

Industrielle Durchflussmessung:

Coriolis-Kraft-Durchflussmessung

Projektarbeit
zu Sensortechnik I

von

Roland Steffen
3387259

rolandsteffen@gmx.de
<http://www.rolandsteffen.de>

Inhaltsverzeichnis:

Vorwort	3
Funktionsprinzip	4
Coriolis-Kräfte bei geradem Messrohr	7
Coriolis-Kraft-Durchflussmessung in der Praxis.....	8
1) Messgenauigkeit	8
2) Physikalische Grenzen	8
3) Druckschwankungen	8
4) Gasmessung	8
5) Gaseinschlüssen in Flüssigkeiten.....	8
6) Vibrationen	8
Bauformen	9
Nennweite.....	9
Messrohrwandstärke	10
Druckverlust	10
Messfehler	10
Materialien.....	11
Transmitter	11
Messwertaufnehmer	12
Quellen	13

Vorwort:

Die Aufgabe im zweiten Semester der Vorlesung Sensortechnik I war es, über ein gewähltes Thema, eine Art Marktrecherche durchzuführen. Ich habe mir, nachdem meine favorisierten Themen leider vergriffen waren, in dritter Wahl das Thema „Coriolis-Kraft-Durchflussmessung“ ausgesucht.

Dabei stellte ich schnell fest, dass es gar nicht so einfach war, über mein gewähltes Thema Informationen zu finden. Als erstes musste ich zu meinem Bedauern feststellen, dass in der Bibliothek leider keine Bücher zu dem Thema Coriolis-Kraft-Durchflussmessung vorhanden sind. Also setzte ich meine Recherche, zuerst mit mäßigem Erfolg, im Internet fort.

Dort stellte ich schnell fest, dass mit einem Coriolis-Kraft-Durchflussmesser der Massedurchfluss gemessen wird. Und fand dann auch schnell englische Begriffe, wie z. B. „flowmeter“ für Durchflussmesser oder „mass flow“ für Massedurchfluss. Jetzt fand ich auch endlich Firmen und Datenblätter für entsprechende Coriolis-Kraft-Massedurchflussmesser oder im englischen „coriolis mass flowmeters“. Aber eine ausführliche Beschreibung des Funktionsprinzips fehlte immer noch.

Diese fand ich schließlich in dem Artikel „Was den Betreiber von Massedurchflussmessern nach dem CORIOLIS-Prinzip interessiert“ der SCHWING Verfahrenstechnik GmbH von D. Stepanek. Auf diesen Artikel stützt sich auch der größte Teil meiner Ausarbeitung.

Ein Überblick über den Inhalt meiner Ausarbeitung ist dem Inhaltsverzeichnis zu entnehmen. Auf konkrete Vergleiche zwischen den einzelnen Produkten der verschiedenen Anbieter wird verzichtet. Stattdessen halte ich mich eher allgemein zum Thema Coriolis-Kraft-Durchflussmessung. Wer nähere Informationen zu Produkten sucht, findet diese in den beigefügten Datenblättern im Anhang.

Funktionsprinzip:

Ein U-förmiges Rohr rotiert mit der Winkelgeschwindigkeit ω um eine Drehachse. Dabei fließt ein Massestrom mit der Geschwindigkeit v durch das Rohr. Ein Masseteilchen, das sich radial von der Drehachse nach außen bewegt, erfährt tangential in Rotationsrichtung eine Beschleunigung. Diese Beschleunigung heißt Coriolis-Beschleunigung:

$$a_c = -2v \times \omega$$

Fließt der Massestrom auf die Drehachse zu, so wirkt die Beschleunigung in die entgegengesetzte Richtung.

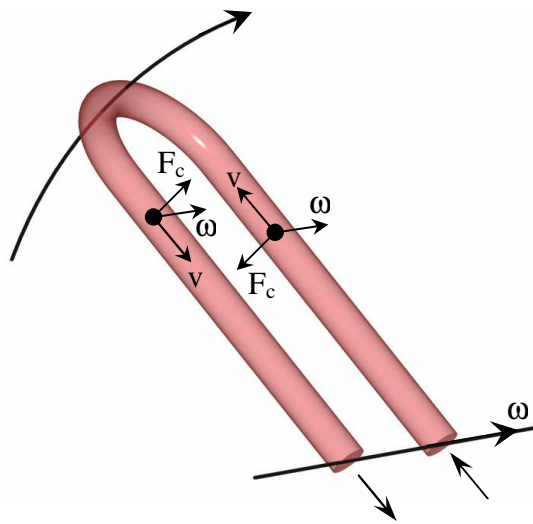


Abb. 1: Durchströmtes, rotierendes, U-förmiges Rohr. Wirkung der Coriolis-Kraft F_c auf Masseteilchen im Rohr.

