



Verfahrenstechnik GmbH

D-47506 Neukirchen-Vluyn  
Oderstraße 7  
Telefon (0 28 45) 930 -0  
Telefax (0 28 45) 930100  
E-Mail: [schwing-nk-vl@t-online.de](mailto:schwing-nk-vl@t-online.de)

## **Was den Betreiber von Massedurchflussmessern nach dem CORIOLIS-Prinzip interessiert**

D. Stepanek, SCHWING Verfahrenstechnik Neukirchen-Vluyn

# 1. Einleitung

Massedurchflussmesser, die nach dem Coriolis-Prinzip arbeiten sind, mittlerweile im Markt weitverbreitet. Eine große Zahl von Anbietern offeriert die unterschiedlichsten Geräteausführungen, die oft aus patentrechtlichen Gründen vom mechanischen Aufbau stark voneinander abweichen.

Anders als die traditionellen Durchflußmeßverfahren, die über die Fließgeschwindigkeit oder das Volumen den Durchfluß ermitteln, erfassen die Coriolis-Durchflußmesser den Massedurchfluß eines Produktes direkt. Masse ist der einzige physikalische Parameter, der von anderen physikalischen Größen wie Temperatur, Druck, Viskosität, Dichte oder Reynoldszahl unbeeinflusst bleibt. Die Masse eines Stoffes ist aus verschiedenen Gründen ein bevorzugter Parameter in der industriellen Meßtechnik. Eine chemische Reaktion zwischen zwei oder mehreren Stoffen beispielsweise läuft aufgrund von masse- bzw. mol.-massebezogenen Gleichungen ab. Als Verrechnungsgröße ist die Masse eines Produktes die einzig gültige Größe, da das Volumen sich beispielsweise bei Temperaturänderung verändert, die Masse hingegen konstant bleibt.

In den folgenden Abschnitten werden den Interessenten für Coriolis-Massedurchflußmesser einige Hinweise gegeben, die bei der Auswahl des richtigen Gerätes aus der breiten Angebotspalette hilfreich sind. Die Informationen sind möglichst neutral gehalten und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit, insbesondere auch wegen der kontinuierlich laufenden Weiterentwicklung. Da sich seit der Einführung der Coriolis-Geräte in die Industrie gegen Ende der siebziger Jahre die Anzahl der Anbieter erheblich erhöht hat, sollte man bei der Auswahl des geeigneten Gerätes schon einige Punkte beachten, die für den erfolgreichen Einsatz und einen problemlosen Betrieb wichtig sind. Die Einschränkungen und Einsatzmöglichkeiten der verschiedenen Geräteversionen sind natürlich recht unterschiedlich und müssen daher im Detail betrachtet werden. Folgende Bereiche werden angesprochen:

- Abschnitt 2: Funktionsprinzip
- Abschnitt 3: Dichtemessung mit Coriolis-Massedurchflußmessern
- Abschnitt 4: Meßeffekte bei Coriolis-Massedurchflußmessern
- Abschnitt 5: Physikalische Grenzen von Coriolis-Massedurchflußmessern
- Abschnitt 6: Unterschiedliche Bauformen
- Abschnitt 7: Nennweiten
- Abschnitt 8: Meßrohrwandstärken
- Abschnitt 9: Druckverluste
- Abschnitt 10: Meßfehler/Meßunsicherheit
- Abschnitt 11: Meßbereich/Meßspannen
- Abschnitt 12: Benetzte Materialien
- Abschnitt 13: Transmitter
- Abschnitt 14: Meßwertaufnehmer
- Abschnitt 15: Schlußbemerkung
- Anhang A : Tabelle 1 - Transmitter-Auswahlkriterien
- Anhang B : Tabelle 2 - Meßwertaufnehmer- Auswahlkriterien

## 2. Funktionsprinzip

Das Coriolisprinzip wird durch das zweite newtonsche Gesetz,  $\mathbf{F} = \mathbf{m}\mathbf{a}$ , beschrieben .  
 ( Kraft = Masse x Beschleunigung)

In einem, mit der Winkelgeschwindigkeit  $\boldsymbol{\omega}$  rotierendem System, wirkt auf eine, sich mit der Geschwindigkeit  $\mathbf{v}$  radial bewegende Masse  $\mathbf{m}$  eine tangentielle Kraft  $\mathbf{F}_c$ , die Corioliskraft.

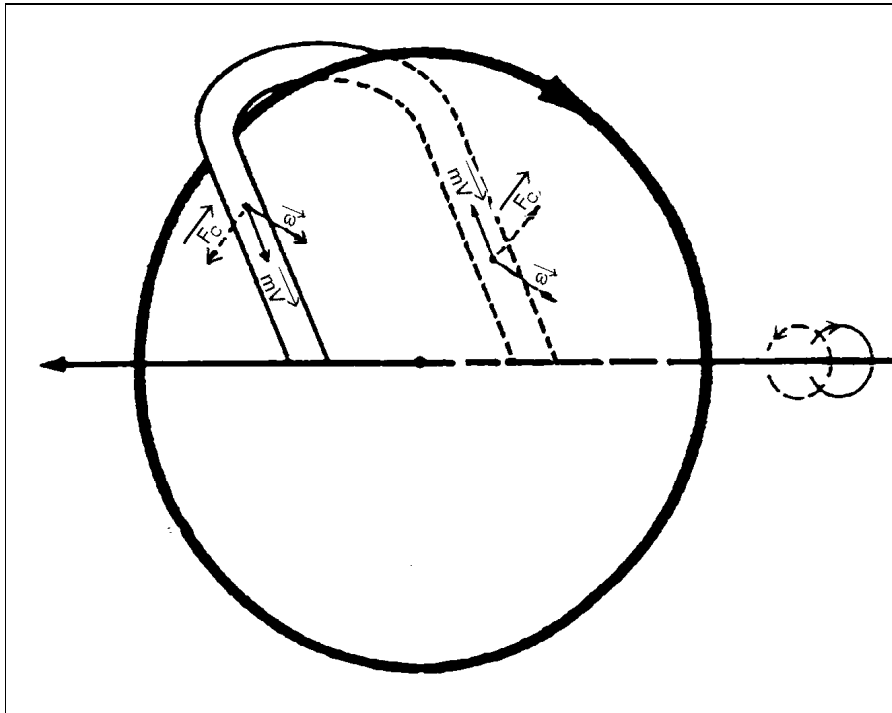
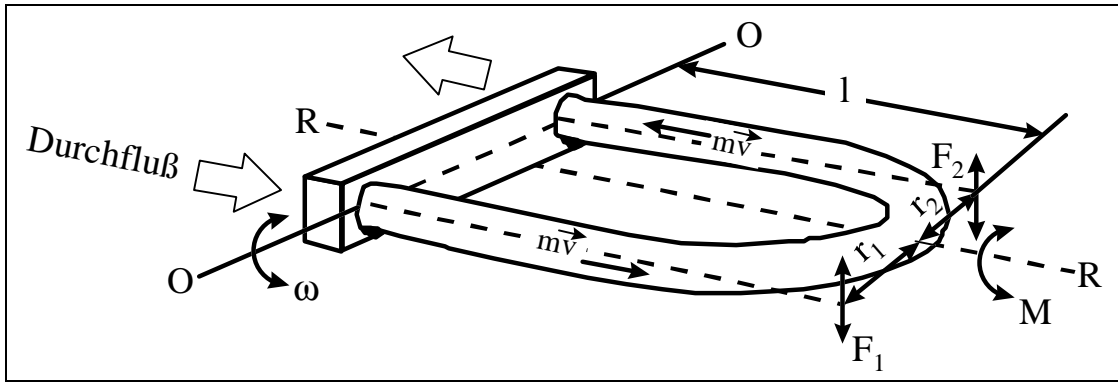


Abbildung 1

Dieses Grundprinzip machen sich alle Coriolis-Massedurchflußmesser zunutze. Ein eingespanntes Meßrohr wird elektromagnetisch zum Schwingen angeregt. Das Meßrohr schwingt mit seiner natürlichen Eigenresonanzfrequenz ähnlich einer Stimmgabel. Ein durch dieses oszillierende System geführter Massestrom hat eine Gegenkraft zur Folge welche im rechten Winkel zur Fließrichtung angeordnet ist und folgendermaßen definiert wird :

