierung erlaubt die Messung von Drall, Querströmungen und Asymmetrien und mit Hilfe des Gauß-Chebychev-Profilmodells für kompressible Fluide (Abb. 7 und 8) die transparente Gewichtung der Pfadgeschwindigkeiten. Dieses Pfadmodell wurde von RMG by Honeywell Ende 1998 eingeführt, sodass mittlerweile Erfahrungen aus 13 Jahren vorliegen und bereits hunderte von Ultraschallgaszählern mit dieser Konfiguration installiert wurden. Bisher sind keine Gründe für ihre Änderung aufgetreten. Sie ermöglicht die Detektion bzw. Messung von Asymmetrien, Drall und Querströmungen.

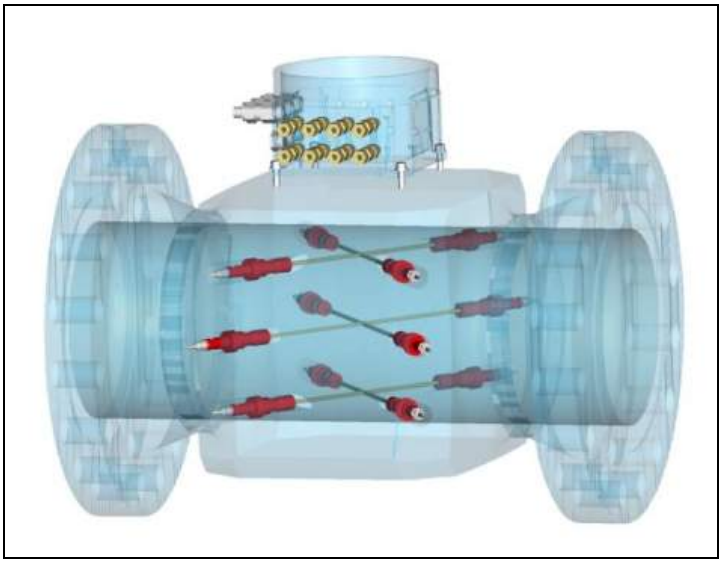


Abb. 7: Messpfadkonfiguration nach RMG by Honeywell

Eine Kompensation ist nicht erforderlich, da das Strömungsprofil direkt gemessen wird. Messungen mit sich kreuzenden Pfaden gewährleisten die optimale Analyse der Geschwindigkeitskomponenten v_1 bis v_6, und zwar im Falle von Asymmetrien, Drall und Querströmungen. Der Betriebsvolumendurchfluss Q ergibt sich aus der Multiplikation der gewichteten mittleren Strömungsgeschwindigkeit und der Rohrweite (Gleichung 6). Eine zusätzliche Reynoldszahl-Korrektur ist nicht erforderlich.

(Gleichung 6) $$Q = A \cdot \bar{v} = A \cdot (w_1 v_1 + \cdots + w_6 v_6)$$

Es seien:

Q = unkorr. Betriebsvolumendurchfluss (acfs oder m^3/s)

A = Rohrweite (ft oder m)

w_i = Gewichtungsfaktor

v_i = Pfadgeschwindigkeit (fps oder m/s)

$\bar{v}$ = gewichtete Strömungsgeschw. (fps oder m/s)

Darüber hinaus hat sich RMG by Honeywell für die direkte Signalübertragung von Sensor zu Sensor entschieden, um Probleme mit der Abschwächung oder Verzerrung von Signalen zu vermeiden, wie sie bei V-Pfaden auftreten können.

Die Verzerrung von Impulsen könnte mit Hilfe von Reflektoren im Messbereich an der Rohrinnenseite vermindert werden, allerdings kompromittieren diese wieder den Durchmesser und generieren selbst Turbulenzen. Hinweis: Bei früheren Konstruktionen von RMG by Honeywell kamen V-Pfade und Reflektoren für DN 100 (4”) und DN 150 (6”) tatsächlich zum Einsatz. Doch dann gelang es RMG by Honeywell dank kleinerer Sensoren, 12 davon auf einem Gehäuse DN 100 (4”) bzw. DN 150 (6”) unterzubringen, sodass die Punkt-zu-Punkt-Anordnung möglich wurde. Damit ist die 6-Pfad-Konstruktion nunmehr für alle Ultraschallgaszähler vom kleinsten (DN 100 - 4”) bis zum größten (DN 1000 - 40”) Durchmesser erhältlich.

Wie bereits ausgeführt, ermöglicht die X-förmige 6-Pfad-Konfiguration in drei Horizontalebenen die direkte Messung von Asymmetrien des Strömungsprofils. In Abb. 9 wird dies erläutert. Die Abb. besteht aus drei Teilen:

- Teil 1: axiale Strömungsgeschw.
- Teil 2: tangentiale Strömungsgeschw.
- Teil 3: resultierende Gesamtströmungsgeschw.

Zunächst einmal ist Geschwindigkeit grundsätzlich ein Vektor. Zum besseren Verständnis müssen wir als nächstes die axiale Strömungsgeschwindigkeit genauer analysieren. Die axiale Strömungsgeschwindigkeit entspricht der Hauptströmungsrichtung des Gases im Ultraschallgaszähler (Z). Die Ergebnisse der Messungen werden durch die beiden blauen Vektoren dargestellt. Ihre Addition im Vektorparallelogramm führt uns zu dem schwarzen

Vektor (V_z), der die Geschwindigkeit des Gases auf dieser Ebene in der Richtung Z wiedergibt.

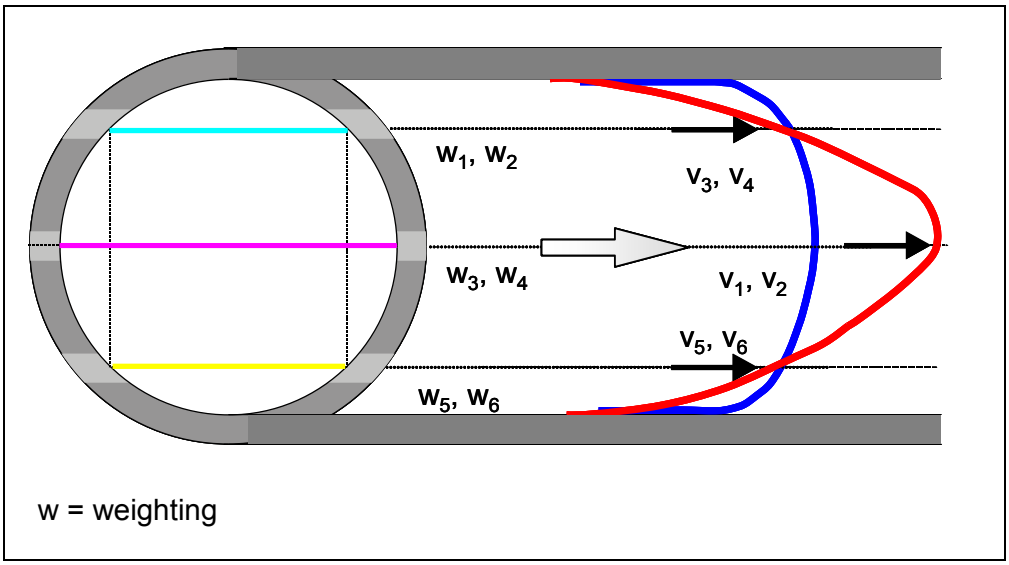


Abb. 8: 6-Pfad-Konfiguration des Ultraschallgaszählers von RMG by Honeywell nach Gauß-Chebyshev

Dasselbe Verfahren gilt für die tangentiale Strömungsgeschwindigkeit. Hier führt uns die Addition der beiden kleineren, blauen Vektoren zu dem grünen (resultierenden) Vektor, der die Gasgeschwindigkeit in Richtung X (V_x) darstellt - oder in anderen Worten: die Asymmetrie des Strömungsprofils!

Wir verfügen nun also über zwei Resultierende, nämlich V_z für die axiale und V_x für die tangentiale Strömungsrichtung. Addieren wir jetzt diese beiden Resultierenden, erhalten wir den Vektor für die Gesamtströmungsgeschwindigkeit (der rote Vektor im dritten Teil von Abb. 9). Der Winkel zwischen Gesamtströmungsvektor und V_z ist der sog. Drallwinkel. Idealerweise sollte dieser Null betragen.

