

**Vier Rohre messen besser als zwei – die Einführung des weltweit ersten kommerziell erhältlichen 4-Rohr-Coriolis-Massedurchflussmessgeräts**

Michael Nuber, E+H Flowtec AG, Kägenstr. 7, CH-4153 Reinach, Schweiz  
++41 61 715 7053, michael.nuber@flowtec.endress.com

Dr. Christof Huber, E+H Flowtec AG, Kägenstr. 7, CH-4153 Reinach, Schweiz  
++41 61 715 6895, christof.huber@flowtec.endress.com

Dr. Martin Anklin, E+H Flowtec AG, Kägenstr. 7, CH-4153 Reinach, Schweiz  
++41 61 715 6603, martin.anklin@flowtec.endress.com

Marcel Braun, E+H Flowtec AG, Kägenstr. 7, CH-4153 Reinach, Schweiz  
++41 61 715 6967, marcel.braun@flowtec.endress.com

**Abstract**

The introduction of the Coriolis mass flow measuring principle was a milestone in instrumentation. It not only allowed for the most accurate direct mass flow measurement in situ, but also introduced the possibility to measure density at the same time. Thus enabling customers in a variety of industries for most convenient metering even in challenging applications, where other measurement principles reached their limits.

However up to now the Coriolis measurement principle reached its limits when it came to measuring bigger lines sizes of 14 or 16 inches. The geometrical designs of the meters on the market seemed to have reached a natural barrier. Stepping ahead, so the unanimous statement, was restricted due to the huge dimensions and the mass of material needed.

Alas, gaining the lowest error of measurement possible is even more important the higher the Masses flowing through the pipelines are. The need to apply the highest precision in measurement to hydrocarbons was obvious.

The paper presents the world's first commercial Coriolis mass flow meter with 4 tubes. The working principle is explained and the geometrical and physical advantages of the 4-tube design compared to existing 2-tube designs are highlighted. Golden rules for constructions are given and the effects on the stability of measurement explained. The outstanding measuring performance and the general advantages of the new design are proven on the basis of measuring data performed with water and different crude oils.

The paper also reflects on the mechanical construction of Coriolis mass flow meters in general and highlights the importance of a sophisticated mechanical concept.

## Einführung

Seit Ende der 1970er Jahre befindet sich die direkte Massedurchflussmessung nach dem Coriolis Prinzip auf dem Erfolgsweg. [1] Schnell wussten die Anwender in allen möglichen Industrien und Anwendungsbereichen die zahlreichen Vorteile dieses Messprinzips zu schätzen. Sie kamen durch Nutzung dieses Prinzips nicht nur in den Genuss der geringsten Messunsicherheit und höchsten Zuverlässigkeit, sondern konnten im gleichen Zug die Abhängigkeit der Messung von Temperatur- und Druckeinflüssen verringern. Ebenso war nun erstmals gleichzeitige Dichtemessung oder sogar in-situ Viskositätsmessung mit nur einem Instrument möglich. [2]

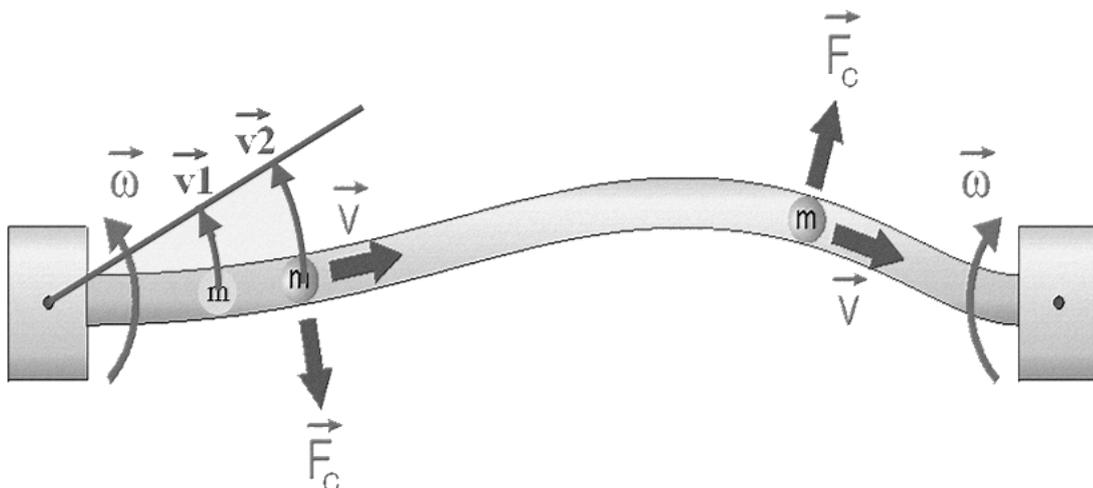
Darüber hinaus erwies sich das Coriolis Massedurchflussmessprinzip rasch als deutlich robuster gegenüber externen Einflüssen wie etwa Rohrleitungsvibrationen und machte Ein- und Auslaufstrecken oder Strömungsgleichrichter überflüssig. Hochgenaue Durchflussmessungen waren nun selbst bei kritischen Anwendungen oder bei eingeschränkten Platzverhältnissen möglich.