$$\mathbf{F}_c = 2 \mathbf{m} \mathbf{v} \boldsymbol{\omega} \dots\dots\dots 1$$

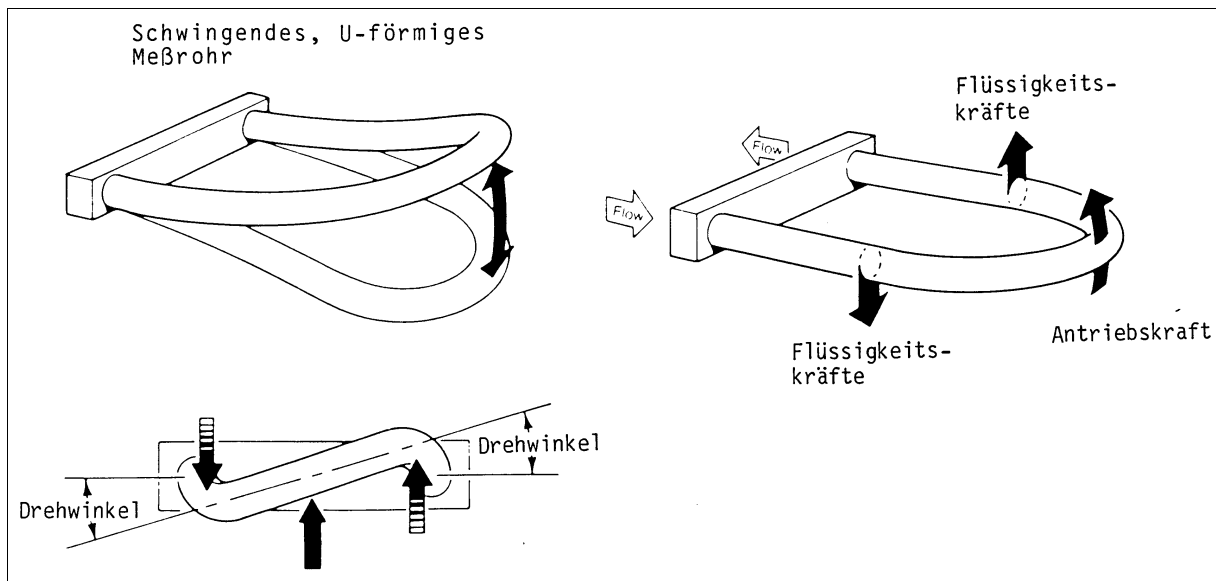
Dabei sind  $\mathbf{F}$ ,  $\boldsymbol{\omega}$  und  $\mathbf{v}$  vektorielle Größen und  $\mathbf{m}$  die Masse die sich in einem Schenkel des Meßrohres(vom Scheitel bis zur Einspannung) befindet. Die Geschwindigkeitsvektoren haben im Ein- und Auslauf aufgrund der Umlenkung entgegengesetzte Richtung.



**Abbildung 2**

Betrachtet man das Meßrohr vom Scheitel her, sind die beiden, durch die Fluidströme verursachten Corioliskräfte  $F_1$  und  $F_2$  entgegengesetzt und dem Betrage nach gleich groß. Schwingt das Rohr um die Achse O-O, bewirken die Kräfte ein oszillierendes Moment  $M$  um die Achse R-R mit dem Radius  $r$ , das sich folgendermaßen berechnen läßt:

$$\vec{M} = \vec{F}_1 \times \vec{r}_1 + \vec{F}_2 \times \vec{r}_2 \dots\dots\dots 2$$



**Abbildung 3**

Da  $-\vec{r}_2 = \vec{r}_1 = \vec{r}$  gilt und  $\vec{F}_1$  und  $\vec{F}_2$  voraussetzungsgemäß dem Betrage nach gleich sind, folgt aus den Gleichungen 1 und 2 :

$$\vec{M} = 2 \vec{F}_1 \times \vec{r} = 4m \left( \vec{\omega} \times \vec{V} \right) \times \vec{r} \dots\dots\dots 3$$

Die Masse in einem Rohrschenkel ist das Produkt aus der Dichte  $\rho$ , der Querschnittsfläche des Rohres  $A$  und der Länge des halben Rohres  $L$ . Die Geschwindigkeit  $v$  ergibt sich als Quotient der Länge  $L$  und der Durchströmzeit  $t$ , der Massestrom  $Q_m$  aus der Masse  $m$ , die in der Zeit  $t$  durch das Rohr fließt. Damit erhält man  $m = \rho \cdot A \cdot L$ ,  $v = L/t$  und  $Q_m = m/t$ . Durch einsetzen folgt daraus  $Q_m = m \cdot v / L$ . Gleichung 3 wird dann zu:

$$M = 4 \omega r L Q_m \dots\dots\dots 4$$

Das Drehmoment  $M$  bewirkt einen Winkelausschlag oder eine Torsion  $\theta$  des Meßrohres um die Achse R-R, der sein Maximum beim Nulldurchgang des Scheitels des schwingenden U-Rohres hat. Dem Ausschlag, der durch das Drehmoment  $M$  verursacht wird, wird durch die Federsteifigkeit  $K_s$  des Meßrohres entgegengewirkt. Allgemein gilt für das Rückstellmoment einer Torsionsfeder:

$$T = K_s \cdot \theta \dots\dots\dots 5$$

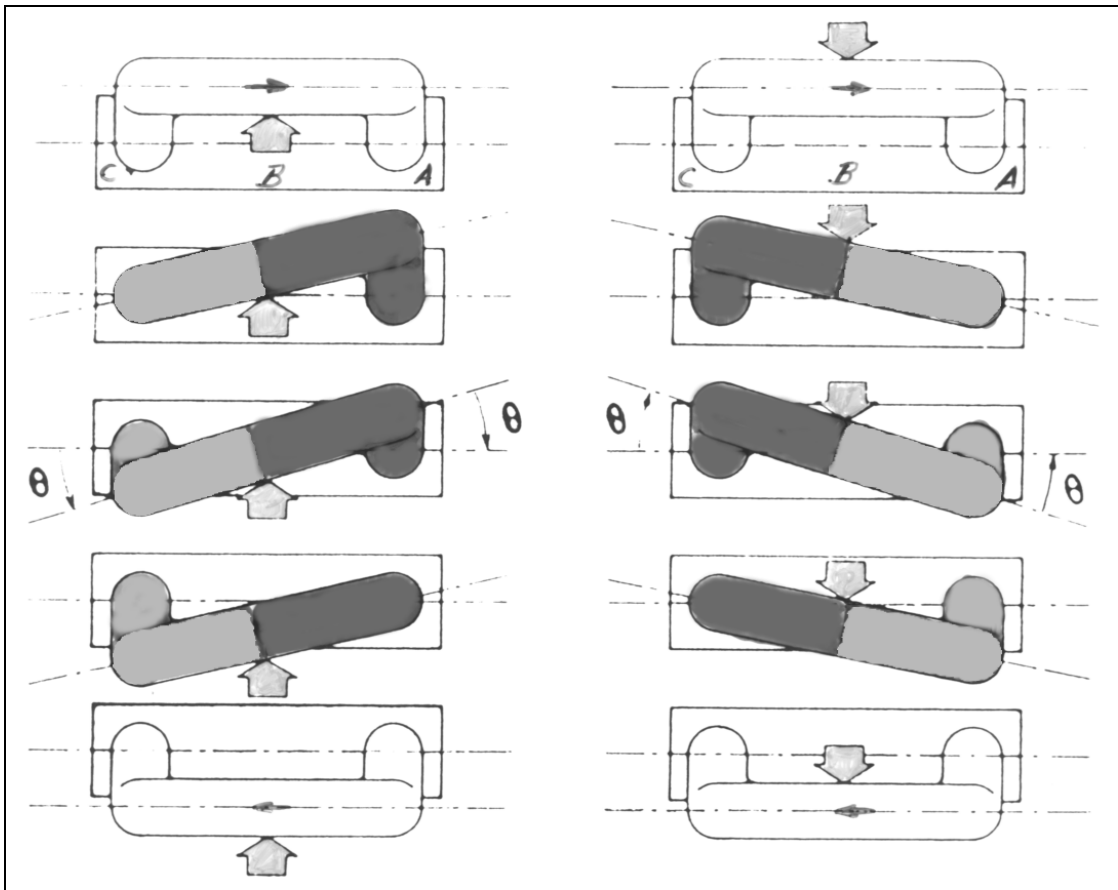
Bei maximalem Winkel  $\theta$  gilt  $T = M$ . Damit kann der Massestrom  $Q_m$  aus dem Torsionswinkel  $\theta$  berechnet werden, indem man die Gleichungen 4 und 5 gleichsetzt:

$$Q_m = \frac{K_s \times \theta}{4 \pi \times r \times L} \dots\dots\dots 6$$

Bei der Bestimmung des Massestromes geht man nun so vor daß der Torsionswinkel  $\theta$  mittels zweier magnetischer oder optischer Positionsdetektoren gemessen wird. Jeder Detektor erfaßt den maximalen Verdrehungswinkel als Funktion der Zeit, zu der jeder Rohrschenkel seine Ruhelage überquert. Die Zeitdifferenz zwischen dem Hin- und Herschwingen des rechten und des linken Rohrschenkels ist theoretisch Null, wenn kein Durchfluß vorhanden ist. Die Geschwindigkeit  $v_t$  des Rohrschenkels beim Nulldurchgang multipliziert mit dem Zeitintervall  $\Delta t$  ist mit dem Verdrehungswinkel  $\theta$  geometrisch verknüpft:

$$\sin \theta = \frac{v_t}{2 r} \Delta t \dots\dots\dots$$

7  
Abbildung 4 zeigt einen vollständigen Schwingungszyklus.



**Abbildung 4**

Ist der Winkel  $\theta$  (im Bogenmaß) klein, kann er mit  $\sin\theta$  gleichgesetzt werden. Zudem ist die Geschwindigkeit des Rohrschenkels an der Stelle des Sensors gleich der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  multipliziert mit der Entfernung  $l$  des Sensorpunkts von der Achse O-O, da auch der Auslenkwinkel um die Achse O-O klein ist. Die Ableitung des Auslenkwinkels nach der Zeit ergibt die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$ . Der Sinus des winkels ist gleich dem Quotienten aus der Auslenkung des Sensorpunkts und seinem Abstand von der Achse O-O; abgeleitet nach der Zeit erhält man die Geschwindigkeit der Rohrachse an der Stelle des Sensorpunkts dividiert durch die (konstante) Entfernung. Bei kleinen Auslenkwinkeln ergibt sich also  $v_t = \omega l$ . Damit wird die Gleichung 7 zu:

$$\theta = \frac{\omega \times l \times t}{2r} \dots\dots\dots 8$$

Setzt man Gleichung 8 in Gleichung 6 ein, so ergibt sich:

$$Q_m = \frac{K_s \times \omega}{4\omega \times r} \times \frac{l \times \Delta t}{L \times 2r} = \frac{K_s \times l}{8r^2 \times L} \dots\dots\dots 9$$

Der Massestrom  $Q_m$  ist also nur abhängig vom Zeitintervall  $\Delta t$  und von den geometrischen Materialkonstanten.  $Q_m$  ist unabhängig von  $\omega$  und damit von der Eigenfrequenz des Meßrohrs.