Dieser Coriolis-Beschleunigung wirkt die Coriolis-Kraft entgegen:

$$F_c = 2mv \times \omega$$

Die Coriolis-Kraft F_c ist abhängig von der Masse m die sich im Messrohr mit der Geschwindigkeit v bewegt. D. h. kenne ich die Winkelgeschwindigkeit ω und die wirkende Coriolis-Kraft F_c , so kann ich direkt den Massestrom bestimmen.

In der Praxis wird die Rotation durch eine Schwingbewegung ersetzt. Dabei sind die Enden fest eingespannt und der Bogen wird elektromagnetisch zum Schwingen angeregt. Das Messrohr schwingt dabei mit seiner Eigenfrequenz, ähnlich einer Stimmgabel.

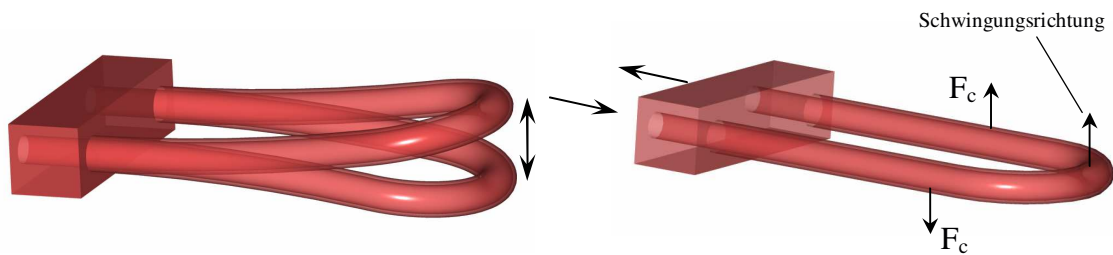


Abb. 2: Schwingendes Messrohr (links), am Messrohr wirkende Kräfte in einer Schwingungsrichtung (rechts).

Betrachtet man das System von Scheitel her, so ist zu erkennen, dass die entstehenden Coriolis-Kräfte entgegengesetzt wirken. Es entsteht ein oszillierendes Drehmoment, wodurch eine Torsion auf das Messrohr ausgeübt wird.

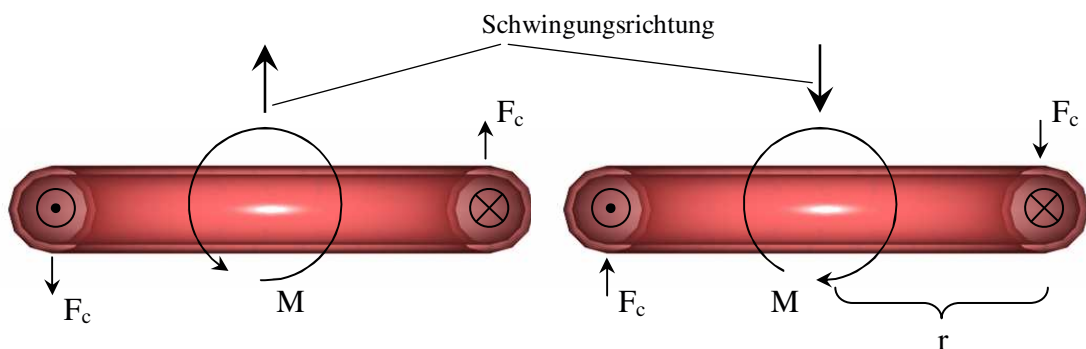


Abb. 3: Entstehendes Drehmoment in Abhängigkeit von Schwingungsrichtung.