Während einige Industrien, wie etwa die pharmazeutische, chemische oder petro-chemische, sehr schnell die Vorteile des Coriolis Massedurchflussmessprinzips erkannten und für sich nutzten, blieben andere, wie etwa die Öl- und Gas-Industrie zurückhaltend und investierten weiterhin in konventionelle Messtechnik. Dies lag sicherlich zum Teil an nicht-technischen Gründen, wie zum Beispiel gesetzliche Vorgaben oder Gewohnheiten, aber zum anderen Teil auch daran, dass besonders Ende der 1970er Jahre, zu Beginn der industriellen Messtechnik nach dem Coriolis Prinzip nur kleine Nennweiten verfügbar waren, da die Technologie noch in den Kinderschuhen steckte. Auch die Auswahl an geeigneten Materialien war nicht immer für die rauen Anforderungen geeignet, die die Öl- und Gas-Industrie stellte.

Dennoch sind die jährlichen Zuwächse von Coriolis Geräten stetig angestiegen. Bis vor kurzem waren Nenndurchmesser über DN300 immer noch anderen Prinzipien, wie etwa Ultraschall, druckbasierten oder Turbinen, überlassen. Kommerziell erhältliche Coriolis Geräte, so schien es zumindest, scheiterten an einer natürlichen Grenze nach oben. Mit Einführung des weltweit ersten 4-Rohr Coriolis Massedurchflussmessers, der die Möglichkeit eröffnet, in Rohrleitungen bis DN400 zu messen, wurde diese Grenze nun durchbrochen.

## Technischer Hintergrund

In einem Coriolis Massedurchflussmesser wird das Messrohr mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  in Schwingung gebracht. Die Kombination dieser Schwingung und der Bewegung der Flüssigkeit durch das Messrohr führt zu einer zusätzlichen Kraft auf das Messrohr, die so genannte Corioliskraft. Abb. 1 zeigt eine vereinfachte Sicht in einen Coriolis Massedurchflussmesser mit einem Messrohr.



**Abbildung 1:** Das Messrohr wird in Schwingung mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  (omega) gebracht. Die Kombination dieser Schwingung und der Bewegung der Flüssigkeit durch das Rohr führt zu einer zusätzlichen Kraft  $F_C$  auf das Messrohr.

Betrachtet man den Einlass (linke Seite) des Messrohres, so ist folgendes zu sehen: in dem Moment, in dem das Messrohr sich nach oben bewegt, hat das Masseteilchen  $m$  eine Schwingungsgeschwindigkeit  $v_1$ . Da sich das Teilchen einen Schritt weiter in die Röhre bewegt, muss es auf eine höhere Schwingungsgeschwindigkeit  $v_2$  beschleunigt werden, um seine Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  zu erhalten. Wegen der Trägheit des Teilchens, drückt es gegen die Messrohrwand beim Beschleunigungsvorgang. Der Druck gegen die Rohrwand ist nach unten gerichtet und verlangsamt daher die Röhre in ihrer Bewegung.

Richtet man den Blick nun auf den Ausgang (rechte Seite) des Messrohres, so geschieht dort folgendes: das Masseteilchen  $m$  hat eine Schwingungsgeschwindigkeit  $v_1$ . Um die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  zu halten während es sich noch einen Schritt weiter die Röhre hinunter bewegt, muss es verlangsamt werden auf die Schwingungsgeschwindigkeit  $v_2$ . Aufgrund der Trägheit des Masseteilchens drückt es erneut gegen die Messrohrwand während es in seiner Geschwindigkeit gebremst wird. Der Druck gegen die Rohrwand erfolgt nach oben und beschleunigt so die Rohrbewegung. Die Coriolis-Kraft ist direkt proportional zur Masse und der Strömungsgeschwindigkeit des Masseteilchens und damit zum Massenstrom durch das Rohr.