## 2.1 Entstehung der Corioliskräfte bei einem geraden Meßrohr

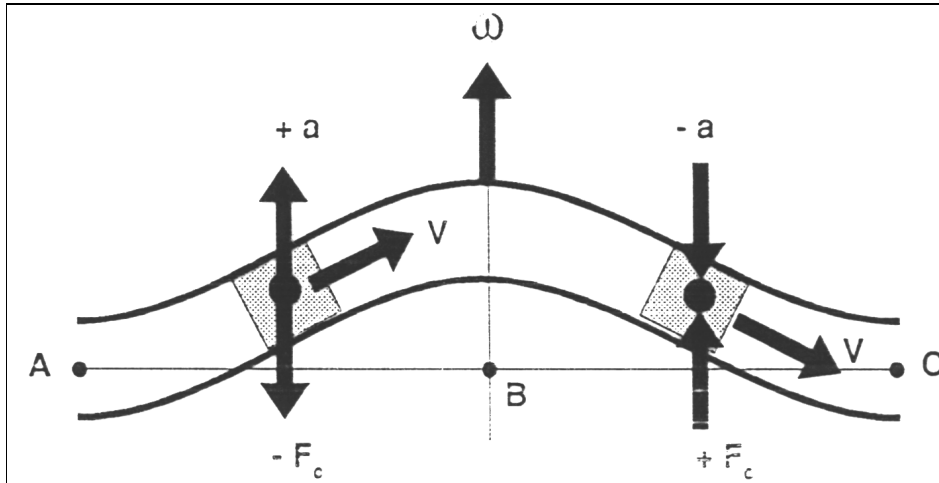


Abbildung 5

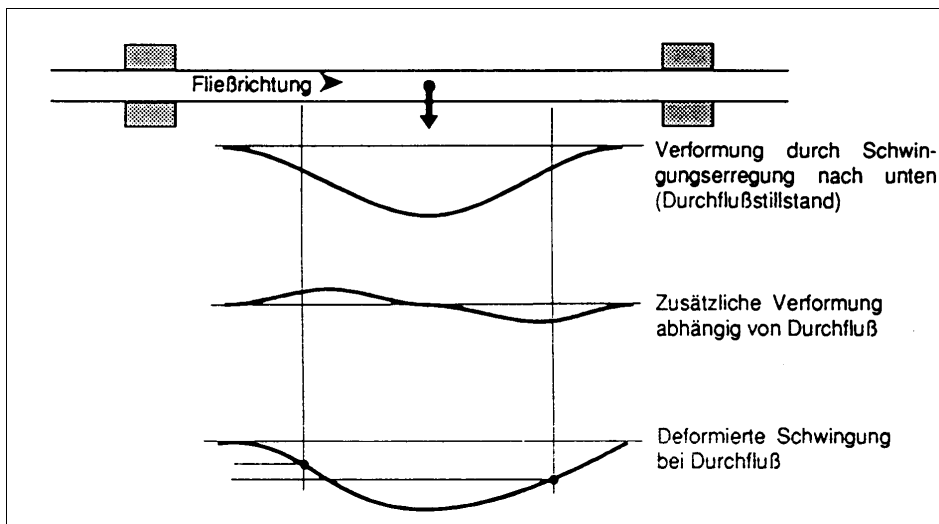


Abbildung 6

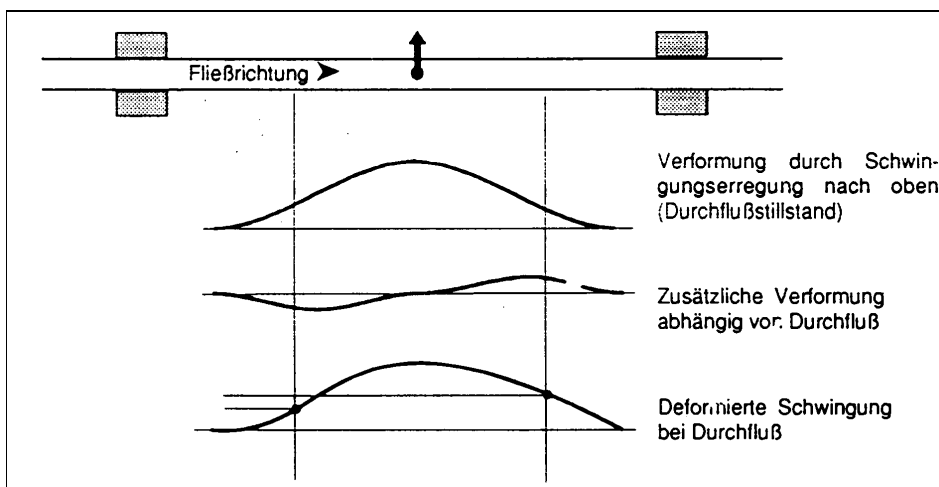


Abbildung 7

### 3. Dichtemessung mit Coriolis-Massedurchflußmessern

Da Coriolis-Massedurchflußmesser nach dem Eigenresonanzverfahren arbeiten kann auch, als oft gewünschtes Nebenprodukt, die Dichte erfaßt werden. Bei der mathematischen Herleitung geht man von der Gleichung für ein schwingendes Feder/Massesystem aus. Die Kreisfrequenz eines schwingenden Rohres ergibt sich aus:

$$\omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{K_s}{m_{ges}}} \dots\dots\dots 4$$

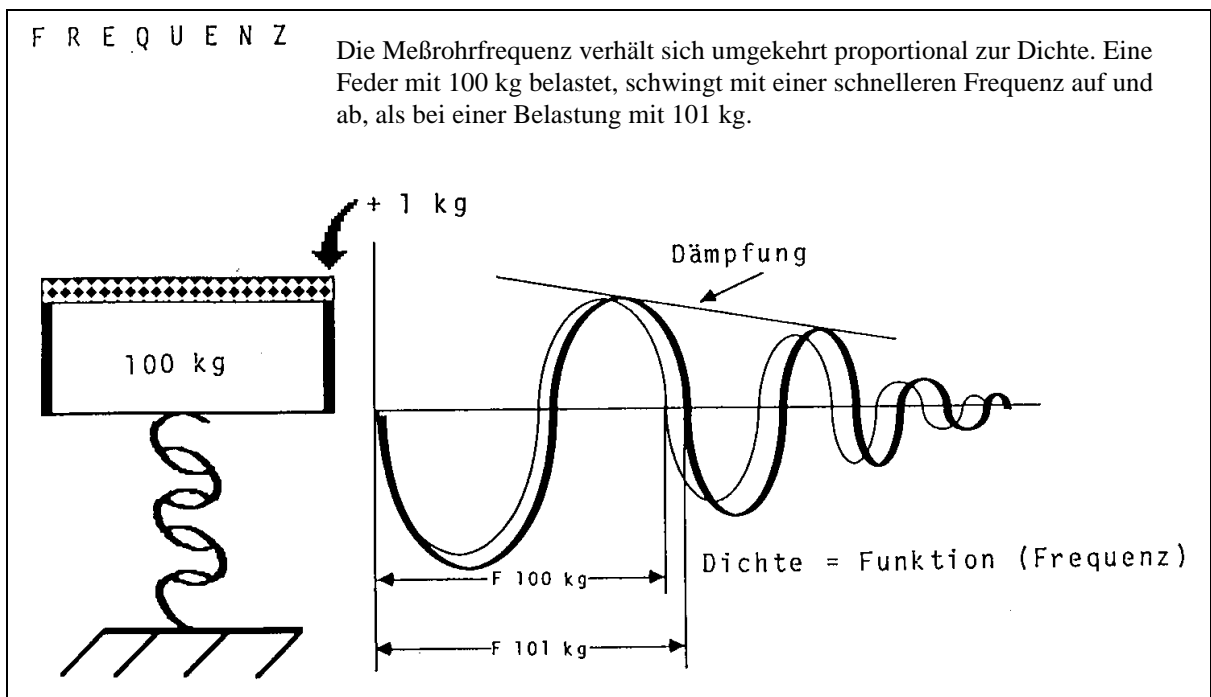


Abbildung 8

Dabei sind  $K_s$  die Federkonstante des Meßrohres und  $m_{ges}$  seine Masse. Diese Gesamtmasse setzt sich aus der Masse des Rohres selbst und seinem flüssigen Inhalt zusammen:

$$m_{ges} = m_{Rohr} + m \dots\dots\dots 5$$

Die Masse der Flüssigkeit ist gleich dem Produkt aus ihrer Dichte  $\rho$  und dem Volumen im Meßrohr  $V = A L$

$$m = \rho V \dots\dots\dots 6$$

Einsetzen der Gleichungen 5 und 6 in Gleichung 1 und Auflösen nach  $\rho$  ergibt:

$$\rho = \frac{K_s}{4\pi^2 \frac{D^2}{f} V} - \frac{m_{Rohr}}{V} \dots\dots\dots 7$$