Das oszillierende Moment kann wie folgt beschrieben werden:

$$M = 2F_c \times r = 4m(v \times \omega) \times r$$

Die Masse m im Rohr ist das Produkt aus Dichte ρ , Querschnittsfläche A und Länge l ($m = \rho \cdot A \cdot l$), die Geschwindigkeit v ergibt sich aus dem Quotient der Länge l und der Durchströmzeit t und der Massestrom Q_m entspricht der Masse m die pro Zeiteinheit t durch das Rohr fließt. Daraus ergibt sich eine neue Formel für das Moment M :

$$Q_m = \frac{m}{t} = \frac{m \cdot v}{l}$$

$$\Rightarrow M = 4 \cdot \omega \cdot r \cdot l \cdot Q_m$$

Das Drehmoment M bewirkt einen Winkelausschlag θ bzw. eine Torsion des Messrohres. Das maximale Drehmoment wirkt beim Durchgang durch die Ruhelage. Dem Ausschlag, der durch das Drehmoment verursacht wird, wirkt die Federsteifigkeit

k_s des Messrohres entgegen. Dabei gilt allgemein für das Rückstellmoment einer Torsionsfeder:

$$M_T = k_s \cdot \theta$$

Damit ergibt sich für den Massestrom Q_m folgende von der Federsteifigkeit k_s und dem Torsionswinkel θ abhängige Formel:

$$Q_m = \frac{k_s \cdot \theta}{4 \cdot \omega \cdot r \cdot l}$$

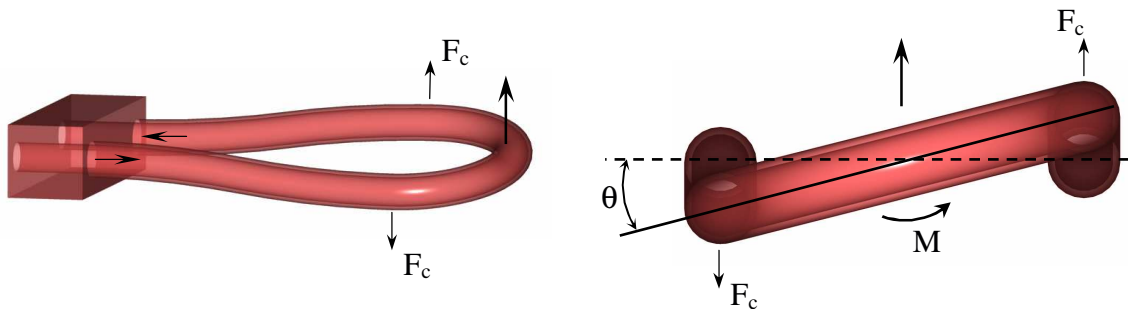


Abb. 4: Tordiertes Messrohr während Nulldurchgang.
Seitenansicht (links) und Draufsicht (rechts).

Der Torsionswinkel θ wird mit zwei magnetischen oder optischen Positionssensoren gemessen. Je einer pro Rohrschenkel. Beide Sensoren erfassen die Auslenkung aus der Ruhelage in Abhängigkeit von der Zeit t . Wenn der Massestrom im Messrohr gleich Null ist, liegen beide Signale in Phase und der Torsionswinkel ist gleich Null. Fließt ein Massestrom durch das Messrohr, so tritt eine Phasenverschiebung Δt der beiden Messsignale auf. Für kleine Torsionswinkel θ gilt dann folgende Funktion:

$$\theta = \frac{\omega \cdot l_s \cdot \Delta t}{2 \cdot r}$$

Dabei ist die Geschwindigkeit v des Messrohrs im Messpunkt gleich der Winkelgeschwindigkeit ω mal dem Abstand des Sensors von der Drehachse l_s . Der Abstand beider Sensoren ist gleich $2r$.

Für dem Massestrom Q_m erhält man durch einsetzen folgende Gleichung:

$$Q_m = \frac{k_s \cdot \omega \cdot l_s \cdot \Delta t}{8 \cdot \omega \cdot r^2 \cdot l} = \frac{k_s \cdot l_s}{8 \cdot r^2 \cdot l} \cdot \Delta t = \text{const.} \cdot \Delta t$$

Der Massestrom Q_m ist nur von der Phasenverschiebung Δt abhängig. Der Massestrom ist nicht von der Schwingfrequenz ω abhängig.

Coriolis-Kräfte bei geradem Messrohr:

Auch in einem geraden schwingenden Rohr treten Trägheitskräfte auf, die zu Bestimmung des Massestroms genutzt werden können.