Die asymmetrische Coriolis-Kraft bewirkt eine Phasenverschiebung der Rohrbewegung zwischen dem Einlass und dem Auslass. Diese Phasenverschiebung ist direkt proportional zur Coriolis-Kraft und somit ebenso zum Massenstrom durch das Rohr. Die Phasenverschiebung kann mit Hilfe von zwei Sensoren, einer am Eingang und der andere am Auslass des Messrohres, erfasst werden.

Aus Gründen der Vereinfachung wurde das Beispiel einer 1-Rohr-Konstruktion verwendet. Das Coriolis-Messprinzip arbeitet mit jedem einzelnen, geraden Messrohr. Aber mit nur einem Messrohr (und ohne intelligentes Kompensationssystem), ist das System empfindlicher gegen äußere Einwirkungen, wie z.B. Vibration. Deshalb ist das am häufigsten verwendete Design eine 2-Rohr-Konstruktion: zwei Messrohre nebeneinander, Aufteilung des Masseflusses in zwei Ströme und Messung der relativen Bewegung zwischen den beiden Messrohren. Diese werden dann in die entgegengesetzte Richtung in Schwingung versetzt. Damit kann die Balance des Messsystems in einer viel "natürlicheren" Weise erfolgen: eine Röhre bewegt sich zur einen Seite, die andere Röhre kompensiert dies durch Bewegung in die entgegengesetzte Richtung.

Dies bedeutet, dass die Kräfte am Anfang und am Ende der Messrohre sich intrinsisch gegenseitig stabilisieren. Die inneren Vibrationen des Messapparats sind also vollkommen entkoppelt vom Gehäuse und der Außenseite des Geräts. Daher erfolgt auch keine Einkopplung externer Störungen auf den Messapparat im Inneren.

Um noch größere Unabhängigkeit von externen Vibrationen zu erreichen, setzen einige Anbieter höhere Schwingungsfrequenzen der Messrohre (typischerweise um 300 bis 900 Hz) ein. Man muss sich jedoch vor Augen halten, dass die Schwingungsfrequenzen nicht frei gewählt werden, sondern das mechanische System die Resonanzfrequenzen (auch Eigenfrequenz oder "natürliche" Frequenz genannt) verwendet. Resonanz bedeutet, vereinfacht ausgedrückt, das Bestreben eines mechanischen Systems bei einigen Frequenzen, den Resonanzfrequenzen, mit einer höheren Amplitude zu als bei anderen Frequenzen zu schwingen. In Resonanz wird nur minimale Energie benötigt, um eine konstante Schwingungsamplitude aufrecht zu halten. Es ist die Geometrie des Messrohres, die die Resonanzfrequenz bestimmt. Aus diesem Grund nutzten frühe Entwürfe von Coriolis Massedurchflussmessern lange Messrohre, um auf niedrigere Resonanzfrequenzen zu kommen (in der Regel zwischen 50 und 150 Hz), die noch von der analogen und diskreten Elektronik jener Zeit verarbeitet werden konnte bei gleichzeitigem Erreichen eines noch akzeptablen Signal-Rausch-Verhältnisses (Verhältnis zwischen Nutzsignal und Rauschsignal).

In diesen unteren Frequenzbereichen finden sich leider Störungen, die durch Rohrleitungs-Schwingungen, Pumpen oder Kompressoren verursacht werden, ebenso wieder, wie andere Störfrequenzen. Sobald die Frequenz, die durch die externen Effekte induziert wird, nahe genug an der vom Coriolis-Messgerät als Arbeitsfrequenz genutzten liegt, kann es zu falschen Messergebnissen kommen.

Um zumindest eine Art von Kompaktheit zu erhalten, wurden die verwendeten, langen Messrohre in der Regel stark gebogen, um sie in eine Form zu bringen, die zwar nicht so lang war, aber doch deutlich aus der Mittellinie der Verrohrung herausragte. Dadurch wurde der Effekt der externen Vibrationen verschlechtert, weil das heraus ragende Gehäuse quasi als Biegebalken Rohrschwingungen verstärkt zum Messapparat leitete. Es waren daher Vorkehrungen notwendig, um diese Effekte zu minimieren, zum Beispiel durch den Bau von Betonfundamenten oder Ändern der Rohrleitungen.