Außerdem ist die Frequenz  $f$  der Schwingung gleich dem Kehrwert ihrer Schwingungsdauer  $T$ :

$$f = \frac{1}{T} \dots\dots\dots 8$$

Setzt man Gleichung 8 in Gleichung 7 ein, so erhält man:

$$\rho = \frac{K_s}{4\pi^2 V} T^2 - \frac{m_{Rohr}}{V} \dots\dots\dots 9$$

Darin sind neben dem Zahlenwert  $4\pi^2$  die Masse des Rohres  $m_{rohr}$  und sein Volumen  $V$  konstant, wenn man die temperaturabhängige Werkstoffausdehnung nicht berücksichtigt. Damit verbleibt schließlich eine quadratische Gleichung zur Bestimmung der Dichte aus der Schwingungsdauer des Meßrohres:

$$\rho = K_1 T^2 - K_2 \dots\dots\dots 10$$

## 4. Meßeffekte bei Coriolis-Massedurchflußmessern

Es stehen bei allen heutigen auf dem Markt befindlichen Massedurchflußmessern grundsätzlich drei Primärinformationen zur Verfügung:

1. - masseproportionales Phasensignal ← Corioliseffekt
2. - dichteabhängiges Ausgangssignal ← Meßrohrfrequenz
3. - temperaturabhängiges Ausgangssignal ← Produkt/Meßrohrtemperatur

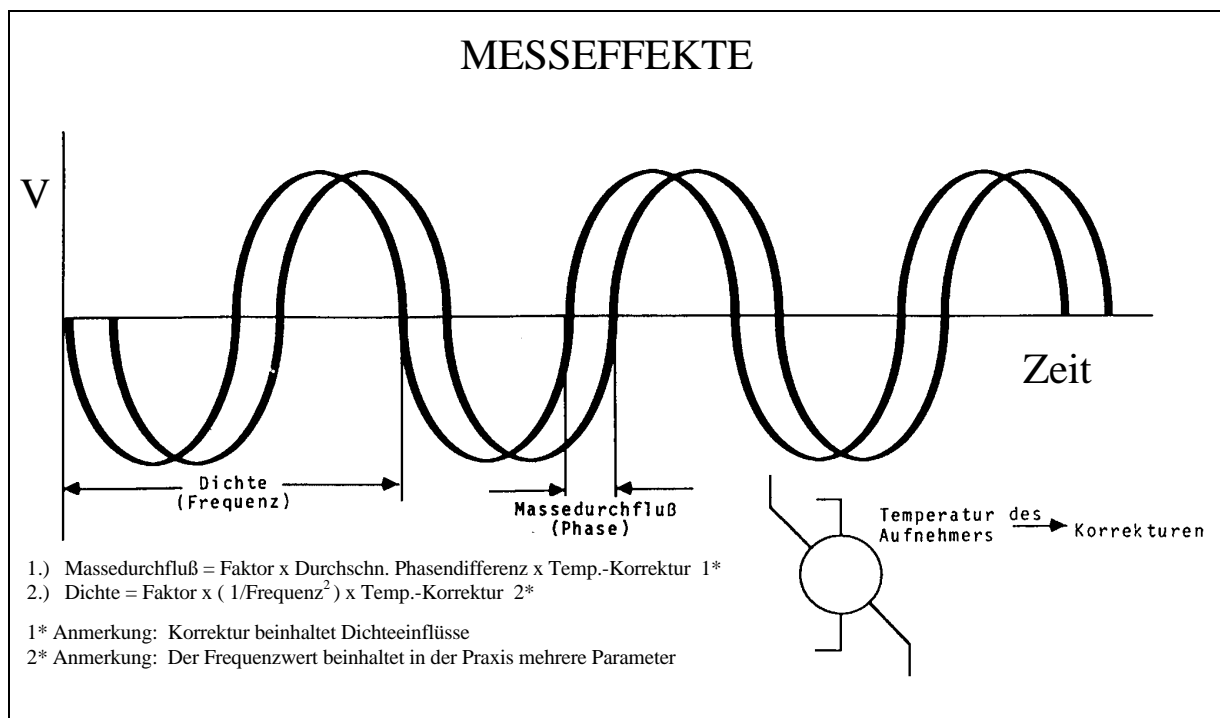


Abbildung 9

## 5. Physikalische Grenzen von Massedurchflußmessgeräten

### 5.1 Meßgenauigkeit bei verschiedenen Applikationen und am Einbauort.

In eingebautem Zustand, unter den in der Industrie üblichen Umgebungsbedingungen, wie z.B.: Vibrationen oder Rohrleitungsverspannungen, weicht die Genauigkeit von Coriolis Massedurchflußmeßgeräten prinzipiell von der, unter Idealbedingungen auf dem Prüfstand ermittelten Genauigkeit ab. Außerdem können sich, bei unterschiedlichen Applikationen, durchaus stark abweichende Fehlergrenzen ergeben. So darf man annehmen, daß Strömungsprofil oder auch bereits geringe Inhomogenitäten des Mediums (z.B. Gaseinschlüsse), bei bestimmten Meßsystemen signifikanten Einfluß auf die Genauigkeit ausüben werden. Auch starke Druckschwankungen (z.B. bei Kolbenpumpen) können die Meßergebnisse verfälschen. Nachdem es mittlerweile aber verschiedenste Anwendungen für Coriolis-Massedurchflußmesser gibt, ist es für den Anwender fast unmöglich die, soweit vorhanden, zum Teil widersprüchlichen Meßergebnisse bzw. Erfahrungen zusammenzutragen und zu vergleichen. Es erscheint vielmehr sinnvoll, sich der Grundlagen der Physik zu bedienen, um das Verhalten von verschiedenen Coriolis-Massemessern bei verschiedenen Applikationen besser abschätzen zu können.

Nachfolgend nun einige Erläuterungen:

### 5.2 Allgemeine Grenzen von Coriolis-Massedurchflußmessern

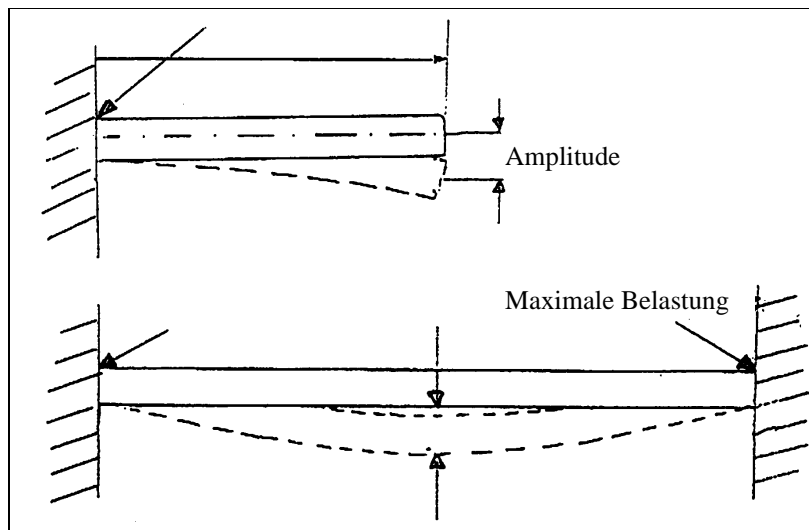


Abbildung 10

- a) **Die maximal zulässige Belastung des Meßrohres schränkt die Schwingungsamplitude ein**
  - Beschränkung des Meßeffekts
  - Störempfindlichkeit
  - Einschränkung bei Gasmessung (Kompressibilitätseffekt)
  
- b) **Die für die Messung relevante Rohrauslenkung durch das Wirken der Corioliskraft wird durch die Steifheit bestimmter Rohrformen besonders reduziert.**
  - Beschränkung des Meßeffekts
  - Zwang zur Reduzierung der Rohrwandstärke des Meßrohres

### 5.3 Druckschwankungen

Der Einfluß von Druck auf ein gebogenes Rohr ist gut bekannt unter dem Begriff "Bourdon Effekt". Er sagt in einfachen Worten aus, daß ein gebogenes Rohr unter Druck das Bestreben hat, sich "gerade" zu strecken, sofern nicht eine entsprechende Einspannung und eine kreisförmige oder gerade Form entgegenwirken. Es gibt prinzipiell 2 Effekte:

1. Schon das gebogene Rohr im Ruhezustand erfährt bei Erhöhung des Druckes eine Auslenkung (= Beeinflussung des Meßergebnisses), weil die Rohrform samt Einspannung nicht druckstabil ist.

2. Die Grundschwingbewegung des Meßrohres wird beeinflusst.

Dieser Fall wird am häufigsten auftreten und vor allen Dingen bei periodischen Druckänderungen bei sogenannten „Biegeschwingern“ Meßprobleme verursachen. Starke Druckschwankungen treten unter anderem in Verbindung mit Kolbenpumpen auf.