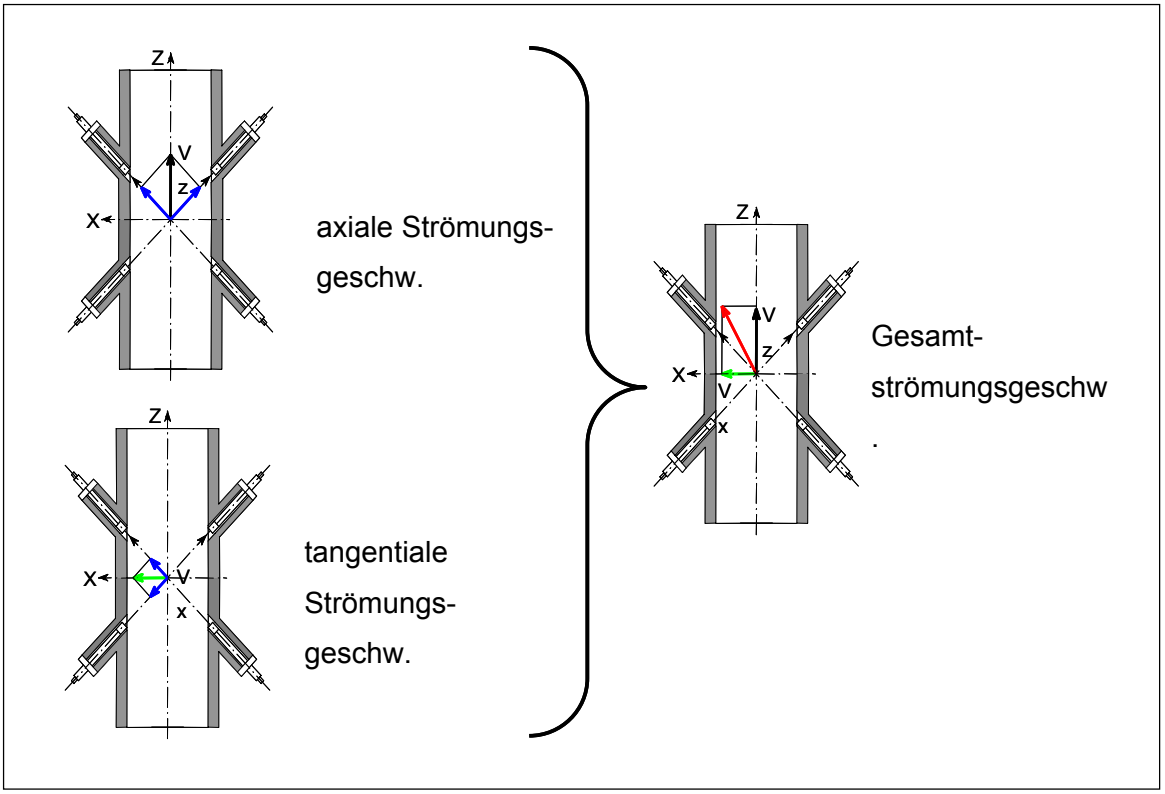


Abb. 9: Vektoranalyse der Gasgeschwindigkeit in einer Pfadebene

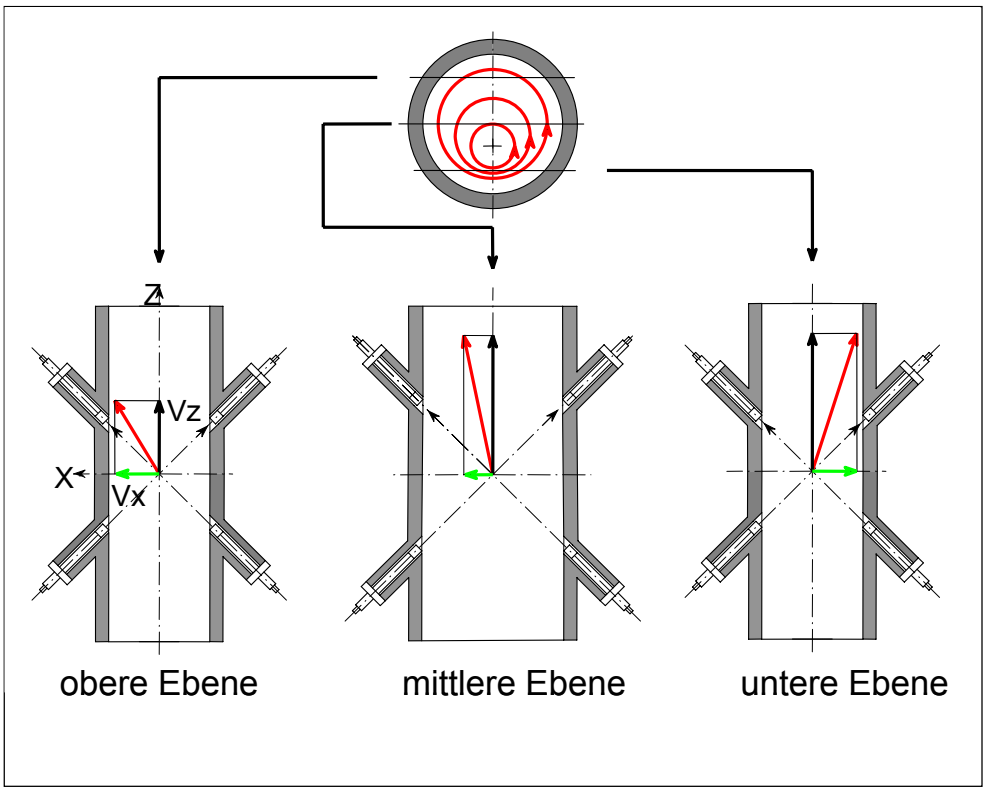


Abb. 10: Vektoranalyse der Gasgeschwindigkeit in allen drei Pfadebenen zur Abdeckung des kompletten Strömungsprofils

Wie bereits ausgeführt, arbeitet der Ultraschallgaszähler USZ 08 von RMG by Honeywell mit drei Messpfadebenen, sodass die beschriebene Vektoranalyse für alle drei Ebenen (oben, unten, Mitte) durchgeführt werden kann (s. Abb. 10). Aus Abb. 10 geht außerdem hervor, dass diese Konfiguration das gesamte Strömungsprofil abdeckt. Eine zusätzliche Korrektur mit der Reynoldszahl ist daher nicht erforderlich - der USZ 08 misst das Strömungsprofil direkt!

4.2.2. Konstruktion der Sensoren

RMG by Honeywell hat kompakte, metallisch in Titan gekapselte Hochenergiesensoren entwickelt (Modelle mit 120 bzw. 200 kHz), die besonders schmutzunempfindlich sind. Für störanfällige Betriebsumgebungen können alternative Frequenzen angeboten werden. Die hohe Signalamplitude des Piezokeramiksensors toleriert auch die Verwendung einer Schmutzkappe (die zur Vermeidung einer Signaldämpfung immer noch aus hauchdünnem Titan sein muss), ohne dass in der Einheit ein Druckausgleich vorgenommen werden muss. Diese vollständige metallische Kapselung der Sensoren ermöglicht den großen Einsatzbereich bis zu einem Druck von 250 bar. Abb. 11 zeigt den 120-kHz-Sensor des USZ 08.

Abb. 11: Piezokeramiksensor, komplett mit Titan gekapselt

Die Sensoren von RMG by Honeywell sind EExd-zertifiziert für explosionsgefährdete Bereiche. Der Vorteil liegt in vielfach höheren Nutzamplituden und in eine höhere Anregungsspannung. Die genaue Schutzklasse ist Ex II 2G Ex de IIC T5/T6, einsetzbar bei Drücken bis 250 bar (ANSI 1500). Darüber hinaus machen diese robusten Sensoren breite Messbereiche (1:100 und mehr) mit den entsprechenden hohen Geschwindigkeiten von über 40 m/s (131,2 ft/s) möglich.

4.2.3. Erkennungsalgorithmen

RMG by Honeywell verlässt sich auf eine große Zahl von Kriterien, um die Impulse zu validieren, ohne die hohe Signalrate zu kompromittieren (10 Impulse pro Sek.). Ein von

vielen Herstellern (einschl. RMG by Honeywell) verwendetes Kriterium ist die Identifizierung und Quantifizierung der Peaks hinsichtlich ihrer Position und Amplitude in den Impulsflanken. Die komparative Impulsanalyse (das sog. "Stacking") wurde jedoch vermieden, da sich heraus gestellt hat, dass die Signalverarbeitung in schwierigen Betriebsumgebungen (Störgeräusche, Turbulenzen etc.) entweder Auffrischungsraten über 1 Sek. oder eine Reduzierung der bewerteten 'Proben' unter die statistische Toleranzgrenze mit sich bringt. Deshalb hat RMG by Honeywell eine zusätzliche, qualitative Analyse zur Beurteilung der Impulsflanken und Identifizierung von Ultraschallimpulsen implementiert, durch die eine hohe Signalrate gewahrt bleibt. Abb. 12 zeigt ein Beispiel eines Ultraschallgaszählers des Typs USZ 08 in einer Gasstation.

Abb. 12: Ultraschallgaszähler USZ 08 von RMG by Honeywell in Tandemkonfiguration in der Messstation eines Untergrundspeichers in Deutschland (mit freundl. Genehm. der ENECO-Epe)

4.2.4. Zählerdurchmesser

Die ISO 17089-1 unterscheidet zwischen "Zählern mit vollem Durchmesser" und "Zählern mit reduziertem Durchmesser". Ein Ultraschallgaszähler mit "vollem Durchmesser" hat denselben Innendurchmesser wie der Flansch. Ein Zähler mit "reduziertem Durchmesser" hat einen kleineren Innendurchmesser als der Flansch. In der ISO 17089-1 wird von Innendurchmesserabweichungen abgeraten, und auch Vorsprünge sollten vermieden werden, um das Geschwindigkeitsprofil nicht zu stören. Aus diesem Grund beschloss RMG by Honeywell bereits während der Markteinführung des RMG USZ 08 in den späten

1990ern, den USZ 08 "mit vollem Durchmesser" auszulegen und die Sensoren nicht in den Zähler hinein ragen zu lassen (Abb. 13).