Da Anwendungen der Öl- und Gasindustrie sich in der Regel nicht in kontrollierten Umgebungen befinden, wie beispielsweise in der Pharmaindustrie üblich, erfolgt die Messung meist unter härtesten Bedingungen und mit sehr beengten Platzverhältnissen (Off-Shore-Plattformen). Die o.g. Effekte trafen die Coriolis-Messgeräte daher härter als in anderen Branchen. Vielleicht war es deswegen, dass das Coriolis-Messprinzip in Öl und Gas länger als in anderen Industrien brauchte, um sich zu etablieren.

Mit dem Fortschritt in der Entwicklung der Elektronik in den 1990er Jahren und modernen integrierten Schaltungen, konnten inzwischen allerdings die Vorteile kompakter und nur leicht gebogener Messrohre voll ausgenutzt werden. Endlich standen Messgeräte zur Verfügung, die ohne weiteres in vorhandene Rohrleitungen passten, ohne Betonfundamente auskamen oder sonstige Voraussetzungen erfüllen mussten. Ein weiterer Vorteil einer kompakten Bauweise ist die höhere Resonanzfrequenz der Geräte. Die Arbeitsfrequenz wird damit aus dem Bereich der Bandbreite geschoben, in der die störenden äußeren Einflüsse auftreten.

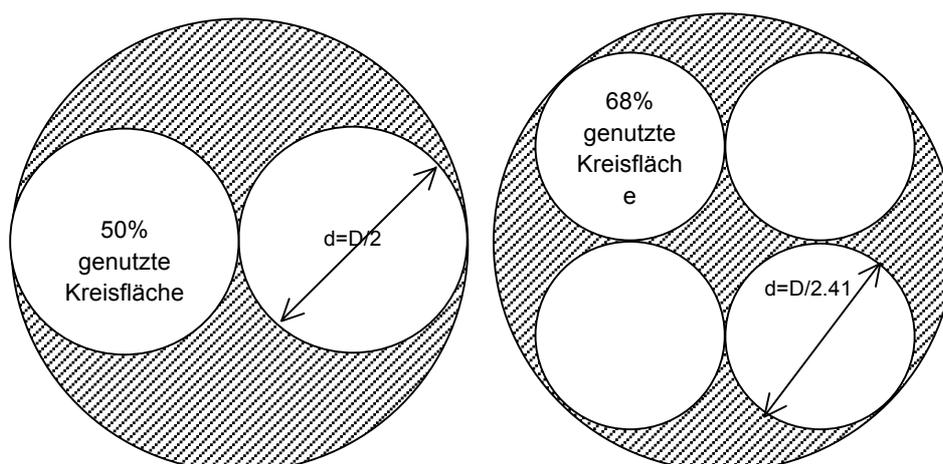
Durchflussmesser werden in Rohrleitungen sehr oft unter nicht idealen Bedingungen installiert. Temperatur, Druck, Dichte, Viskosität, Vibrationen, Schwingungen, mechanische Beanspruchung auf die Rohrleitung etc. unterliegen steten Änderungen.

Um in vollem Umfang alle Vorteile zu nutzen, d.h. Kompaktheit sowie gleichzeitig Robustheit gegen äußere Einflüsse, entwickelte Endress + Hauser Flowtec AG die Promass F Serie mit zwei leicht gebogenen Messrohren. [1, 3] Bis 2011 stellte dies den Stand der Technik in Coriolis-Durchflussmessung dar. Im Mai 2011 führte die Endress + Hauser Flowtec AG den weltweit ersten kommerziellen Coriolis-Massendurchflussmesser mit vier Rohren vor. Analog zu modernen Verbrennungsmotoren, die von der Zweiventil- auf die Vierventil-Technik wechselten, stellen die vier Öffnungen im Durchmesser der Rohrleitung einen Meilenstein der Coriolis-Massendurchflussmesser-Entwicklung dar.