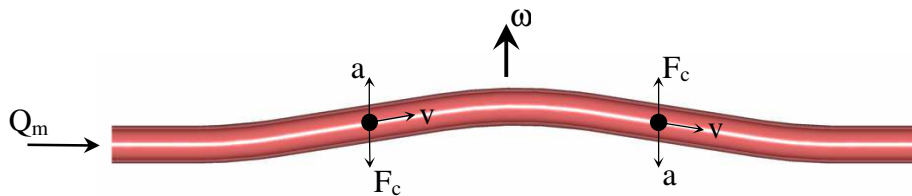


Abb. 5: Gerades schwingendes Rohr wird vom Massestrom Q_m durchströmt.

Das Rohr ist an beiden Enden fest eingespannt und biegt sich entsprechend der Abbildung in der Mitte durch. Dabei schwingt das Rohr gerade nach oben aus. Bewegt sich nun ein Masseteilchen von links auf die Mitte zu, so wird es nach oben beschleunigt, entsprechend der Bewegungsrichtung des Rohrs. Diese Beschleunigung hat eine Gegenkraft zu Folge, welche für eine zusätzliche Verbiegung des Rohrs in entgegengesetzter Richtung sorgt. Ein Masseteilchen, das von der Mitte nach rechts strömt, wird entgegen der Schwingungsrichtung beschleunigt. Die wirkende Gegenkraft verbiegt das Rohr in Schwingungsrichtung zusätzlich.

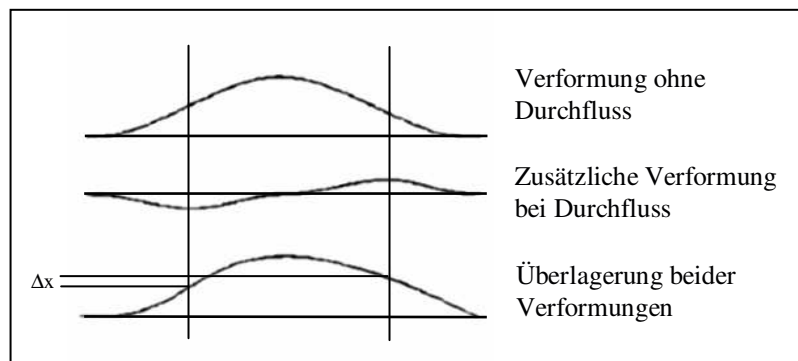


Abb. 6: Verformung eines geraden Rohres mit und ohne Massedurchfluss.

Coriolis-Kraft-Durchflussmessung in der Praxis:

1) Messgenauigkeit

Unter industriellen Umgebungsbedingungen, wie z. B. Vibrationen, Rohrverspannungen, weicht die Messgenauigkeit von den unter Laborbedingungen ermittelten Werten ab. Es treten je nach Applikation starke Abweichungen der Fehlergrenzen auf. So kann z. B. das Strömungsprofil oder ein inhomogenes Medium (z. B. Gaseinschlüsse) starken Einfluss auf die Messgenauigkeit nehmen. Auch Druckschwankungen, z. B. durch Kolbenpumpen, stören die genaue Messung.

2) Physikalische Grenzen

Die maximal zulässige mechanische Belastung des Messrohrs schränkt die Schwingbewegung ein. Dies beschränkt den Messeffekt und wirkt sich negativ auf die Störimpfindlichkeit aus. Die Messung von kompressiblen Medien (Gas oder Flüssigkeit mit Gaseinschlüssen) ist nur eingeschränkt möglich. Durch die Formgebung des Messrohrs wird die Steifigkeit erhöht.

3) Druckschwankungen

Ein unter Druck stehendes Rohr versucht sich gerade zu Biegen. (Bourdon-Effekt) Durch die entstehende Auslenkung kann die Messung beeinflusst werden. Auch kann die Schwingbewegung des Rohrs verändert werden, wenn periodische Druckschwankungen auftreten, z. B. Kolbenpumpen.

4) Gasmessung

Da der Messeffekt auf dem Beschleunigen der Masse des Medium beruht, und Gase wesentlich kompressibler sind als Flüssigkeiten, wird bei kleinen Schwingungsamplituden immer nur ein Teil des tatsächlichen Massestroms gemessen. Dies kann durch entsprechende Kalibrierung oder Justierung kompensiert werden. Die Kompressibilität hängt dabei stark von der Betriebsgasdichte ab, welche von Temperatur- und Druckschwankungen beeinflusst wird.