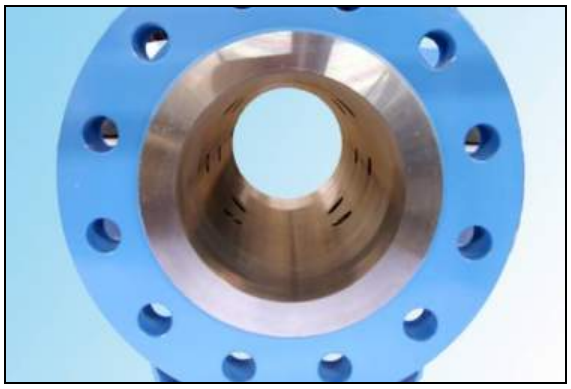


Abb. 13: Das Zählerinnere: der gesamte Innendurchmesser ist gleichbleibend offen – keine Sensoren etc. ragen hinein

Eine Unterteilung in "voller Durchmesser" und "reduzierter Durchmesser" mag unerheblich erscheinen. Abb. 12 zeigt aber, warum dies nicht so ist. Es handelt sich um eine Tandemkonfiguration zweier USZ 08 im bidirektionalen Betrieb in einem Erdgas-Untergrundspeicher. Wäre einer der beiden Zähler "reduziert", würde er für den anderen eine Strömungsprofilstörung darstellen. Bei einer solchen Installation wäre die Kombination "voller Durchmesser" und "reduzierter Durchmesser" keine gute Idee. Bei einer kompakten und kosteneffektiven Anwendung wie dieser ist ein Ultraschallgaszähler mit "vollem Durchmesser" also ideal.

Bei zwei Zählern mit "reduziertem Durchmesser" wäre zwischen beiden eine gerade Strecke von 10 DN erforderlich. Im Vergleich zur vorherigen Lösung würde dies einen erhöhten Platzbedarf und erhöhte Investitionskosten bedeuten.

5. Diagnosefunktionen: Zählervalidierung

Alle marktgängigen Ultraschallgaszähler verfügen über Funktionen zur Diagnose des Betriebszustands des Gerätes, bis hin zur Fähigkeit festzustellen, ob die ausgegebenen Messwerte korrekt sind. Das Funktionsprinzip des Ultraschallgaszählers unterstützt solche Funktonen und ihre Interpretation.

Wie bereits ausgeführt, beruht die Funktionsweise des Zählers auf dem Senden und Empfangen von Ultraschallimpulsen, der präzisen Messung ihrer Laufzeiten sowie der genauen Kenntnis ihrer Geometrie (Pfadlänge und -winkel). Die Zähler verfügen über Verarbeitungsalgorithmen für die Erkennung und Verarbeitung der Signale (= Ultraschallimpulse) und über hochpräzise Timer für die Zeitmessung.

Für die genaue und zuverlässige Funktion des Geräts sind also die Signalstärke, das Signal-Rausch-Verhältnis und die Präzision des Timers ausschlaggebend. Es folgt eine beispielhafte und relativ allgemeine Beschreibung von Zählerdiagnosefunktionen. Detaillierte Beschreibungen sind herstellerspezifisch und würden den Rahmen dieser Abhandlung sprengen.

5.1. Verstärkungsfaktor (AGC)

Der Verstärkungsfaktor von Ultraschallsensoren ist ein Maß für die Signalstärke (Amplitude), bei der der Sensor von der Zählerelektronik angeregt wird, Ultraschallimpulse zu erzeugen. Der Verstärkungsfaktor wird von der Elektronik automatisch so justiert, dass ausreichend Amplitude generiert wird, damit der Impuls auch erkannt werden kann. Der Verstärkungsfaktor variiert je nach Fluiddichte (d. h. Strömungsdruck, Zusammensetzung, Temperatur) und Empfängerqualität.

Es empfiehlt sich, beim Verstärkungsfaktor paarweise vorzugehen - eine Einheit A und eine Einheit B, die aufeinander abgestimmt werden. So geht man in den meisten Fällen vor. Fällt der Verstärkungsfaktor eines Sensorpaars aus dem Rahmen seiner üblichen Werte oder der der anderen Einheiten, könnte dies folgende Gründe haben:

- Sensorfehler
- Schmutzansammlung auf einem Sensor
- andere Probleme

Die Sensoren müssen überprüft und ggf. gereinigt oder ausgewechselt werden.

5.2. Signal-Rausch-Verhältnis

Die Analyse des Signal-Rausch-Verhältnisses (SRV) eines einzelnen Sensors kann Auskunft darüber geben, ob die Funktion des Zählers durch Rauschen beeinträchtigt wird. Fällt das SRV auf 1:1, wird das Nutzsignal vom Rauschen überwältigt und die Messung eingestellt. Wichtig zu beachten ist dabei, dass Schwankungen im SRV selbst noch kein Anzeichen für Präzisionsprobleme beim Zähler sind; allerdings steht die Impulserkennung (Detektion) in Frage. Werden die Impulse nicht erkannt, werden die Messungen eingestellt.

Sensoren, die in Richtung einer Störquelle ausgerichtet sind, haben gewöhnlich ein niedrigeres SRV als solche, die von der Störquelle weg weisen. Fällt das SRV auf ein Level, bei dem die Messungen eingestellt werden, ist am Zähler selbst keine Abhilfe mehr möglich. Die einzige Möglichkeit ist dann das Eliminieren der Störquelle, das Ändern ihrer Frequenz. Alternativ können Schalldämpfer zwischen dem Zähler und der Störquelle installiert werden; allerdings ist diese Lösung arbeits- und kostenintensiv, sofern solche Komponenten nicht bereits während der Konstruktionsphase geplant und installiert werden.

5.3. Schallgeschwindigkeit

Die Schallgeschwindigkeit ist ein wichtiges und mächtiges Diagnoseinstrument beim Ultraschallgaszähler, mit dem ermittelt werden kann, ob sich die Leistungsfähigkeit des Instruments verändert hat. Mit den vom Zähler 'gemessenen' Schallgeschwindigkeiten können zwei verschiedene Tests durchgeführt werden.

- Ein absoluter Vergleich der zählerkorrigierten Schallgeschwindigkeit mit der rechnerisch (aus den thermodynamischen Eigenschaften des Gases) ermittelten Schallgeschwindigkeit; und
- ein pfadweiser Vergleich, um festzustellen, ob ein Ausreißer bei einem bestimmten Pfad auf eine Änderung bei dessen Länge hindeutet. (Pfadlängenänderungen können an Eingabefehlern bei der Zählerkonfiguration oder an Ablagerungen am Sensor liegen.)

5.3.1. Vergleich – gemessene / errechnete Schallgeschw.

Rückblick: Gleichungen 3 und 4 aus dem Kapitel Funktionsprinzip:

(Gleichung 3) $$v = \frac{L}{2 \bullet \cos\varphi}\left(\frac{1}{t_D} - \frac{1}{t_U}\right)$$

(Gleichung 4) $$c = \frac{L}{2} \bullet \frac{(t_u + t_d)}{t_u \bullet t_d}$$

Ein Blick auf diese Gleichungen zeigt, dass die Fluidgeschw. ***v*** und die Schallgeschw. ***c*** beide direkt von der Pfadlänge des Zählers und seinen Laufzeitmessungen abhängen. Anders ausgedrückt: die Laufzeitmessungen und die Pfadlängendaten erlauben die Berechnung ***beider Werte***, ***v*** und ***c***.

Auf der anderen Seite kann die Schallgeschwindigkeit in Erdgas aus den Fluideigenschaften (Zusammensetzung, Druck, Temperatur) errechnet werden; z.B. mit den Berechnungsstandards gem. AGA 10 [10]. Das heißt, die Zählermessungen können mit dem errechneten Wert für die Schallgeschwindigkeit gem. der Gleichungen nach AGA 10 verglichen werden. Der ***gemessene*** und der ***errechnete*** Wert sollten in etwa übereinstimmen. (Meist wird eine Toleranz von +/- 0,2 % angesetzt, die aber je nach Qualität der Fluiddaten etwas laxer gehandhabt werden muss.)

Sollte sich der Unterschied zwischen Mess- und Berechnungswert als signifikant erweisen, können eine oder mehrere der folgenden Ursachen vorliegen:

- Eine oder mehrere Pfadlänge(n) stimmen nicht
- Der Timer stimmt nicht und verursacht Fehler bei der Laufzeitenermittlung (oder die Impulse werden falsch erkannt, was ebenfalls ein SPU-Problem ist)
- Die für die Berechnung der Schallgeschwindigkeit gem. AGA 10 verwendeten Daten stimmen nicht.
    - Problem bei der Gaszusammensetzung, falsche Daten.
    - Druck- und/oder Temperatursensoren stimmen nicht.

Diese Schlussfolgerungen sind möglich, weil Timer, Impulserkennung (bzw. SPU-Funktion), Pfadlänge und die Fluiddaten die einzigen Variablen sind, die Abweichungen zwischen den

Messungen und dem errechneten Wert der Schallgeschwindigkeit verursachen können. Diese Schlussfolgerungen sind möglich, weil Timer, Impulserkennung (bzw. SPU-Funktion), Pfadlänge und die die einzigen Variablen sind, die Abweichungen zwischen den Messungen und dem errechneten Wert der Schallgeschwindigkeit verursachen können.

5.3.2. Vergleich der Pfad – Schallgeschwindigkeit

Die Schallgeschwindigkeiten der einzelnen Pfade können verwendet werden, um evtl. dort vorhandene Probleme mit der Pfadlänge, und evtl. auch Fehlfunktionen der Sensoren aufzuspüren. Sollte der Istwert bei einem Pfad von seinem Normalmuster abweichen (das wie gesagt während der Kalibrierung bzw. Inbetriebnahme erstellt wurde und als Referenz dient), kann geschlossen werden, dass mit dem Pfad etwas nicht stimmt (Pfadlänge oder Impulserkennung bei einem der Sensoren). Das Problem könnte theoretisch auch beim Timer liegen, aber da dieser für alle Pfade verwendet wird, müssten alle Pfade die gleichen Abweichungen aufweisen. Trotzdem gilt natürlich, dass auch ein Timer-Fehler beim Vergleich zwischen zählerkorrigierter und nach AGA 10 berechneter Schallgeschwindigkeit sichtbar würde. Die in der AGA 9 geforderte maximale Abweichung zwischen den Einzelpfadschallgeschwindigkeiten beträgt 0,5 m/s, ist aber schon von daher wenig sinnvoll, dass bereits geringe Temperaturunterschiede zwischen den Ebenen zu vergleichbaren Abweichungen führen, die messtechnisch gar nicht erfasst werden können. Schließlich werden Temperaturtauchtaschen üblicherweise so angeordnet, dass die Temperatur in der Rohrmitte gemessen wird.