### Messrohr-Geometrie

Wie bereits erwähnt, schien die Coriolis-Technologie eine natürliche Grenze im Ausbau zu größeren Nennweiten gefunden zu haben. Die Messrohre in ihren Querschnitten weiterhin wachsen zu lassen, hätte zu sehr sperrigen Geräten geführt, die nur schwer zu handhaben, geschweige denn auf einer Bohr-Plattform zu installieren gewesen wären. Der Platzbedarf und das hohe Gewicht hätten weitere Einsätze stark erschwert, wenn nicht sogar von vornherein unmöglich gemacht.

Die Lösung ist eigentlich ganz einfach: die Erhöhung der genutzten Kreisfläche durch den Einsatz von vier statt zwei Messrohren. Wie durch eine einfache Betrachtung der Geometrie nachgewiesen werden kann, wird der Rohrdurchmesser um etwa 20% reduziert, während sich die nutzbare Messrohrfläche von 50% auf 68% erhöht, wie in Abb. 2 dargestellt.



**Abbildung 2:** Verwendung der Kreisfläche einer Zweirohr- und einer Vierrohr-Konstruktion. Der Durchmesser des Kreises,  $D$ , kann mit zwei kleineren Kreisen  $d = D / 2$  oder mit vier Kreisen  $d = D/2.41$  gefüllt werden. Bei Verwendung von vier Messrohren erhöht sich die genutzte Fläche von 50% auf 68%.

Darüber hinaus gibt es weitere positive Effekte durch die Verwendung von vier kleineren Messrohren anstelle von zwei größeren.

Der erste Effekt lässt sich durch Barlows-Formel erklären (1), die den inneren Druck  $p$  dem ein Rohr widerstehen kann zu seinen Abmessungen (Durchmesser  $D$  und Wandstärke  $s$ ) und den Kräften  $\sigma$  des Materials ins Verhältnis setzt. Es kann gezeigt werden, dass weniger Wandstärke erforderlich ist, um die gebotene Druckfestigkeit zu erreichen.

$$\sigma = \frac{pD}{2s} \Rightarrow s = \frac{pD}{2\sigma} \quad (1)$$

Ein weiterer Vorteil ist die höhere Empfindlichkeit eines kleineren Rohres durch eine geringere Biegesteifigkeit wie in den folgenden Berechnungen gezeigt wird. Aus der Balkentheorie kann die Ablenkung  $w$  eines Rohrs unter einer Last  $F$  abgeleitet werden. In Gleichung (2) wird die dynamische Federkonstante  $k$  ( $=F/w$ ) eines Rohrs als Funktion des Durchmessers und der Länge  $L$  angegeben.

$$k \propto \frac{EI}{L^3} = \frac{ED^3s}{L^3} \quad (2)$$

Die Resonanzfrequenz des vibrierenden Rohrs ist proportional zur Quadratwurzel der dynamischen Federkonstante geteilt durch die Masse  $m$ . Unter der Verwendung von Gleichung (1) und (2) finden wir die folgende Beziehung:

$$f \propto \sqrt{\frac{k}{m}} \propto \sqrt{\frac{ED^3s}{L^3} \frac{1}{\rho D \pi s L}} \propto \frac{\sqrt{DD}}{L^2} \quad (3)$$

Aus diesen Befunden kann geschlossen werden, dass es möglich ist, die Rohrlänge um etwa 10-15% zu reduzieren – unter Beibehaltung der Empfindlichkeit des Sensors. Aufgrund der reduzierten Länge der Rohre kann ein Gehäuse mit weniger Gewicht verwendet werden. Dies ist ein wesentlicher Vorteil beim Bau von Coriolis Durchflussmessgeräten für große Nennweiten.

Ein weiterer positiver Effekt von kleineren Rohren ist die verbesserte Messleistung bei der Messung von Flüssigkeiten mit eingeschlossenen Gasblasen (manchmal auch als "multiphase" oder „Mehrphasen“ bezeichnet). Um eine genaue Durchfluss- und Dichte-Messungen für Mehrphasen-Bedingungen zu erreichen, ist es wichtig, dass die Flüssigkeit der lateralen Bewegung des Messrohrs folgt.