5) Gaseinschlüssen in Flüssigkeiten

Ein Gemisch aus Flüssigkeit und Gas bedämpft die Schwingung des Systems, was die Messung erheblich stören kann. Dabei ist die Störimpfindlichkeit umso größer, je kleiner die Energie im System ist. Die Energie nimmt mit der Masse, der Schwingungsamplitude und der Federkonstante des Systems zu. Eine Minderung der Störimpfindlichkeit kann z. B. durch dickwandigere, schwerere Messrohre erzielt werden.

6) Vibrationen

Ab einer bestimmten Vibrationsintensität wird die Messung mit dem Coriolis-Massedurchflussmesser gestört. Die Störimpfindlichkeit ist umso geringer, je kleiner das Verhältnis von Schwingungsamplitude zur Störampplitude ist.

Bauformen:

Die Bauformen sind von Hersteller zu Hersteller unterschiedlich. Dies liegt nicht nur an den unterschiedlichen Patenten, sondern hat auch funktionstechnische und praktische Gründe.

Der ideale Coriolis-Kraft-Massedurchflussaufnehmer besteht aus einem einzelnen geraden Messrohr ohne Querschnittsverengung. Durch die hohe Steifigkeit des kurzen Messrohrs wird nur eine kleine Amplitude erreicht, was eine hohe Strömungsgeschwindigkeit erfordert, um einen ausreichenden Messeffekt zu erzielen.

Die meisten Aufnehmer bestehen aus zwei parallel geführten Messrohren, deren Nennweite, aus funktionstechnischen Gründen (z. B. höhere Strömungsgeschwindigkeit), wesentlich kleiner ist als die Nennweite der Anschlüsse. Durch diese Querschnittsverengung ist ein erhöhter Druckverlust zu erwarten, da sich die freie Querschnittsfläche z. B. auf 32% verkleinert. Der Stromteiler ist im einfachsten Fall ein Metallbock mit einer Sackbohrung, in die die Hauptleitung endet und über zwei Stichbohrungen die Messleitungen abgeführt werden. Diese Bauform ist allerdings nur für dünnflüssige Medien geeignet. Strömungstechnisch günstiger ist ein Gussstück, welches den Massestrom, über eine bogenförmige Führung, allmählich den beiden Messrohren zuführt.

Die Schwingfrequenz der Messrohre liegt meisten bei deren typischer Eigenfrequenz. Die unterschiedlichen Systeme werden mit Frequenzen im Bereich von 50Hz bis 1000Hz erregt. Über die Schwingfrequenz lässt sich auch indirekt auf die Vibrationsfrequenz schließen, auf die das System empfindlich reagiert, wenn diese als Störung von außen auf das System einwirkt.

Allgemein kann man sagen, dass die Störempfindlichkeit des Messsystems abnimmt, wenn die im schwingenden System gespeicherte Energie groß ist. Dazu sind dickwandige, schwere Messrohre oder zusätzliche Schwungmassen geeignet. Auch eine große Amplitude der Schwingung ist vorteilhaft, da diese einen größeren Messeffekt liefert und stabiler gegen Störungen ist.

Nennweite:

Die Nennweite ist normalerweise der freie Rohrquerschnitt, der Durchmesser. In den Datenblättern der Hersteller bezieht sich die Nennweite meistens auf die Nennweite der Flanschanschlüsse und nicht auf die Nennweite der Messrohre. Dabei ist zu sagen, dass der gleiche Aufnehmer oft mit verschiedenen Flanschanschlüssen angeboten wird. Die Messrohre haben aber meistens einen erheblich kleineren Querschnitt, als die Systemanschlüsse. Und es ist ratsam sich über die Nennweite der Messrohre zu erkundigen, da diese wesentlich entscheidender für die Auswahl eines Aufnehmers ist. Sie entscheidet z. B. über Druckverlust und Strömungsgeschwindigkeit.

Messrohrwandstärke:

Die Wandstärke der Messrohre beeinflusst maßgeblich deren Steifigkeit bzw. Elastizität. Um eine hohe Empfindlichkeit gegenüber den wirkenden Coriolis-Kräften zu erzielen, sind dünnwandigere Messrohre besser geeignet. Allerdings sind die dünnwandigen Messrohre wesentlich empfindlicher gegen Korrosion und besitzen einen wesentlich geringeren Berstdruck.

Da die Länge der Messrohre einen ebensogroßen Einfluss auf die Empfindlichkeit hat, kann mit einer gut gewählten Messrohrgeometrie und dickwandigeren Rohren der gleiche Messeffekt erzielt werden.