5.4. Profilveränderungen

Profilverzerrungen können durch den Vergleich eines gegebenen Herstellerdiagnosewertes für den Drallwinkel bzw. die Asymmetrie ermittelt werden; dies geschieht unter Verwendung einer ähnlichen Referenzwerttechnik wie beim Verstärkerfaktor und bei der Ermittlung der Schallgeschwindigkeit für einzelne Pfade. Der Nutzer sollte die für das jeweilige Herstellerprodukt verfügbaren Diagnosefunktionen prüfen und dabei die jeweilige Berechnungsbasis bedenken, da die Unterschiede in der Pfadgeometrie bei den verschiedenen Anbietern naturgemäß zu Unterschieden bei der Qualität und Empfindlichkeit dieser Methoden führen. Aufgrund dieser Empfindlichkeitsunterschiede kann an dieser Stelle auch keine generische Beschreibung der Alarme für Drall und Asymmetrien gegeben werden.

Allerdings hat natürlich jeder Nutzer eines Mehrpfad-Zählers die Möglichkeit, eine Normalreferenz für die einzelnen Pfade seiner gegebenen Geometrie zu erstellen und diese dann mit den Istwerten zu vergleichen. Allerdings ist Sorgfalt geboten, da das Strömungsprofil mit der Fluidgeschwindigkeit variiert, sodass jeder Vergleich zwischen Referenz und Istwert bei annähernd gleicher Geschwindigkeit / Reynoldszahl vorgenommen werden muss. Diese Komplikation spricht für solche Ultraschallgaszähler, die von vornherein

Werte für Drall und Asymmetrie anbieten. Der Nutzer sollte nach Möglichkeit beim Hersteller die genauen Messungen und Berechnungen erfragen, die zu den Drall- und Asymmetriewerten geführt haben, um sicherzustellen, dass sie verstanden wurden, da die unterschiedlichen Pfadkonfigurationen / -geometrien der Hersteller zwangsläufig zu unterschiedlichen Behandlungen und damit auch Empfindlichkeiten dieser Werte führen.

5.5. Conditioning Based Monitoring (CBM): *Die Methode von RMG by Honeywell*

Einer der Vorteile des Ultraschallgaszähler gegenüber allen anderen Technologien ist die Verfügbarkeit zahlreicher weiterer Informationen und Diagnosemöglichkeiten, wo andere Geräte nur Impulse oder Signale liefern, die proportional zum Gasvolumen sind. Solche Zusatzinformationen und Diagnosefunktionen werden gewöhnlich mit Hilfe einer separaten Windows™-basierten Software verarbeitet, die für diesen Zweck bereit gestellt wird. RMG by Honeywell bietet zwei Möglichkeiten für die Nutzung solcher zusätzlicher Daten: den Ultraschallrechner ERZ 2000 und die Windows™-basierte Software RMGView (Abb. 14).

Abb. 14: Online-Fenster von RMGView, der Diagnose- & Betriebssoftware des USZ 08

Parallel zum Normalbetrieb kann die Parametrisierungs- und Diagnosesoftware RMGView die folgenden CBM-Parameter live verarbeiten:

- Überwachung der AGC-Level
- Vergleich der Schallgeschw. der einzelnen Pfade
- Signalqualität:
  - Signal-Rausch-Verhältnis (SRV) in dB
  - Gültige Messungen in %
- Vergleich der Schallgeschw. mit AGA 10:
  - Soll-Schallgeschw. aufgrund der Erdgaszusammensetzung
  - vom Zähler gemessene Schallgeschw.
- Analyse des Strömungsprofils:
  - Vergleich der Strömungsprofilfaktoren
- Überwachung des Drallwinkels φ
- RMGs Präzisions-Onlinejustage

5.4.1. CBM – Vergleich Schallgeschw. für jeden Pfad

Die Pfadkonfiguration von RMG by Honeywell besteht aus 6 Pfaden, und für jeden liegt eine gemessene Schallgeschwindigkeit vor. Solange mit dem Ultraschallgaszähler und dem Strömungsprofil alles in Ordnung ist, sollte das Verhältnis der gemessenen Schallgeschwindigkeiten der einzelnen Pfade 1 betragen. Das folgende Beispiel sollte dies verdeutlichen. Hier sind die einzelnen Schallgeschw. (C_1 to C_6) aufgelistet. Beispielhaft werden die Verhältnisse C_1/C_2 und C_1/C_6 berechnet. Beide sind ≈ 1, sodass für die Messung von Standardbedingungen ausgegangen werden kann.

Beispiel:

Schallgeschw. für jeden Pfad:

C_1 = 341,91 m/s;

C_2 = 341,89 m/s;

C_3= 341,93 m/s

C_4 = 341,77 m/s;

C_5 = 342,08 m/s;

C_6 = 342,09 m/s

Verhältnis der Werte der verschiedenen Pfade:

C_1/C_2 = 1,00006

C_1/C_6 = 0,99947

etc.

5.4.2. CBM – Signal-Rausch-Verhältnis

Jede gültige Messung wird auf ihre SRV-Grenzen geprüft. Wird der untere Grenzwert erreicht, wird das Ergebnis entfernt. Abb. 15 zeigt typische SRVs für Innen- und Außenpfade in Abhängigkeit von der Gasgeschw.

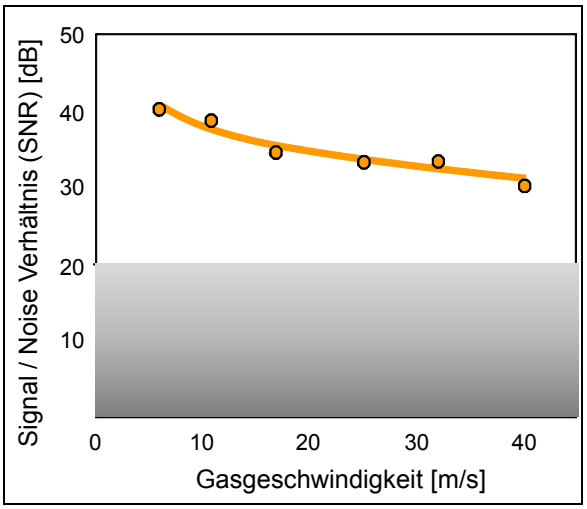


Abb. 15: Signal-Rausch-Verhältnis (SRV) in Abhängigkeit v. d. Gasgeschw.

Liegt das SRV über 20 dB, fand die Messung unter Standardbedingungen statt; andernfalls sind die Bedingungen gestört. Bei Ultraschallgaszählerinstallationen ist es nicht leicht, 'Rauschen' und damit auch das Signal-Rausch-Verhältnis zu definieren. So hat jeder Hersteller eigene Definitionen, was den Vergleich in absoluten Werten sehr erschwert.

5.4.3. CBM – Live-Vergleich der Schallgeschw. mit der AGA-10-Referenz [10]

In größeren Gasstationen, z.B. Grenzstationen, Untertagespeichern oder Übergabestationen, wird neben dem Zählersystem auch ein Prozessgaschromatograph (PGC) installiert. Ein PGC spaltet das Erdgas in seine 11 Hauptbestandteile auf, nämlich

- Stickstoff, Methan, Ethan, Propan, i/n-Butan, i/n-Pentan, Neopentan sowie eine Gruppe der höheren Kohlenwasserstoffe, die sog. C6+.

Mit diesen Daten und den Formeln gem. AGA 10 lässt sich für diese chem. Zusammensetzung die Schallgeschw. berechnen [10]. Das ist die sog. theoretische Schallgeschw. (S_{theor}). Auf der anderen Seite leitet der Ultraschallgaszähler die Schallgeschw. aus den gemessenen Laufzeitunterschieden der gegenläufigen Ultraschallimpulse ab. Das ist die gemessene Schallgeschw. (S_{mess}). Wie also soll der Vergleich in einer Online-Umgebung (also live) von statten gehen? Abb. 16 zeigt die Antwort. Die Analysedaten des PGC und die Messdaten des Ultraschallzählers (S_{mess}) werden zum Ultraschallrechner (ERZ 2000) geschickt. Der ERZ 2000 verfügt über eine Standardfunktion zur Berechnung der Schallgeschw. (S_{theor}) auf der Grundlage der Gasanalyse gem. AGA 10. Jetzt verfügt der Ultraschallrechner über beide Werte: S_{mess} und S_{theor}. Die Werte können problemlos verglichen werden. Normalerweise sollte der Unterschied unter 0,2 % liegen.

Wo könnten die Ursachen liegen, wenn dies nicht der Fall ist? Beim PGC, beim USM, bei der Temperatur- oder bei der Druckmessung! Anders ausgedrückt, eine genauere Untersuchung ist unumgänglich. In mehr als 80 % der Fälle hilft eine manuelle Kalibrierung des PGC, um die 'Normalbedingungen' wieder herzustellen. Vor diesem Hintergrund stellt sich natürlich die Frage, wer wen überprüft: Der PGC den USM oder umgekehrt? Trotzdem erweist sich der Vergleich als einfaches und hilfreiches Mittel zur Überprüfung der Messstrecke.