Unter Mehrphasen-Bedingungen ist die radiale Resonanzfrequenz  $f_r$  der Flüssigkeit im Rohrquerschnitt verringert, wodurch es zu einer Entkopplung zwischen dem Rohr und der Flüssigkeit und damit zu Messfehlern kommt. [4] Dieser Effekt wird deutlich reduziert beim Einsatz von kleineren Rohrdurchmessern, da die Beziehung gilt:

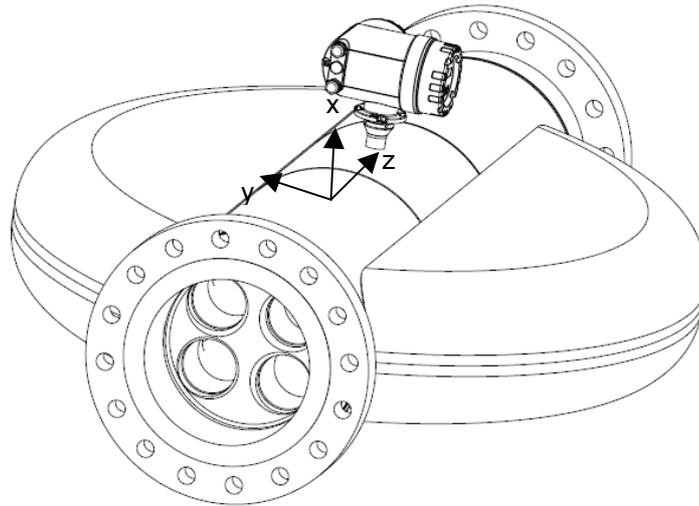
$$f_r \propto \frac{1}{D} \quad (4)$$

Man könnte nun argumentieren, dass 1-Rohr Konstruktionen noch eine bessere Nutzung der Rohrfäche böten, weil sie 100% der Fläche nutzen. Die Mängel der 1-Rohr-Technik, wie oben aufgezeigt, vor allem die Anfälligkeit für externe Effekte, machen dies allerdings unmöglich.

### Symmetrie der Konstruktion

Für alle Coriolis Masse-Durchflussmesser – gleich wie die Anzahl der Messrohre oder deren Form sein mag – ist die Symmetrie der Messvorrichtung von entscheidender Bedeutung. Jede Abweichung von der Symmetrie wird in schlechtere Genauigkeit und eine höhere Anfälligkeit für externe Effekte, wie etwa Rohrleitungsschwingungen, münden. Dieser Effekt nimmt mit der Größe der Messrohre zu, da Kräfte und Momente mit dem Rohr wachsen.

Die intelligente mechanische Konstruktion des vier-Rohr-Designs erhöht die Immunität der Messvorrichtung gegen äußere Einflüsse noch besser als die des zwei-Rohr-Designs, da sie der Ausbalancierung eine weitere Dimension hinzufügt.



**Abbildung 3:** Außenansicht des 4-Rohr Coriolis-Messgeräts "Promass X". Der Einlass mit den 4 einzelnen Messrohren wird gezeigt.

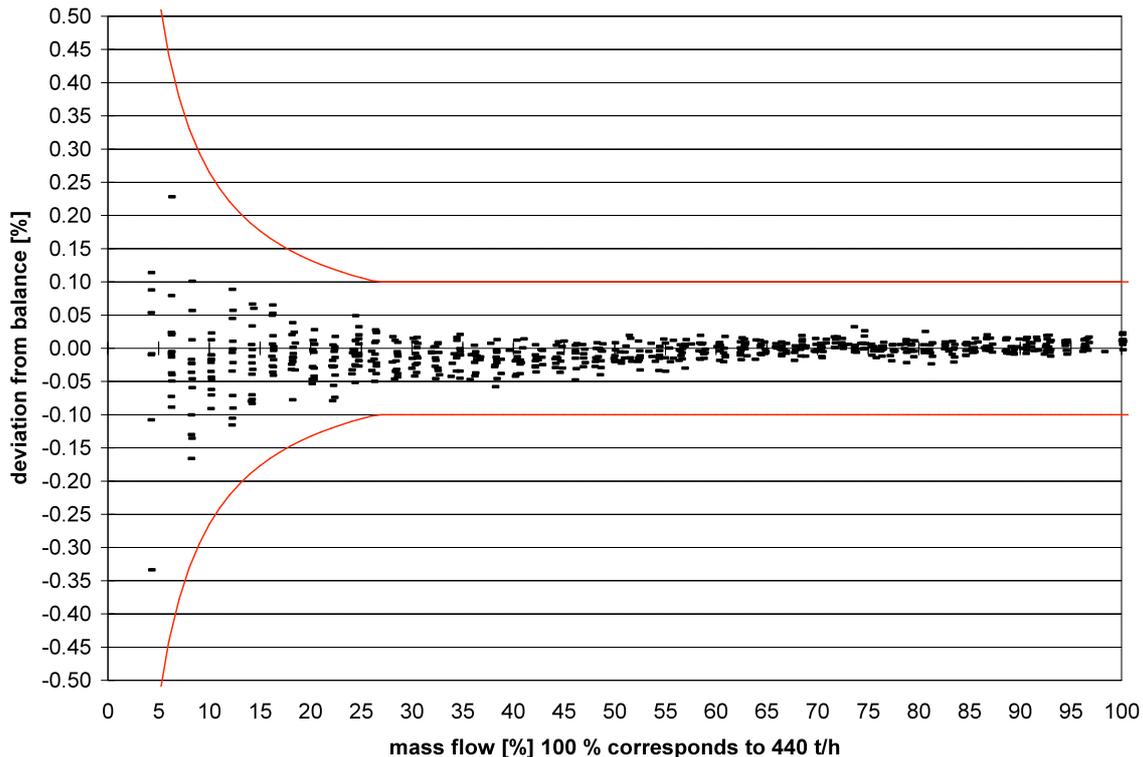
Das vorgestellte Messgerät besteht aus zwei Paaren von leicht gebogenen Rohren. Die Rohrpaare sind so ausgerichtet, dass die Kurven in entgegengesetzte Richtung weisen (siehe Abb. 3). Diese Anordnung fügt eine weitere Symmetrie-Ebene im Vergleich zu einem herkömmlichen 2-Rohr-Sensor hinzu.