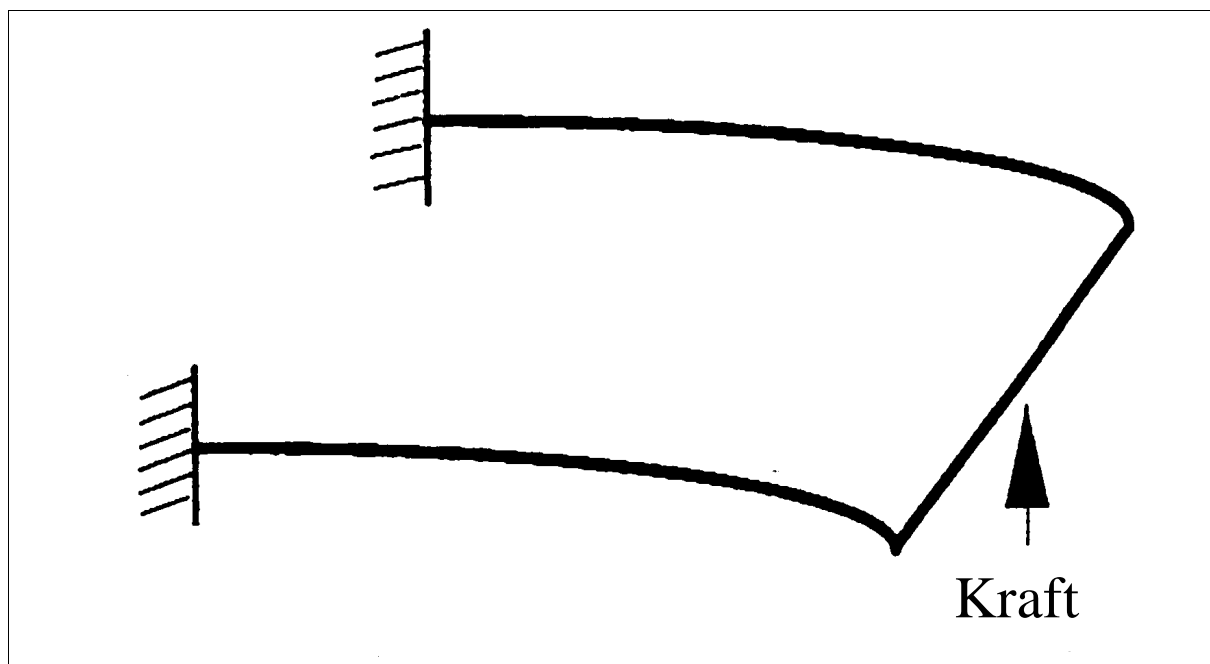


Abbildung 11 Einfluß von Druckveränderung auf ein gebogenes Rohr.

## 5.4 Gasmessung

Gase sind abhängig von der Betriebsgasdichte wesentlich kompressibler als Flüssigkeiten. Nachdem sich der Meßeffect auf die durch die Oszillation des Meßrohres querbeschleunigte Masse beschränkt, wird bei relativ kleinen relativen Schwingungsamplituden nur ein Teil der tatsächlich strömenden Gasmenge gemessen. Dieser Effect kann durch entsprechende Kalibrierung oder Justierung auf die entsprechende Betriebsdichte selbstverständlich berücksichtigt werden.

Ändert sich aber die Betriebsdichte des Gases durch Temperatur oder Druckschwankungen, so verändert sich auch die Skalierung des Massemessers. Der dann auftretende Meßfehler ist um so größer, je kleiner das Verhältnis von Schwingungsamplitude zu dem entsprechenden Innendurchmesser des Meßrohres ist.

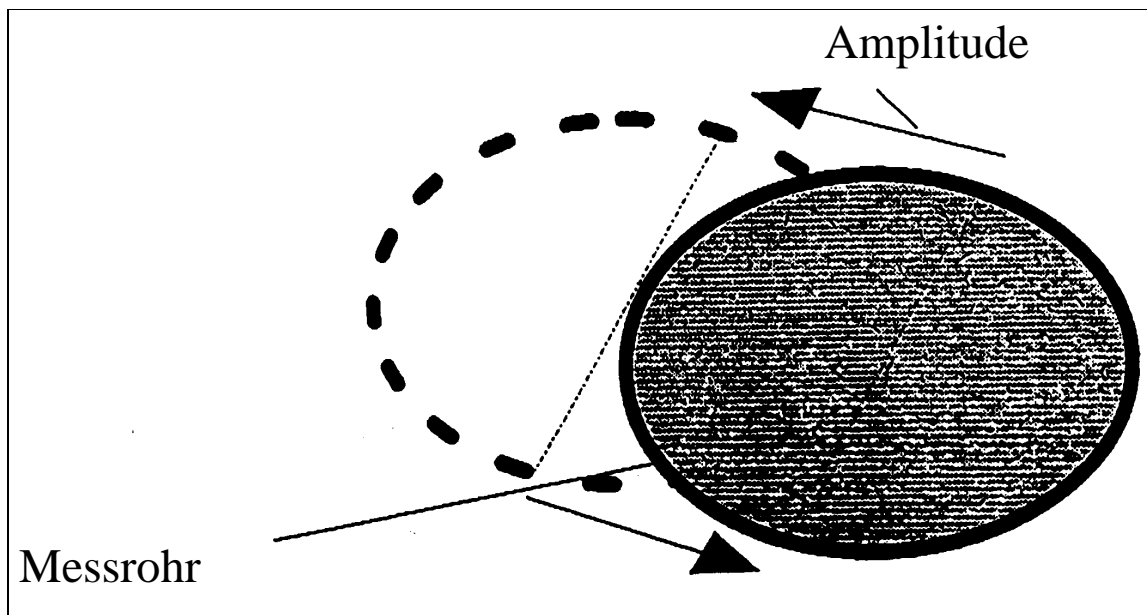


Abbildung 12 Schnitt durch ein oszillierendes Rohr

## 5.5 Gaseinschlüsse in der Flüssigkeit

Der Effekt bezüglich der Kompressibilität ist im Prinzip entsprechend, wie unter Punkt 3 bereits beschrieben. Es kommt jedoch noch erschwerend hinzu, daß ein Gemisch aus Flüssigkeit und Gas die Grundschiwingung des Rohres bedämpft und somit die Messung stören oder gar unterbrechen kann. Je kleiner die Energie im Schwingsystem, desto größer ist die Gefahr der Störung.

### Energie im Schwingsystem:

$$W = \frac{mv^2}{2} + \frac{Dy^2}{2}$$

Die Energie nimmt also mit größerer Masse (m) im Schwingsystem und größerer Schwingungsamplitude (y) und Federkonstante zu.

Eine denkbare Lösung zur Verbesserung dieses Effektes wäre es, kurzzeitig wesentlich mehr Antriebsenergie zur Verfügung zu stellen. Diese Möglichkeit kann jedoch bei den elektromagnetischen Antrieben, die bei allen Coriolis-Massedurchflußmessern verwendet werden, nur zu einer relativ geringen Verbesserung führen. Eine deutliche Minimierung der Störeffekte wird durch eine Vergrößerung der Schwungmasse z.B. durch dickwandigere, schwerere Meßrohre erzielt.

### Trägheitsmoment und dessen Wirkung bei vorhandenen Gas- oder Luftteinschlüssen

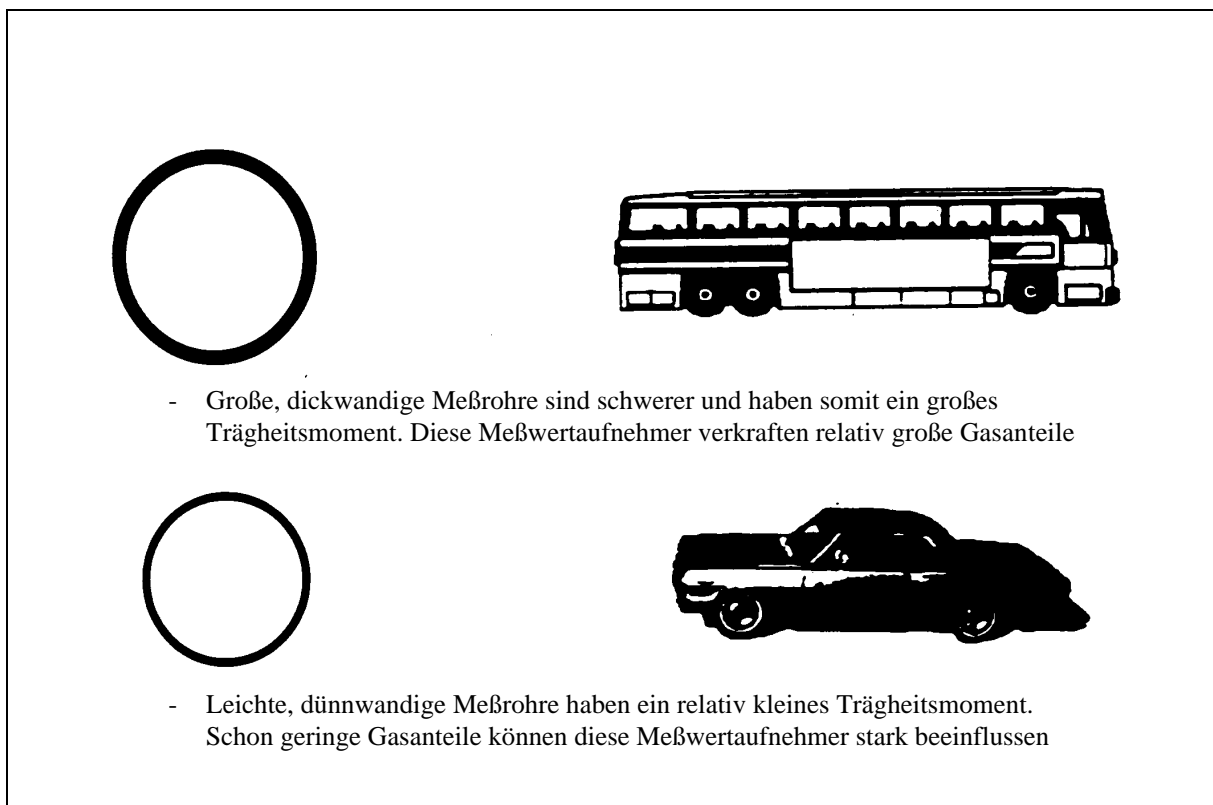


Abbildung 13

## 5.6 Vibrationen

Ein oszillierendes System kann im Prinzip immer durch Vibrationen beeinflusst werden. Somit können sämtliche Coriolis-Massedurchflußmesser ab einer bestimmten Intensität der Vibration gestört werden.