5.4.4. CBM – Strömungsprofilfaktoren

Die Art und Anzahl der Profilfaktoren des Ultraschallgaszählers hängen von den konstruktiven Entscheidungen hinsichtlich der Anzahl und Konfiguration der Messpfade ab. Die X-förmige 6-Pfad-Konfiguration in 3 Horizontalebenen von RMG by Honeywell führt zu zwei Hauptkategorien von Profilfaktoren (Abb. 17):

- X–Profilfaktor
  - Das horizontal orientierte Strömungsprofil auf der Basis der gekreuzten Pfade der Sensoren
- Y–Profilfaktor
  - Das vertikal orientierte Strömungsprofil

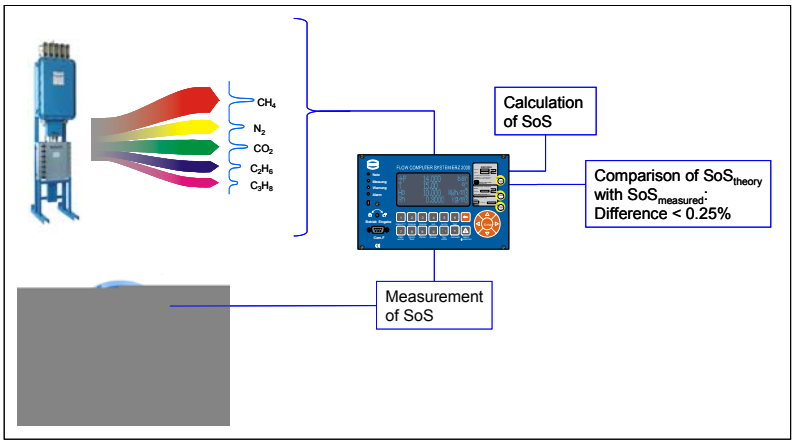
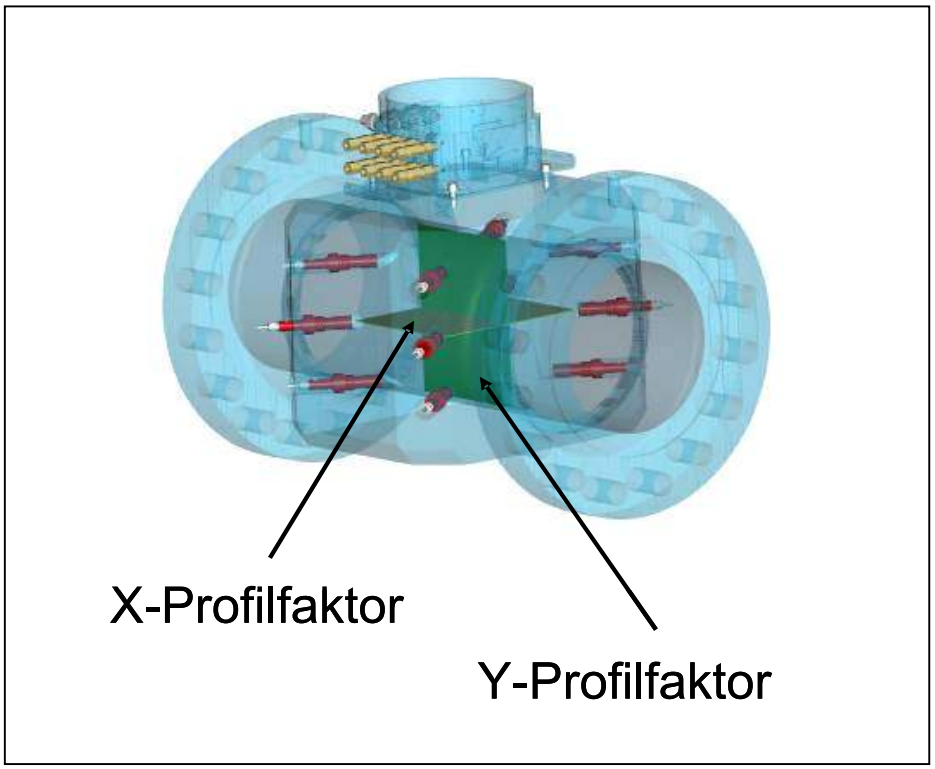


Abb. 16: Live-Vergleich von S_{theor} und S_{mess} gem. AGA 10 [10]

Unter normalen Umständen entspricht der X-Profilfaktor dem Y-Profilfaktor (X = Y). Liegt hingegen eine Störung vor, weichen die Werte ab (X ≠ Y). Das deutet darauf hin, dass die Integration des Strömungsprofils nicht vollständig ist. In anderen Worten, es fehlen Teile des Profils. Um die Situation zu klären, müssen die Unterfaktoren des Profils genauer analysiert werden (Abb. 18). Alle in diesem Kapitel behandelten Profilfaktoren können mit RMGView in Echtzeit verfolgt und angezeigt werden.



.**Abb. 17:** X- und Y-Profilfaktor in gekreuzter Konfiguration

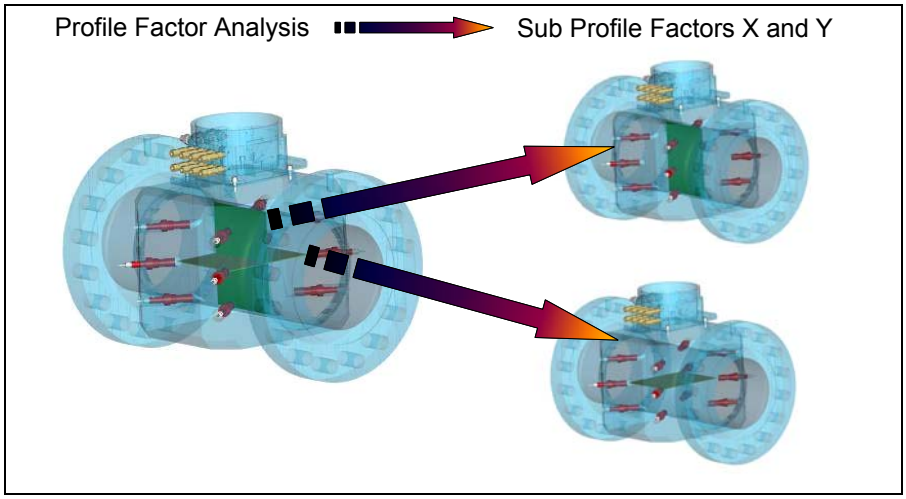


Abb. 18: Strömungsprofilfaktoranalyse erfolgt für X- und Y-Profilfaktor separat

Der X-Profilfaktor besteht aus zwei Unterfaktoren (Abb. 19):

- Profilfaktor X_1
- Profilfaktor X_2

X_1 entsteht durch den Vergleich der Mittelebene mit der oberen, X_2 durch den Vergleich der Mittel- mit der unteren Ebene. Unter normalen Umständen gilt: $X_1 = X_2$.

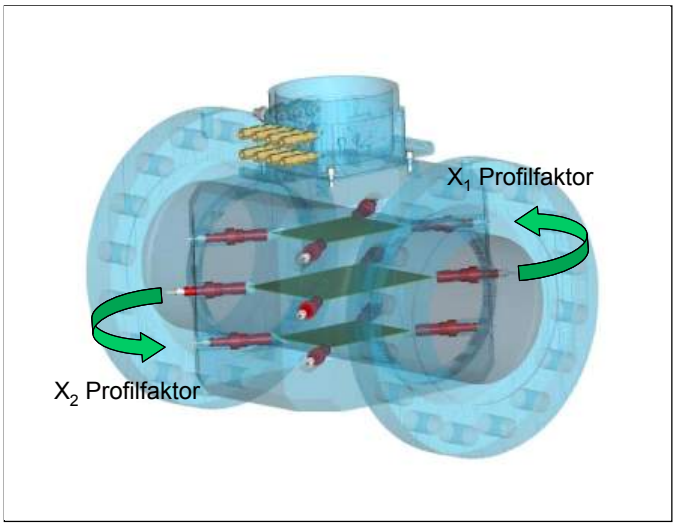


Abb. 19: X-Profilfaktor und seine zwei Unterfaktoren: X_1 und X_2

Analog zum X-Profilfaktor wird auch der Y-Profilfaktor in Unterfaktoren zerlegt. Die Unterfaktoren des Y-Profilfaktors sind in Abb. 20 dargestellt. Der Y-Profilfaktor zerfällt in zwei Unterfaktoren: Y_1 und Y_2. Y_1 wiederum besteht aus den Unterfaktoren $Y_{3,1}$ und $Y_{3,5}$, während Y_2 aus den Unterfaktoren $Y_{4,2}$ und $Y_{4,6}$ besteht. $Y_{3,1}$ und $Y_{4,2}$ entstehen durch den Vergleich

der Mittel- mit der oberen Ebene. $Y_{3,5}$ und $Y_{4,6}$ entstehen durch den Vergleich der Mittel- und der unteren Ebene.