Alle vier Röhren sind exakt ausbalanciert und so mechanisch gekoppelt, dass sie mit einer gemeinsamen Eigenfrequenz synchronisiert schwingen. Jedes Rohr-Paar ist mit einem Erreger und zwei elektromagnetischen Sensoren ausgestattet. Die Signale des Sensors am Einlass der beiden Rohr-Paare sind gekoppelt und addieren sich zu einem Mittelwert. Das Gleiche gilt für die Sensoren am Auslass.

Die mechanische und elektrische Symmetrie macht den Sensor unempfindlich gegen äußere Einwirkung wie Biegekräfte, Pulsationen, Vibrationen und sogar Kavitation. Dies kann auf folgende Weise erklärt werden: wird ein Messrohrpaar mechanisch dergestalt in eine Richtung gestört, dass sein Sensorsignal abweicht, so erfährt das andere Messrohrpaar eine Störung genau in die entgegengesetzte Richtung – im Endeffekt heben sich die Auswirkungen der Störungen damit auf.

### Messleistung

All dies führt zu einer beeindruckenden Messleistung des neuen 4-Rohr Coriolis. In Abb. 4 ist die Langzeit-Messung auf einer akkreditierten Kalibrieranlage dargestellt. Insgesamt wurden 687 Messpunkte aufgenommen. Hervorzuheben ist die Langzeitstabilität der Messung. Aus diesen Messungen lässt sich schließen, dass das Messgerät unter Referenzbedingungen in der Lage ist, mit einer Messunsicherheit von 0,05% v.M. zu messen und mit einer Wiederholgenauigkeit die unter 0,025% liegt.



**Abbildung 4:** Langzeit Messunsicherheit eines Promass X gemessen mit Wasser auf einem akkreditierten Kalibrier-Messtand. Die Kurven zeigen die gegebenen Fehlergrenzen ( $\pm 0,1\%$  V.M. inkl. Nullpunktstabilität). Die maximale Durchflussmenge in dieser Darstellung entspricht 440 t/h, was etwa 11% der maximalen Durchflussmenge des Geräts entspricht.

Während Referenzbedingungen geeignet sind für den Vergleich verschiedener Technologien in einem ersten Schritt, zählt am Ende doch nur Messleistung im Feld. Um die Genauigkeit des neuen Coriolis Massedurchflussmessgeräts unter realen Bedingungen zu testen, wurden Messungen bei der Société du Pipeline Sud-Européen (SPSE) durchgeführt. SPSE versorgt Raffinerien und petrochemischen Anlagen entlang einer Achse von 769 km in drei verschiedenen Ländern: Frankreich, Schweiz und Deutschland. SPSE betreibt eine Hafentladestation in Fos-sur-Mer (Frankreich), die aus 40 Tanks besteht mit einer Gesamtkapazität von 2,26 Mio. m<sup>3</sup>. [5] Hier werden etwa 20 verschiedene Sorten von Rohöl temporär gelagert.