Man kann jedoch prinzipiell sagen, daß die Empfindlichkeit eines Schwingsystems gegenüber Vibrationen um so größer ist, je kleiner das Verhältnis von Schwingungsamplitude zur Störgröße ist. Somit nimmt mit zunehmender relativer Schwingungsamplitude der Störeinfluß durch Vibrationen ab. Selbstverständlich spielt auch die Rohrwandstärke und die Form der Rohrschleife eine Rolle hinsichtlich der Steifigkeit des Rohres, sowie auch die Richtung und Frequenz der Störgröße. Dies ändert jedoch nichts an der grundlegenden Aussage.

### Schlußfolgerung:

Ein idealer Coriolis-Massedurchflußmesser sollte möglichst folgende Kriterien erfüllen:

**1) Eine möglichst große relative Schwingungsamplitude** muß erreicht werden, ohne das Schwingsystem (meistens das Meßrohr) stark zu belasten. Ideal ist es, wenn das Meßrohr durch die primäre Schwingbewegung nicht belastet wird.

Bei größerer Amplitude kann in diesem Fall der notwendige Meßeffect mit wesentlich dickwandigeren Rohren erzielt werden. Es ist offensichtlich, daß dickwandige Rohre weniger empfindlich gegen Störeinflüsse sind, höhere Betriebsdrücke erlauben und wesentlich größere Sicherheit hinsichtlich Korrosion und Abrasion bieten.

**2) Um die Stabilität bzw. Kontinuität der Schwingbewegung zu verbessern, ist es notwendig, mit zusätzlicher Schwungmasse in Verbindung mit einem zusätzlichen Federelement, nach Möglichkeit nicht dem Meßrohr, die Energie im Schwingsystem wesentlich zu erhöhen. Somit steht bei Störungen oder kurzfristiger Bedämpfung durch das Medium ausreichend Energie zur Verfügung, um eine sichere und gute Messung zu gewährleisten.**

Bis auf ein System, welches als sogenannter **Drehschwinger** arbeitet sind alle anderen Massedurchflußmeßsysteme auf dem Markt als **Biegeschwinger** mit limitierter Schwingungsamplitude und limitierter Meßrohr-Wandstärke konzipiert so daß dieser Idealfall dort kaum erreicht werden kann.

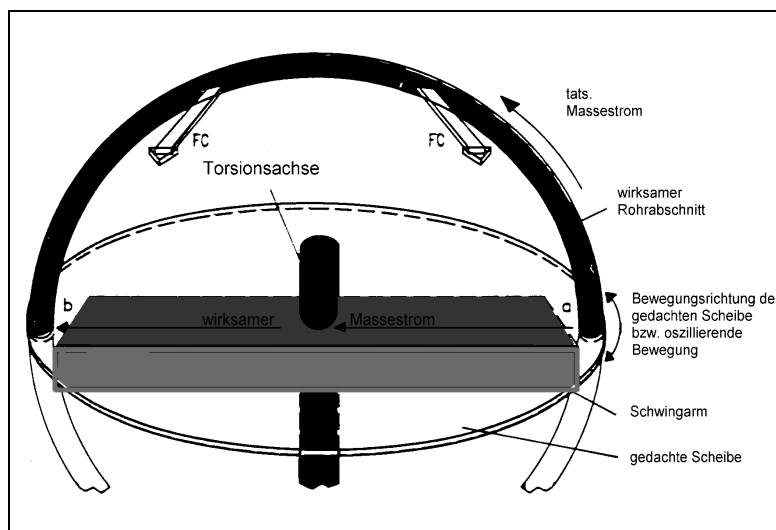


Abbildung 14

## 6. Unterschiedliche Bauformen

Die Meßwertaufnehmer der verschiedenen Hersteller weisen im Prinzip alle eine andere Form auf. Der Grund mag auf der einen Seite in den vielen verschiedenen Patenten verschiedener Inhaber liegen, andererseits spielen aber auch funktionstechnische und andere praktische Gründe eine Rolle .

Der ideale Aufnehmer besteht wohl aus nur einem einzelnen geraden Meßrohr ohne Querschnittsverengung. Bisher gibt es zwar einen Anbieter dieser Bauform, jedoch sind die Geräte noch relativ neu und auch nur in einigen Nennweiten lieferbar. Hierfür gelten die Idealvorstellungen, wie z.B. niedrigstmöglicher Druckverlust, selbsttätiges Leerlaufen, etc. Ähnlich gut stehen zunächst Aufnehmer mit zwei parallelen geraden Meßrohren da. Doch sollte man beachten, daß diese Geräte den eigentlich angenommenen Leitungsquerschnitt von beispielsweise 1" (DN 25) erheblich reduzieren, beispielsweise auf nur ca. 32 % der freien Querschnittsfläche einer 25er Rohrleitung (siehe auch Abschnitt "Nennweiten"). Das hat in erster Linie funktionstechnische Gründe. Kurze gerade Meßrohre haben zwar den Vorteil geringer Baugröße, jedoch aufgrund ihrer größeren Steifigkeit haben sie den Nachteil kleinerer Durchflußfaktoren (Signal/Durchfluß-Verhältnis). D.h. es werden relativ hohe Fließgeschwindigkeiten benötigt, um eine entsprechende Signalausbeute zu erzielen. Dies gilt auch für einige der komplexeren Meßrohrformen. Daher sollten immer wieder die freien Rohrquerschnittsflächen den Meßbereichen und den erzielbaren Genauigkeiten gegenübergestellt werden.

Bei Meßwertaufnehmern, die mit zwei parallelen Meßrohren ausgeführt sind, ist auch die Ausführung des Strömungsteilers zu beachten. Dieses Teil dient zur Aufteilung des gesamten Produktstromes auf 2, in der Regel kleinere Rohre und auf der Auslaufseite natürlich zur Zusammenführung der 2 Teilströme. Hier werden die unterschiedlichsten Ausführungen eingesetzt. Am strömungstechnisch günstigsten sind Gußstücke, die eine bogenförmige Umlenkung und allmähliche Aufteilung gewährleisten. Andere Strömungsteiler bestehen aus Metallblöcken, in denen die Hauptleitungsbohrung einfach mit 2 kleineren Stichbohrungen für den Meßrohranschluß versehen ist. Diese Ausführung ist zwar am preiswertesten, jedoch nur für dünnflüssige Medien zu empfehlen. Außerdem sollte, wie schon an anderer Stelle erwähnt, die Materialkompatibilität mit dem spezifizierten Meßrohrmaterial gewährleistet sein.

Der Vorteil des selbstleerlaufenden Meßwertaufnehmers bei senkrechtem Einbau ist zweifelsohne bestechend. Man sollte jedoch von der Praxis ausgehen und überlegen, wann dieser Vorteil wirklich unumgänglich ist. Mehr als 95% aller Einsatzfälle dürften auch ohne diesen Vorteil auskommen, ohne daß auf Dauer Probleme durch ein im Meßwertaufnehmer verbleibendes Produkt, bei Durchfluß-Stillstand, auftreten. Einige der komplexeren Meßrohrformen sind mittlerweile allerdings auch schon soweit modifiziert worden, daß diese auch als selbstleerlaufend angesehen werden können, wenn sie in einer bestimmten Lage eingebaut werden.

Die meisten Meßwertaufnehmer werden mit ihrer typischen Eigenfrequenz, die sich aus der Steifigkeit (Elastizität) der Meßrohre und deren Gewicht ergibt, zum Schwingen angeregt. Diese Frequenzen variieren zwischen 50 Hz bis ca. 1000 Hz., je nach System. Die Frequenz mit der ein Meßwertaufnehmer schwingt, gibt indirekt auch die Vibrationsfrequenz an, auf die ein System empfindlich reagiert, wenn diese als Anlagenvibration von externer Seite eingebracht wird.

Meßsysteme mit dünnwandigen und damit leicht schwingenden Meßrohren stellen einen Schwingkreis geringer Güte dar, d.h. die gespeicherte Energie ist gering.

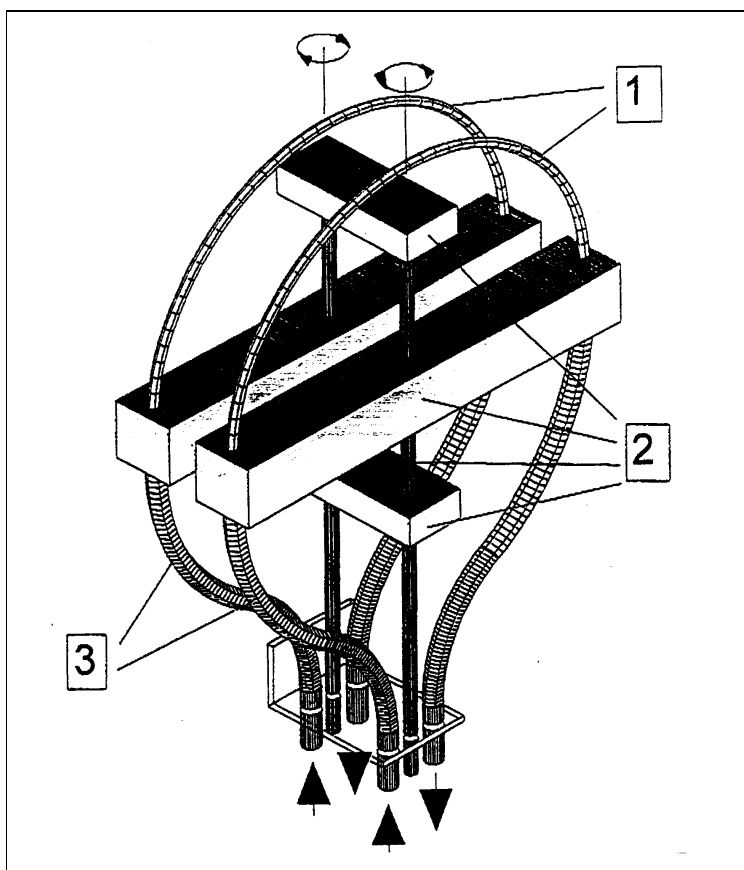
Systeme mit dickwandigen, schweren Meßrohren haben wesentlich mehr Energie gespeichert. Dämpfungseffekte, z.B. hervorgerufen durch Gasanteile in der Flüssigkeit, können bei solchen Systemen wesentlich besser ausgeglichen werden.

werden, weil bei diesem System, trotz niedrigster Belastung der Meßrohre, relativ große Schwingungsamplituden der Meßrohrschleife erzielt werden können. Große Meßamplituden ermöglichen einen großen Meßeffect und hohe Meßwertstabilität bei externen Störungen. Bei Amplituden in der Größenordnung des Innendurchmessers des Meßrohres spielt die Kompressibilität von Gasen mit niedriger Dichte nahezu keine Rolle, da sämtliche Gasmoleküle durch die Bewegung des Rohres beschleunigt werden. Bei anderen Fabrikaten mit relativ kleinen Amplituden, - z.B. gerades Rohr - wird der Meßeffect stark abhängig von der Gasdichte.