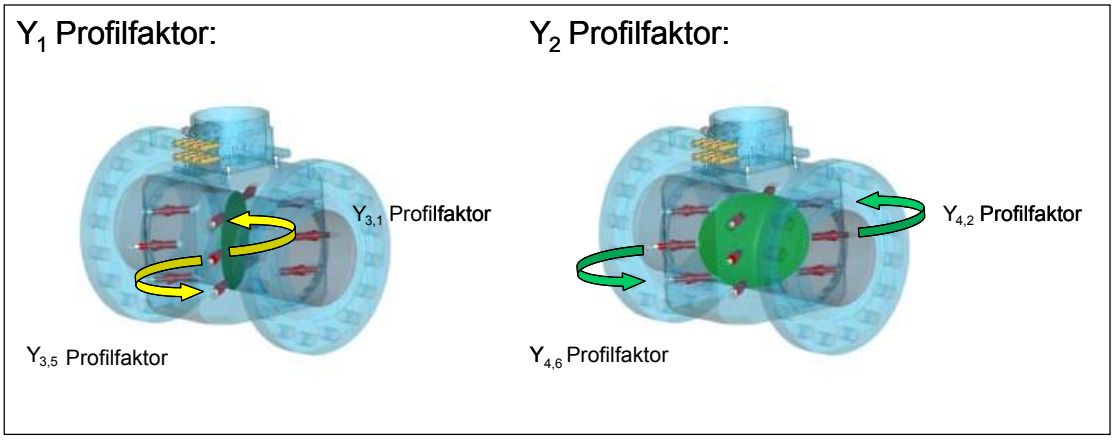


Abb. 20: Der Y-Profilfaktor und seine beiden Unterfaktoren: Y_1 und Y_2

Aus Abb. 20 geht außerdem hervor, dass ohne gekreuzte Pfade in einer Ebene keine Y–Profilfaktoren abgeleitet werden könnten. Die Y–Profilfaktoren zeigen den Drall im Strömungsprofil an (s. Abb. 21). Hier ist der Bereich des Profilfaktors Y_2 dargestellt. Ist im Strom Drall vorhanden, werden die Bereiche mit +/- für höhere bzw. niedrigere Gasgeschwindigkeiten bezeichnet.

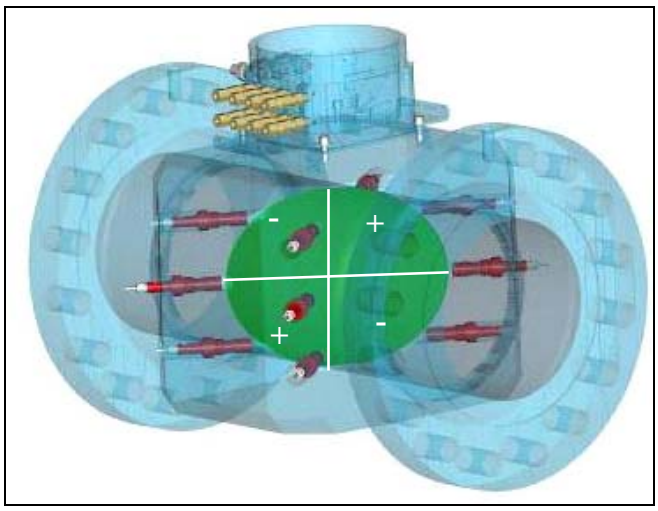


Abb. 21: Veränderung des Profilfaktors Y_2 bei Drall im Strömungsprofil

Diese Art der Darstellung ist etwas theoretisch. Es stellt sich die Frage, wie dies bei der täglichen Arbeit hilft, also beim Messen. Nehmen wir an, dass im Mess-Skid seit Jahren ein Ultraschallgaszähler installiert ist, der rund um die Uhr läuft. Während dieser langen Betriebszeit verändert sich die Innenfläche des Geräts durch die Ablagerung von Schmutz

und Flüssigkeiten, seine Rauhigkeit durch Rost. Abb. 22 zeigt ein hübsches Standardprofil einer turbulenten Strömung, das kurz nach der Inbetriebnahme entstanden sein könnte. Abb. 23 stellt grafisch dar, was über die Jahre mit der Innenfläche geschehen kann. Dies ist übrigens auch ein sehr anschauliches Beispiel, welche Probleme Ultraschallzähler mit V-Pfad-Konfiguration (Reflektion der Ultraschallimpulse) nach Jahren des Betriebs bekommen können und weshalb sie hinsichtlich der Gasgeschwindigkeit Beschränkungen unterliegen. Wie wirken sich diese Veränderungen auf das Strömungsprofil aus? Die Antwort wird in Abb. 24 sehr farbig illustriert. Im Vergleich zum Idealmodell werden die Gasgeschwindigkeitsvektoren der äußeren Ebenen verlangsamt, die der Mittelebene dagegen beschleunigt. Dies spiegelt sich auch in den Profilfaktoren X_1 und X_2, die sich erhöhen.

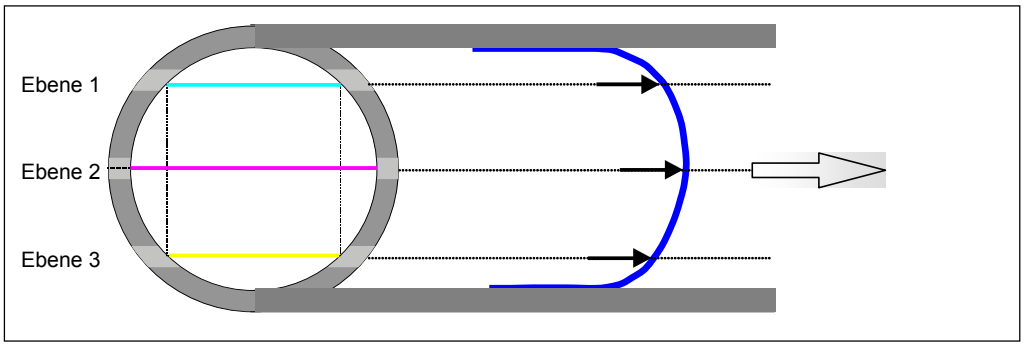


Abb. 22: Standardprofil einer turbulenten Strömung

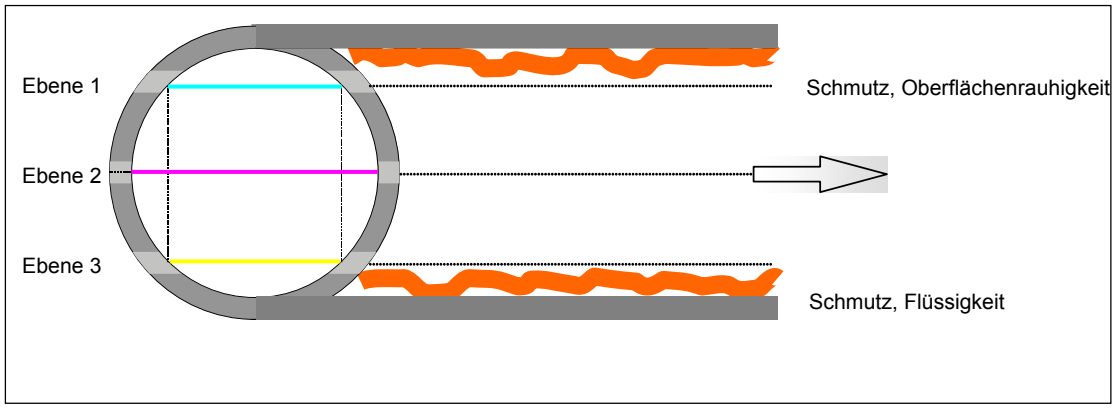


Abb. 23: Innenfläche des Zählers oder auch des gesamten Rohrs verändert sich im Laufe der Zeit durch Schmutzablagerungen oder (unten) Flüssigkeiten

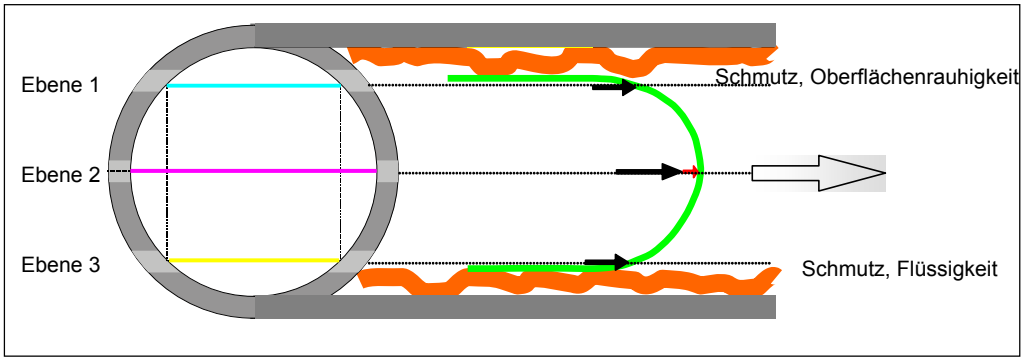


Abb. 24: Hier wird demonstriert, wie sich das Strömungsprofil ändert - und damit auch der X-Profilfaktor

Wie schon ausgeführt, können die Profilfaktoren verfolgt und online (also live) angezeigt werden. Deshalb kann der USZ 08 solche Störungen - standardmäßig - online erkennen. Bei einem Vorfall, der sich kürzlich in einer Gasstation ereignete, wurde dies eindrucksvoll demonstriert. Der Status der Diagnose ist wie folgt:

- Vergleich der Schallgeschw. gem. AGA 10 → Ergebnis: **OK**
- Signalqualität (SRV) → Ergebnis: **OK**
- Profilfaktoren X_1/X_2 weisen signifikante Differenz auf → **WARUM?**

Was mit den Profilfaktoren X_1/X_2 los war, sehen wir in Abb. 25: aus irgendeinem Grund hatte sich Rost gebildet. Und zwar mehr im oberen Bereich als unten. Dieser Effekt spiegelte sich in den Profilfaktoren X_1/X_2 und wurde durch den USZ 08 von RMG by Honeywell deshalb auch direkt angezeigt.