Druckverlust:

Der Druckverlust ist die Druckdifferenz zwischen Einlassseite und Auslassseite des Messrohrs. Er bestimmt in Abhängigkeit von Viskosität und Rohrgeometrie die Fließgeschwindigkeit des Mediums.

Einerseits möchte man eine hohe Fließgeschwindigkeit erreichen, um einen großen Messeffekt zu bekommen. Andererseits entsteht dadurch ein hoher Druckverlust, welcher nicht erwünscht ist. Aus diesem Grund sollte ein Aufnehmer gewählt werden, dessen Messbereich dem gewünschten entspricht. Dieser sollte dann den besten Kompromiss zwischen Fließgeschwindigkeit, Druckverlust und Messeffekt bieten.

Bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten und Druckverlusten besteht die Gefahr der Kavitation, d. h. Verdampfen des Mediums. Dies sollte unbedingt vermieden werden.

Messfehler:

Meistens werden die Genauigkeiten des Messwertaufnehmers mit zwei Angaben spezifiziert. Die Erste ist die Abweichung vom momentanen Messwert in Prozent (%) und die Zweite die Nullpunktabweichung in Massedurchflusseinheiten (kg/min, g/s, ...). Daraus lässt sich leicht die erwartete Abweichung vom momentanen Messwert berechnen. Dazu gilt folgende einfache Gleichung:

$$E(\dot{m}) = \pm \frac{\frac{\dot{m}}{100} \cdot e + E_0}{\dot{m}} \cdot 100$$

$E(\dot{m})$ = erwarteter Messfehler in Abhängigkeit vom momentanen Massestrom, [$E(\dot{m})$] = %

\dot{m} = momentaner Massestrom, [\dot{m}] = kg/s

E_0 = Nullpunktabweichung, [E_0] = kg/s

e = angegebener Messfehler, [e] = %

Materialien:

Die mit dem Medium in Kontakt kommenden Teile der Coriolis-Kraftaufnehmer werden meistens aus Edelstahl gefertigt. Es werden aber auch Aufnehmer aus speziellen Materialien, wie z. B. Hastelloy C oder Tantal, angeboten. Da nicht immer alle mit dem Medium in Kontakt kommenden Teile aus dem gleichen Material hergestellt werden, sollte die Korrosionsbeständigkeit der Materialien unter den geforderten Umgebungsbedingungen geprüft werden.

Bei der Prüfung auf Korrosionsbeständigkeit ist vor allem auf die Verbindungsstellen der verschiedenen mit Medium benetzten Teile zu achten. Besonderes Augenmerk sollte auf die benetzten Hartlötstellen und Materialkombinationen aus z. B. Edelstahl und Hastelloy C oder Edelstahl und Titan gelegt werden. Hier besteht die Gefahr von galvanischer Korrosion.

Titan hat hervorragende schwingungstechnische Eigenschaften und einen extrem niedrige Temperaturexpansionskoeffizient. Während es bei oxidierenden Medien gut geeignet ist, lässt die Eignung dagegen im Bereich reduzierender Medien zu wünschen übrig. Tantal ist ein besser geeignetes Material, das einen möglichst breiten Bereich, sowohl bei oxidierendem als auch reduzierendem Medium, abdeckt. Edelstahl dagegen sollte nur mit Medien eingesetzt werden, in denen keine freien Chlor- oder andere Halogen-Ionen vorkommen.

Transmitter:

Über den Transmitter wird der Messwertaufnehmer gespeist. Im Messwertaufnehmer befindet sich eine elektromechanische Erregereinheit, die die Messrohre in Schwingung hält. Der Transmitter verarbeitet das Messsignal vom Aufnehmer und wandelt es in ein proportionales Ausgangssignal um. Für die einzelnen Messwertaufnehmer stehen i. d. R. verschiedene Transmitter mit unterschiedlichem Funktionsumfang und Gehäuseformen zu Verfügung.

Alle Geräte bieten natürlich die Möglichkeit der Massedurchflussmessung. Da das Coriolis-Messprinzip aber auch die Messung der Dichte erlaubt, kann diese auch als Ausgangssignal angeboten werden. Die Temperatur wird zu Kompensationszwecken gemessen und steht teilweise als Ausgangssignal zur Verfügung. Einige Hersteller bieten noch besondere Funktionen an, wie z. B. die Ausgabe des Volumenstroms oder der Feststoffkonzentration. Auch Chargendosierung oder PID-Regelung werden angeboten.