Ein ähnlicher Effekt ergibt sich bei Flüssigkeits-/gasgemischen, oder Gaseinschlüssen in der Flüssigkeit, wobei hier noch der negative Einfluß der Dämpfung der Schwingbewegung hinzukommt, wenn die Energie im Schwingsystem relativ niedrig ist. Bei dem "Drehschwinger" mit zusätzlicher Schwungmasse ist die Energie im System sehr hoch.

Die relativ große Schwingungsamplitude hat noch den Vorteil, daß generell mit ausreichend großem Meßeffect dickwandige Rohre verwendet werden. Diese erhöhen die Stabilität und geben Sicherheit bezüglich Druck, Abrasion und Korrosion.

**Das kreisförmig gebogene und beidseitig eingespannte Rohr ist druckstabil und wird in sich durch die Drehbewegung nicht deformiert. Somit können auch starke Pulsationen, z.B. bei der Verwendung von Kolbenpumpen, die Messung nicht beeinflussen.**



1. **Messrohre**  
um einen großen Meßeffect zu erzielen
2. **Schwingsystem**  
um eine stabile Schwingbewegung und eine große Schwingungsamplitude zu erreichen.
3. **Produktzuführung**  
um eine Verbindung zwischen Einbauort und Meßrohr ohne starke Beanspruchung und mit guter Entkopplung herzustellen

**Abbildung 15**

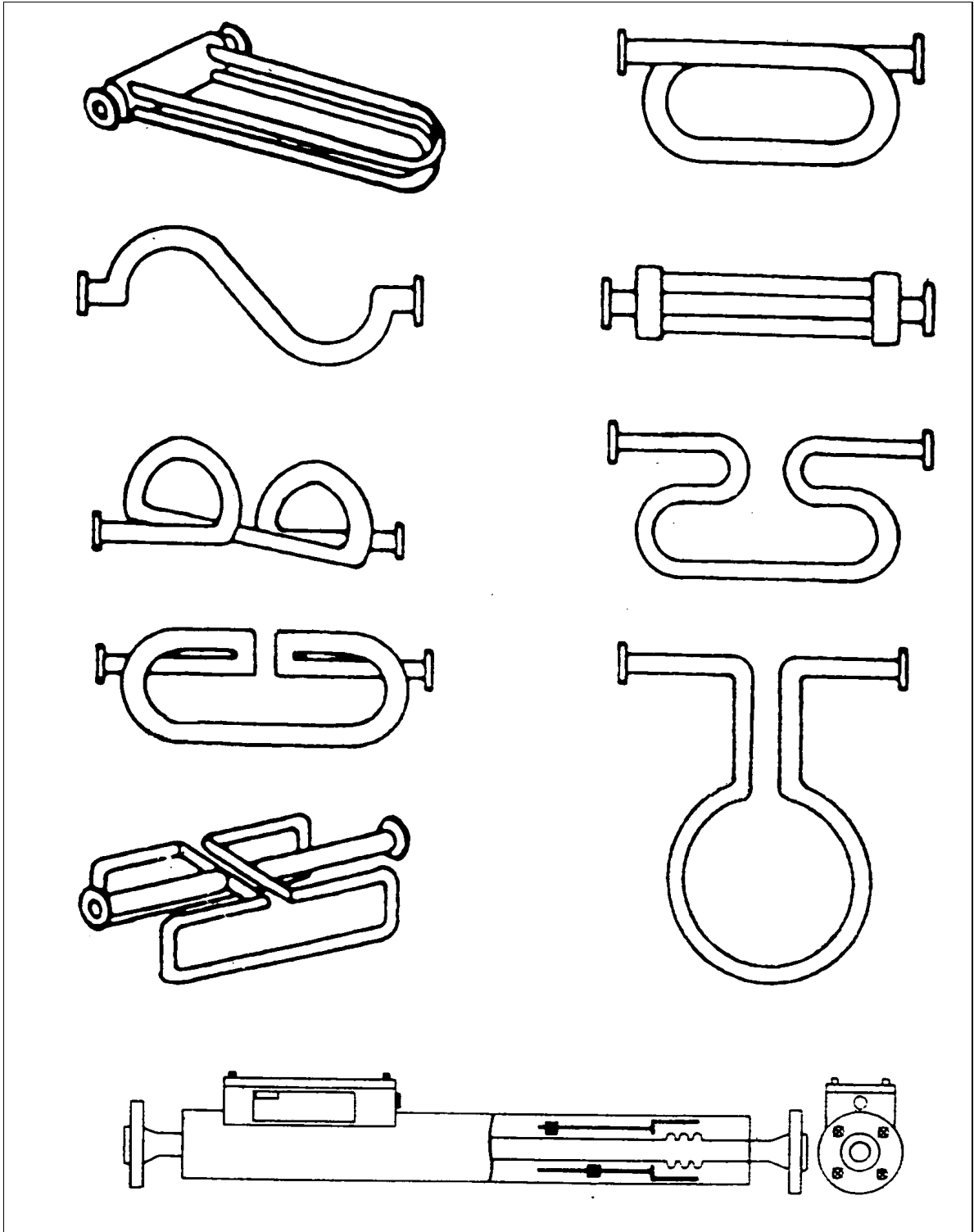


Abbildung 16

## 7. Nennweiten

Unter Nennweiten, definiert nach DIN, versteht man normalerweise einen bestimmten freien Rohrquerschnitt (Durchmesser) einer Rohrleitung je nach Druckstufe. Aufgrund des Coriolis-Prinzips hat es sich ergeben, daß einige Fabrikate mit einzelnen durchströmten Rohren, andere mit parallelen Doppelmessrohren ausgeführt sind.

Um die Größe eines Sensors (Meßwertaufnehmers) zu identifizieren, sollte man sich nicht unbedingt an den angegebenen Flansch-Nennweiten orientieren, sondern an dem jeweiligen Querschnitt des oder der Meßrohre, da ein und derselbe Aufnehmertyp mit Flanschen unterschiedlicher Nennweite bestückt werden kann. Es ist daher ratsam, nach den tatsächlichen Rohrdurchmessern bzw. der freien Querschnittsfläche der Rohre zu fragen, da diese Werte nur selten in der üblichen Hersteller-Literatur zu finden sind. Man kann dabei u.a. auf solche Dubiositäten wie folgt stoßen:

- Herstellerangabe: Meßwertaufnehmer DN 25
- Innendurchmesser (d) der 2 Meßrohre, je 11,38 mm  
Die freie Querschnittsfläche (A) beträgt:

$$A = 2 \times \frac{d^2}{\pi 4} = 203,4 \text{ mm}^2$$

Dagegen die tatsächliche freie Querschnittsfläche der Flanschbohrung eines Flansches DN 25/PN 40 (DIN 2635);  $d = 28,5 \text{ mm}$ ;  $A = 637,6 \text{ mm}^2$

Hieraus wird deutlich, daß die tatsächliche freie Querschnittsfläche dieses Sensors nur 31,8% von der tatsächlichen Fläche der Nennweite 25 aufweist.

Beurteilen Sie die Größe eines Sensors also immer nach der Größe seines Meßrohres, nie alleine nach der angegebenen Flansch-Nennweite.

**Die hierbei festgestellten Tatsachen sind auch in den folgenden Abschnitten, insbesondere bei der Bewertung von Druckverlustangaben, von Wichtigkeit.**

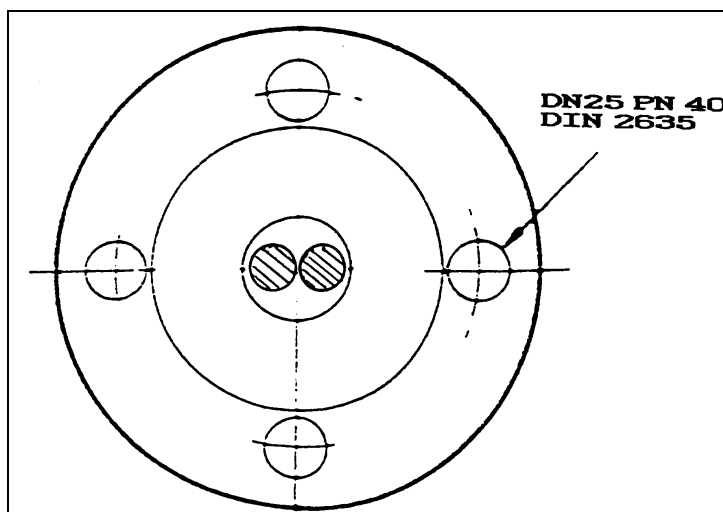


Abbildung 17

## 8. Meßrohr-Wandstärken

Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt beim Stichwort Nennweiten ist auch die Wandstärke der jeweils eingesetzten Meßrohre. Neben dem eingesetzten Meßrohrmaterial hat auch die Rohrwandstärke einen direkten Einfluß auf die Steifigkeit, sprich Flexibilität der Rohre. Die Flexibilität der Rohre wiederum ist, bei Biegeschwingern, verantwortlich für die Ansprechempfindlichkeit des Meßwertaufnehmers auf die beim Durchströmen eines Fluids auftretenden Corioliskräfte. D.h. je flexibler ein Rohr ist, desto größer die Auslenkung ist, desto besser läßt sich diese auswerten und auflösen. Bei gleicher Rohrgröße und Rohrgeometrie erhöht also eine dünnere Rohrwandung den Coriolis-Meßeffect und umgekehrt.