SPSE besitzt und betreibt darüber hinaus eine akkreditierte und unabhängige zentrale Kalibrieranlage für Durchflussmessgeräte.

Die Messleistung eines DN350 4-Rohr Coriolis Massedurchflussmessers (Promass X) ist in Abb. 5 dargestellt. Fünf verschiedene Rohöle mit Viskositäten im Bereich von weniger als 1 cSt bis nahezu 300 cSt wurden gegen einen 15.000 Liter 24" ballprover gemessen. Dieser hat eine Messunsicherheit von  $<0,1\%$  v.M. und eine Wiederholgenauigkeit von 0,02%. Diese Methode folgte dem *API Manual of Petroleum Measurement Standards*. [6] Die Messungen wurden unter Prozessbedingungen durchgeführt, d.h. große Temperatur-, Viskositäts- und Druckschwankungen während der Messungen durch Sonneneinstrahlung und Reibungswärme (aufgrund des Pumpens des viskosen Rohöls).

Die Fließgeschwindigkeit wurde von 200 m<sup>3</sup>/h bis 3'300 m<sup>3</sup>/h variiert, um die Messleistung sowohl bei niedrigen Durchflussraten und niedrigen Reynoldszahlen, als auch bei sehr hohen Durchflussraten (bei denen sogar Kavitation im viskosen Medium eintrat) zu messen. Die erzielte Messungenauigkeit war geringer als 0,1% v.M. Für alle Strömungsverhältnisse war die Wiederholbarkeit des gesamten Prüfstands inklusive des Messgeräts besser als 0,025%.



## Schlussfolgerungen

Das weltweit erste kommerziell erhältliche Durchflussmessgerät nach dem Coriolis Prinzip, das vier Messrohre verwendet, wurde vorgestellt. Aufgrund seines vollständig symmetrischen Designs mit vier leicht gebogenen Messrohren ist der Sensor unempfindlich gegenüber externen Einflüssen und ermöglicht die Messung höchster Kapazitäten in der Coriolis-Durchflussmessung. Dennoch bleibt er in seinen Einbaumaßen extrem kompakt und leicht und bietet eine Messunsicherheit von 0,05% v.M.

Unabhängige Tests haben bewiesen, dass die Robustheit der Messung gegenüber bisherigen Konstruktionen für große Nennweiten deutlich verbessert wurde, was zu einer beeindruckenden Stabilität und Genauigkeit führt. Dies gilt für die Messung des Massenstrom, sowie der Dichte auch unter kritischen Bedingungen, wie sie oft bei der Messung von Kohlenwasserstoffen zu finden sind (zum Beispiel durch Gaseinschlüsse und Partikel). Hält man sich die Menge der weltweit durch Pipelines transportierten Medien und die steigenden Kosten vor Augen, so wird deutlich, wie hoch der Nutzen der Anwender durch die Verringerung der Messunsicherheit ist.

## Literatur

- [1] R. C. Baker, "Flow measurement handbook: industrial designs, operating principles, performance, and applications", Cambridge University Press 2000, Cambridge, UK
- [2] Endress+Hauser (Ed.): Flow Handbook. A Practical Guide: Measurement Technologies – Applications – Solutions, Reinach 2006, ISBN 3-9520220-4-7
- [3] M. Anklin et. al. "Coriolis mass flowmeters: Overview of the current state of the art and latest research", Flow Measurement and Instrumentation 17 (2006) 317–323, 2006
- [4] H. Zhu, Nuber, M., A. Rieder, W. Drahm, "Entrained Air, Particles And Wet Gas – Myths And Truth In Coriolis Flow Measurement", The Americas Workshop, 26 - 28 April 2011, Houston, USA
- [5] SPSE (Société du Pipeline Sud-Européen), [www.spse.fr](http://www.spse.fr)
- [6] API manual of Petroleum Measurement Standards Chapter 5 Section 6 (Measurement of Liquid Hydrocarbons by Coriolis Meters).
- [7] API manual of Petroleum Measurement Standards Chapter 11 Section 1 (Temperature and Pressure Volume Correction Factors for Generalized Crude Oils, Refined Products, and Lubricating Oils).