Als Standard steht mindestens ein analoger 4-20mA-Ausgang zur Verfügung. Darüber hinaus werden Spannungs- und Frequenz- bzw. Impulsausgänge angeboten. Die Transmitter verfügen meistens über mehrere Statusein- und -ausgänge. Auch Transmitter mit Schnittstellen und Bussystemen, wie z. B. RS232, PROFIBUS, DeviceNet oder HART-Kommunikation, gehören mittlerweile wohl zum Standard.

Manche Transmitter sind ohne Bedientastatur und ohne Anzeige ausgeführt. Die Bedienung bzw. Änderung von Parametern, kann nur mittels eines Handterminals oder über einen PC durchgeführt werden. Andere Geräte verfügen über eine Reihe analoger

und digitaler Einstellmöglichkeiten, wie z. B. Potentiometer und DIP-Schalter oder BCD-Schalter. Die wohl elegantesten Ausführungen sind mit einer mehrzeiligen Digitalanzeige ausgeführt und können über ein zwei- oder dreitastige Tastatur bedienergeführt programmiert werden.

Messwertaufnehmer:

Die Betriebsdrücke der Messrohre liegen i. a. wesentlich höher als die für die standardmäßig angebotenen Anschlussflansche. Flansche für höhere Betriebsdrücke sind jedoch erhältlich.

Für den Betrieb mit hochgefährlichen Medien, wie z. B. Gift- oder Explosivstoffe, werden Aufnehmer in druckfesten Behältern angeboten. Solche Druckbehälter sind relativ schwer, haben dementsprechend große Abmessungen und sind recht kostspielig. Eine Berstscheibe im Aufnehmergehäuse sollte bei den meisten Anwendungen für genügend Sicherheit sorgen. Für einen langen und zuverlässigen Betrieb sind dickwandige Rohe und für den Einsatzfall geeignete Materialien zu wählen.

Messwertaufnehmer sind für die Betriebstemperaturen von unter -200°C bis 400°C erhältlich. Bei solchen extremen Betriebstemperaturen sollten die Aufnehmer immer, durch Kühlen oder Heizen, auf Betriebstemperatur gehalten werden. Sonst besteht die Gefahr, dass bei starken Temperaturschwankungen z. B. die Erreger- oder Sensorspulen beschädigt werden.

Auch ist unbedingt die Kondensatbildung auf dem Messrohr zu verhindern. Die kann z. B. durch hermetisch dichte Gehäuse gewährleistet werden. Sie verhindern, dass durch den beim Abkühlen entstehende Unterdruck Luftfeuchtigkeit in das Gehäuse eindringen und auf dem Messrohr kondensieren kann.

Da normales PVC-isoliertes Kabel nur für Temperaturbereiche von 20°C bis 85°C geeignet ist, muss die Leitungsisolierung der gewünschten Betriebstemperatur entsprechend gewählt werden, z. B. teflon-isoliertes Kabel. Auch die Anschlüsse, wie Klemmen und Stecker, müssen für die jeweilige Betriebstemperatur geeignet sein. Zudem sollte die Elektrik für die Einsatzumgebung korrosionsbeständig sein und vor Beschädigungen geschützt werden.

Die Messwertaufnehmer stellen auch bestimmte Anforderungen an Einbaulage und -ort. Der Einbauort ist so zu wählen, dass Schwingungen von der Anlage möglichst nicht auf den Aufnehmer übertragen werden. Generell ist ein möglichst vibrationsarmer Einbau zu bevorzugen. Bei der Störempfindlichkeit des Aufnehmers ist dessen Betriebsfrequenz im Zusammenhang mit der Störfrequenz maßgeblich. Die Transmitter können zwar die Störfrequenzen teilweise herausfiltern aber nicht ganz unterdrücken.

Mechanische Verspannungen, die von den Prozessanschlüssen her auf den Aufnehmer einwirken, können die Messergebnisse negativ beeinflussen. Ursache für Verspannungen können, schlecht oder gar nicht abgefangene Rohrleitungen, thermische Ausdehnung bzw. Kontraktion oder schlechte Ausrichtung der Flansche sein.

Quellen:

- 1) „Was den Betreiber von Masedurchflussmessern nach dem CORIOLIS-Prinzip interessiert“ von D. Stepanek, SCHWING Verfahrenstechnik Neukirchen-Vluyn
- 2) Physik für Ingenieure – E. Hering, R. Martin, M. Stohrer – Springer-Verlag