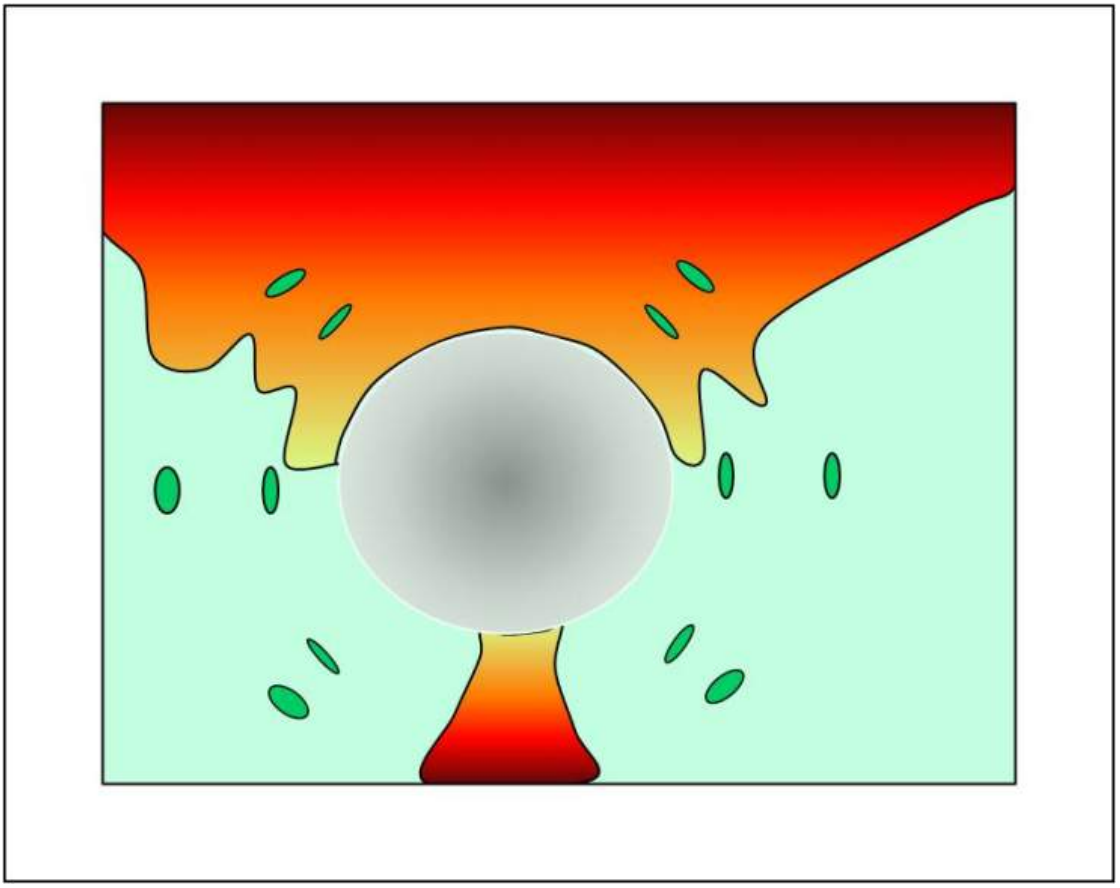
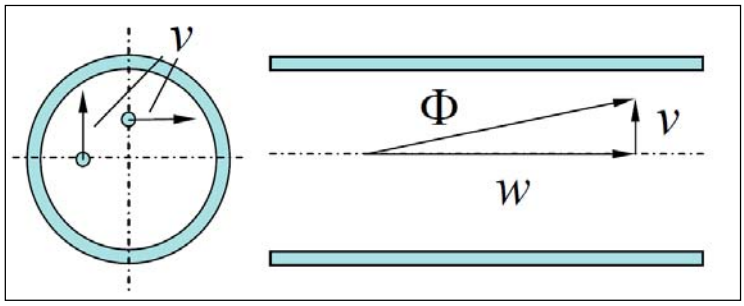


Abb. 25: Beispiel eines kontaminierten USM mit Einlaufschieber. Dieser Zustand konnte mittels X-Profilfaktoranalyse aufgespürt werden!

5.4.5. CBM – Drallwinkel

Der Drallwinkel ist die Abweichung des Gasgeschwindigkeitsvektors in axialer Richtung (Abb. 26). Die Messung des Drallwinkels wurde an anderer Stelle ausführlich erläutert. Überwacht werden kann er direkt im Online-Fenster der Software RMGView, also live und für alle drei Ebenen (Abb. 27). Unter idealen Bedingungen ist die Summe aller drei Winkel Null. Ist die Summe der Drallwinkel ≠ 0, wird das Strömungsprofil nicht hundertprozentig erfasst und der Messwert kann nach unten oder oben abweichen.



Es seien:

Φ = Drallwinkel (°)

v = Drallkomponente der Geschw. (fps oder m/s)

ω = axiale Geschw. (fps oder m/s)

Abb. 26: Grafische Darstellung des Phänomens Drallwinkel

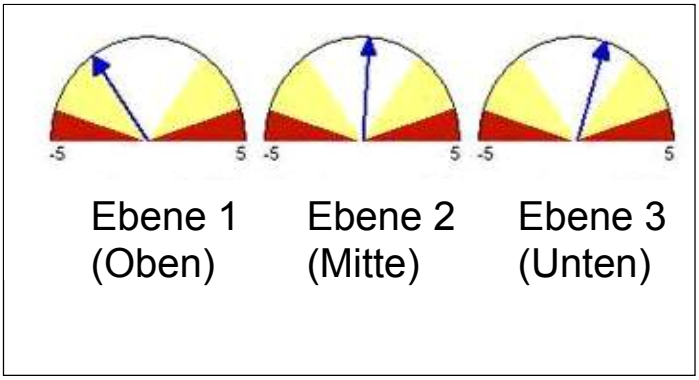


Abb. 27: RMGView zeigt den Drallwinkel für alle drei Ebenen live an

5.4.6. CBM – RMGs patentierte Präzisions-Onlinejustage [11]

Standard für das Justieren eines Ultraschallgaszählers ist bisher der Zero Flow Verification Test. Dieser wird z.B. im AGA 9 Report (6.3) beschrieben [1]. Eine solche Justierung ist notwendig, weil im System nicht nur die reinen Laufzeiten der Ultraschallimpulse eine Rolle spielen; es treten auch gewisse Verzögerungen auf, z. B. durch die Signal-verarbeitungselektronik, durch bestimmte Eigenschaften der Sensoren und durch die Berechnungsalgorithmen. Da diese nicht direkt ermittelt werden können, muss dies im Rahmen einer aufwendigen Messung erfolgen.

Ohne Strömung im Zähler wäre die Laufzeit eines Ultraschallimpulses durch die folgende Gleichung gegeben:

(Gleichung 7) $$t = L / C_{th} + t_w \quad \leftrightarrow \quad t_w = t - L / C_{th}$$

Es seien:

t = Laufzeit gegen den Strom (sec)

L = Pfadlänge (ft oder m)

C_{th} = theor. Schallgeschw. (fps oder m/s)

t_w = Verzögerung (sec)

Zur Bestimmung der Systemverzögerung t_w müssen alle anderen Messwerte der Gleichung sehr genau bekannt sein. Die Laufzeit t wird mit dem Zähler direkt gemessen. Die Pfadlänge L lässt sich präzise bestimmen, jedenfalls bei allen Gaszählern mit paarweiser Sensoranordnung (d. h. kein V-Pfad; die Impulse werden nicht reflektiert). Schon schwieriger ist die Bestimmung der theor. Schallgeschw. C_{th}. Diese lässt sich mittels hoch entwickelter Algorithmen berechnen (AGA8/AGA10), wobei die Gaszusammensetzung sowie Isttemperatur und -druck berücksichtigt werden. Zur Minimierung der Messungenauigkeit wird die Verwendung eines Gases empfohlen, dessen Zusammensetzung genau bekannt ist (z. B. N_2). Druck und Temperatur müssen während der Messung konstant gehalten und

genau gemessen werden. Besonders kritisch ist die Temperaturmessung, da im Zähler geschichtete Temperaturen auftreten können.

Offensichtlich wird, dass diese Methode mehrere Fehlerquellen enthält, die zur Messungenauigkeit beitragen und diese erhöhen; **um eine echte Online-Bestimmung der Verzögerung handelt es sich hierbei nicht!**

Der Ultraschallgaszähler USZ 08 von RMG by Honeywell und seine Elektronik USE 09 ermöglichen die hochpräzise Justierung der Verzögerung mittels einer neuen Methode, die alle beschriebenen Unsicherheiten der alten Methode vermeidet. Bei dieser Methode müssen pro Durchgang zwei Messungen vorgenommen werden:

- Signallaufzeit zwischen S_1 und S_2: t_1 (direkte Messung – Abb. 28)
- Erstes Echo am Empfangssensor: t_2 (Reflektionsmessung – Abb. 29)

Die zugrunde liegenden Gleichungen sind wie folgt:

(Gleichung 8) $C_1 = L/(t_1 - t_w)$

(Gleichung 9) $C_2 = 3 * L/(t_2 - t_w)$ $C_1 = C_2$ = konst. (kurzzeitig)

Zusammenfassung der Gleichungen 8 und 9 und Auflösung nach t_w:

(Gleichung 10) $t_w = (3 * t_1 - t_2)/2$

Es seien:

$t_{1,2}$ = Signallaufzeit (sec)

L = Pfadlänge (ft oder m)

$C_{1,2}$ = Schallgeschw. (fps oder m/s)

t_w = Verzögerung (sec)

Statt der Laufzeit t_1, also der direkten Distanz zwischen Sender und Empfänger, wird die Laufzeit t_2 gemessen, also das erste Echo nach Reflektion am Empfänger und Sender. In Abb. 29 wird klar, dass die Pfadlänge in diesem Fall verdreifacht wird. Beide Messungen liefern einen Messwert für die Schallgeschw. (C_1 und C_2). Aus diesen Messungen lässt sich die Verzögerung ermitteln, und zwar genau, Messung für Messung! Das heißt **LIVE!**

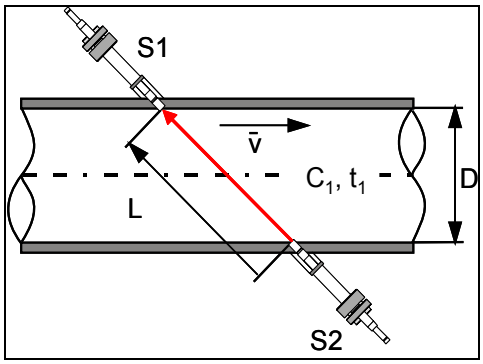


Abb. 28: Direkte Messung des Signals im USM

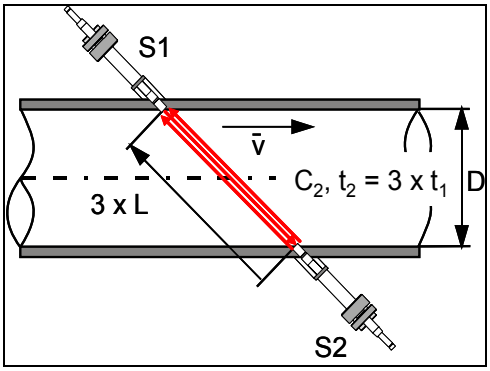


Abb. 29: Reflektionsmessung (Messung des Echos)

Die entscheidenden Vorteile der neuen Methode:

- Die Zusammensetzung des Gases im Zähler muss nicht bekannt sein.
- Die Messung erfolgt unabhängig von der theor. Schallgeschw.
- Da die absolute Schallgeschw. nicht gebraucht wird, müssen auch Druck + Temp. nicht gemessen werden.
- Die Justierung kann jederzeit erfolgen.
- Die Ermittlung der Verzögerung erfolgt automatisch.
- Höhere Genauigkeit bei der Ermittlung der Schallgeschw.
- Online-Überwachung der Veränderungen an den Sensoren.
- Temperatur, Druck, Feuchtigkeit, Abnutzung der Sensoren und Elektronik haben keinen Einfluss auf das Kalibrierungsergebnis.
- Die Überprüfung des Zählers kann auch direkt vor Ort, unter Betriebsbedingungen erfolgen!

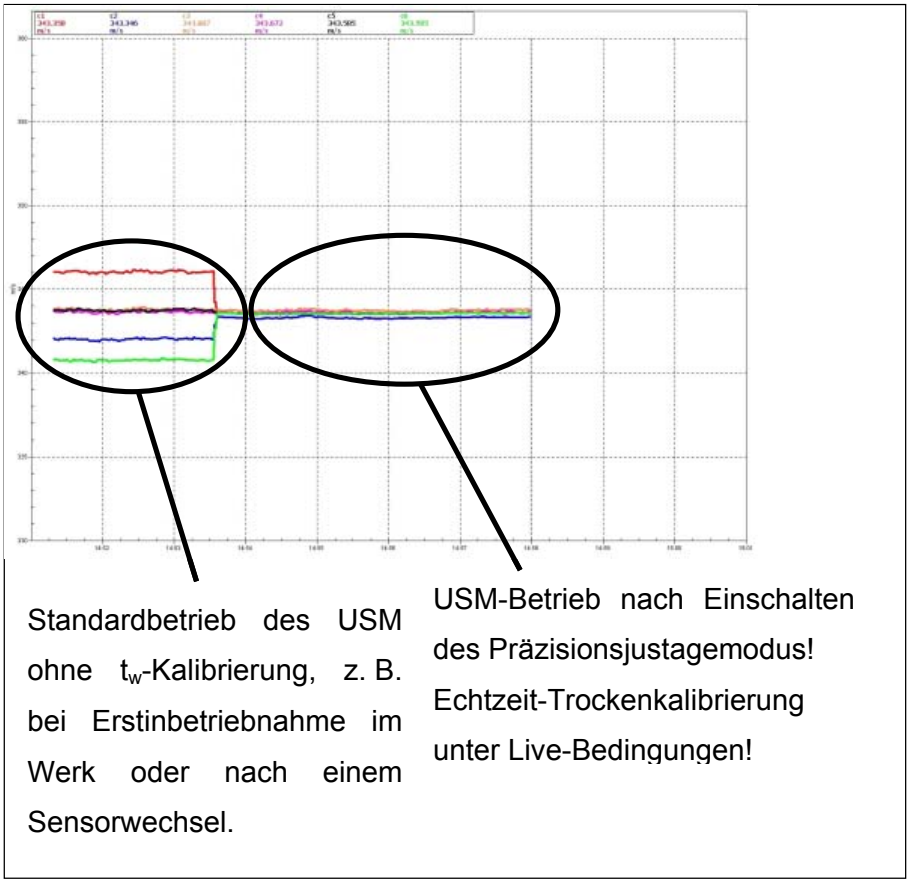


Abb. 30: Ergebnis der Präzisions-Onlinejustage nach RMG by Honeywell

Abb. 30 zeigt sehr eindrucksvoll, welche Verbesserung die Live-Trockenkalibrierung im Vergleich zur Standardmethode ohne Echomessungen darstellt. Wie erläutert, liefern die Echomessungen sehr viel genauere Werte für die Schallgeschwindigkeit, und damit wird auch die Ermittlung der Laufzeit sehr viel genauer. Und damit ist auch die Strömungsmessung dieses Zählertyps insgesamt genauer, als bei konventionellen Zählern ohne Echomessung.

6. Fazit und Ausblick

Ultraschallgaszähler sind heutzutage allgemein akzeptierte Geräte für die eichamtliche Messung von Gasströmen, da sie im Vergleich zu anderen Techniken (z. B. Turbinenrad- und Wirbelgaszähler) zahlreiche technische Vorteile aufweisen. Hilfreich bei der Etablierung der Ultraschalltechnik war sicher auch die Verfügbarkeit einer ISO-Norm [2] seit 2010.Schon heute sind Ultraschallgaszähler aufgrund ihrer Zuverlässigkeit und Messbereichskapazität in überwältigender Weise die Technik der Wahl für große Gasmessstationen. Da jedes Jahr mehr Geräte verkauft werden, geraten die Preise unter Druck, sodass sich die Technologie auch für kleinere Rohrweiten etablieren wird (< DN 100 (4”)), nämlich für das Verteilungsnetz und die nachgeschalteten Anwendungen. Hierfür müssen die Installationsanforderungen für Ultraschallgaszähler vereinfacht werden, aber das wird im Rahmen weiterer Verbesserungen

schon in Kürze geschehen. Ein weiterer Grund für den aktuellen Erfolg der Technologie (der sich mit Sicherheit fortsetzen wird), sind die einfachen Diagnosefunktionen für die Validierung der Zählerintegrität direkt vor Ort, z. B. die patentierte Präzisions-Onlinejustage von RMG by Honeywell und Diagnoseverfahren, die auf dem Vergleich der Schallgeschwindigkeit beruhen etc. Hier werden die nächsten Jahre weitere Fortschritte bringen und die Installation, den Betrieb und die Validierung des Ultraschallgaszählers für den Nutzer weiter vereinfachen. Ganz klar existiert auch ein Trend in Richtung größerer Rohrweiten > DN 1000 (40”). Hier stellt sich schon die nächste Herausforderung, denn in der ganzen Welt gibt es keinen Prüfstand für solche Anlagen! Heutzutage besteht die Herausforderung nicht mehr darin, in kurzer Zeit Ultraschallgaszähler herzustellen. sondern ein Zeitfenster für die Hochdruckkalibrierung auf einem Prüfstand zu bekommen ...

7. Literatur

[1] AGA Report No. 9, “Measurement of Gas by Multipath Ultrasonic Meters”, American Gas Association, 2. Auflage, 2007, 113 Seiten

[2] ISO / FDIS 17089-1, Internationale Norm “Measurement of fluid flow in closed conduits -Ultrasonic meters for gas Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement, International Organization for Standardization, 2010, 100 Seiten

[3] Bauartzulassung für den Ultraschallgaszähler USZ08, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, 7.241 / 01.04

[4] MID-Bauartzulassung für den Ultraschallgaszähler USZ08, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, DE-09-MI002-PTB003

[5] Brief “Bestätigung Strömungstests“, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, 2010

[6] Technische Mindestanforderung G13, „Einbau und Betrieb von Turbinenradgaszählern“, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), 2005

[7] OIML R 137-1, “Gas meters Part 1: Requirements”, International Recommendation International Organization of Legal Metrology, Ausgabe 2006, 40 Seiten

[8] Hans-Jürgen Kastner, Andreas Weber und Jörn Weber, “6-path ultrasonic gasmeters - Redundant, high-precision measurements without pressure drop”, GWF 2006

[9] James W. Bowen, Achim Zajc, “Natural Gas Metering with Ultrasound – A New Dimension of Metering”, GWF International, Ausgabe 2009, 14-21

[10] AGA Report Nr. 10, “Speed of Sound in Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Gases**”,** American Gas Association, 2003, 177 Seiten

[11] Deutsches Patent Nr. DE 10 2008 026 620 A1 2009.12.10. “Verfahren zur Kalibrierung eines Ultraschall-Durchflussmessers”, RMG Messtechnik, 2009, 5 Seiten