Da auch die Länge der vibrierenden Meßrohre einen Einfluß auf die Meßempfindlichkeit hat, kann man durch eine geschickt ausgewählte Meßrohrgeometrie, unter Beibehaltung möglichst starker Meßrohrwandungen, einen vergleichsweise großen Meßeffect erzielen, ohne daß die Gesamtabmessungen eines Meßwertaufnehmers durch die meßwirksame Rohrlänge aus dem üblichen Rahmen fallen.

Bei einem System, welches als sogenannter Drehschwinger konstruiert ist, kann gegenüber den Biegeschwingern, bei gleichem Meßeffect, eine 2-3 fach höhere Meßwandstärke realisiert werden.

Meßwertaufnehmer mit stärkeren Rohrwandungen können in der Regel auch für höhere Betriebsdrücke eingesetzt werden bzw. weisen höhere Sicherheitsfaktoren zum Berstdruck auf.

Bei der Auswahl eines Meßwertaufnehmers sollte auch aus sicherheitstechnischer Sicht die Wandstärke der Meßrohre eine große Rolle spielen. Da sich die Meßbereiche der verschiedenen Meßwertaufnehmertypen und -ausführungen auch stark überlappen, sollte, soweit möglich, immer der größere Typ gewählt werden (s. auch Druckverluste und Viskositätseinflüsse sowie Meßbereiche). Auch hierbei gilt, da einige Hersteller die Wandstärken in der offiziellen Literatur angeben, andere wiederum nicht, diese auf jeden Fall definitiv zu erfragen.

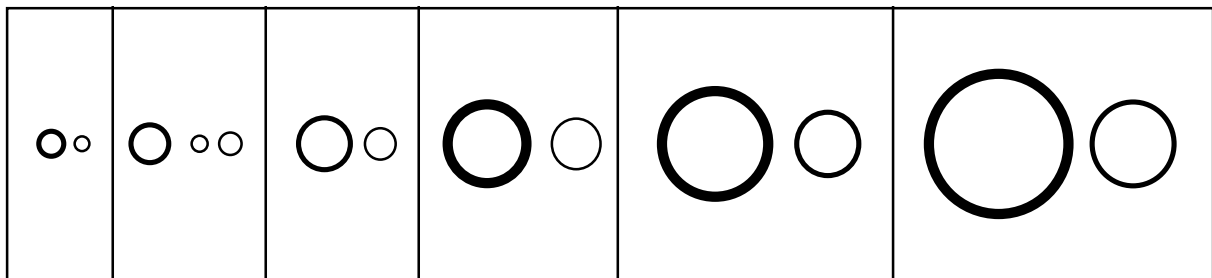


Abbildung 18 Meßrohre

## 9. Druckverluste

Als Druckverlust versteht man im allgemeinen die Druckdifferenz, die zwischen der Ein- und der Auslaufseite eines Meßwertaufnehmers bei durchfließendem Produkt ansteht. Als bestimmende Kriterien dafür gelten:

Die jeweils anstehende volumetrische Durchsatzmenge, die Viskosität des Meßstoffes, die freie Rohrquerschnittsfläche der Sensorrohre und die Rohrform.

$\dot{V}$  = volumetrische Durchsatzmenge  
M = Massedurchsatz  
 $\rho$  = Betriebsdichte

$$\dot{V} = \frac{M}{\rho B}$$

v = Fließgeschwindigkeit (m/s)  
 $\dot{V}$  = volumetrische Durchsatzmenge (m<sup>3</sup>/s)  
A = freie Meßrohr-Querschnittsfläche (m<sup>2</sup>)

$$v = \frac{\dot{V}}{A}$$

Idealerweise würde man bei einem zähflüssigen Meßstoff (hohe Viskosität) einen Meßwertaufnehmer mit möglichst großem, freiem Querschnitt wählen. Das würde jedoch bedeuten, daß man mit einer sehr niedrigen Fließgeschwindigkeit arbeiten würde und als Konsequenz daraus ein vergleichsweise geringer Meßeffect (Corioliskraft) auftritt. Die Messung würde relativ ungenau arbeiten.

In vielen Fällen geht man auch davon aus, daß beispielsweise gerade Meßwertaufnehmerrohre praktisch keinen Druckverlust aufweisen. Diesem Argument sollte man sehr kritisch entgegen treten. Gerade Meßrohranordnungen gelten als relativ steife (unflexible) Geometrien. Es sind in der Regel also hohe Fließgeschwindigkeiten notwendig, um einen bestimmten Meßeffect hervorzurufen.

Hohe Fließgeschwindigkeiten bedeuten andererseits wieder erhöhte Druckverluste, da man diese hohen Fließgeschwindigkeiten nur durch Einsatz kleiner freier Rohrquerschnitte erzielen kann. Es besteht auch die Gefahr der Kavitation (einfach beschrieben, teilweise Verdampfen von Flüssigkeit). Dadurch treten Störungen des Meßsystems auf, die von geringer Verfälschung des Meßwertes bis zum völligen Versagen des Systems reichen können. Dem Problem kann im begrenzten Umfang begegnet werden, indem man den Gegendruck (Auslaufseite des Meßwertaufnehmers) erhöht, wo es möglich ist. In einigen Fällen fordern die Hersteller generell einen bestimmten Gegendruck. Da wo dieser Gegendruck nicht erzeugt werden kann, sollte man den vorgesehenen Lieferanten auf jeden Fall befragen, ob das betreffende Gerät dort problemlos eingesetzt werden kann.

Außerdem ist bei solchen geraden Meßrohranordnungen der typische Meßeffect (Signalausbeute im Verhältnis zum Massedurchsatz) relativ klein. Dies gilt besonders für kompakt erscheinende Geräte mit relativ kurzen meßwirksamen Rohrlängen.

Fazit: Um den Druckverlust möglichst niedrig zu halten, sollte man vom Meßbereich her passende Geräte auswählen, die möglichst große freie Rohrquerschnittsflächen aufweisen. Dabei ist dann die Gewähr gegeben, daß die Druckverluste so gering wie möglich sind. Desweiteren treten aufgrund der großen Querschnitte nur sehr niedrige Fließgeschwindigkeiten auf. Am besten zieht man Druckverlustdiagramme der verschiedenen Anbieter zu Rate

### **Achtung!**

Die Diagramme gelten normalerweise nur für Wasser (Viskosität = 1 cp, Dichte = 1 kg/l). Sollten zwei oder mehrere Gerätetypen den geforderten Meßbereich bei akzeptabler Genauigkeit abdecken, wählen Sie immer das Gerät mit möglichst großem freiem Rohrquerschnitt aus.

## 10. Meßfehler/Meßunsicherheit

Die meisten Anbieter spezifizieren die Genauigkeiten der Massedurchflußmesser unter Angabe der Genauigkeit in % auf den momentanen Durchflußwert bezogen, zuzüglich der sogenannten Nullpunktstabilität, die in absoluten Masse-Durchflußeinheiten (kg/min. gr/sec. etc.) angegeben wird. Die Nullpunktstabilität variiert von Gerätetyp zu Gerätetyp. Aus den beiden Angaben läßt sich die zu erwartende Genauigkeit nach folgender einfacher Formel berechnen:

$$E = + / - \frac{\frac{m_n}{100} \times e_s + N}{m_n} \times 100(\%)$$

E = zu erwartende Meßfehler (Meßunsicherheit) (%)

mn = momentaner Durchflußwert (kg/min.)

es = spezifizierte Genauigkeit (%)

N = Nullpunktstabilität (kg/min.)

### Achtung!

Bitte achten Sie darauf, daß Sie für mn und Ns immer die gleichen Masse-Durchflußeinheiten einsetzen!

Nach dieser Formel läßt sich für jede Gerätetype die Meßgenauigkeit (Meßunsicherheit) bei einer bestimmten Durchsatzmenge errechnen.

### Beispiel:

Durchflußmesser: Typ XYZ

min. Meßbereich: 0-50 gr/min.

max. Meßbereich: 0-1000 gr/min.

Genauigkeit: +/- 0,2 %

Nullpunktstabilität: +/-0,09 gr/min.

Frage: Wie genau arbeitet das Gerät bei einem Durchsatz von 27 gr/min.?

$$E = + / - \frac{\frac{27}{100} \times 0.2 + 0.09}{27} \times 100 = + / - 0,533\%$$

D.h. bei einem Durchsatz von 27 gr/min. beträgt der zu erwartende Fehler +/- 1.1% von 27 gr/min. oder +/- 0,297 gr/min.

## Typische Genauigkeitskurve von Coriolis-Massedurchflußmessern

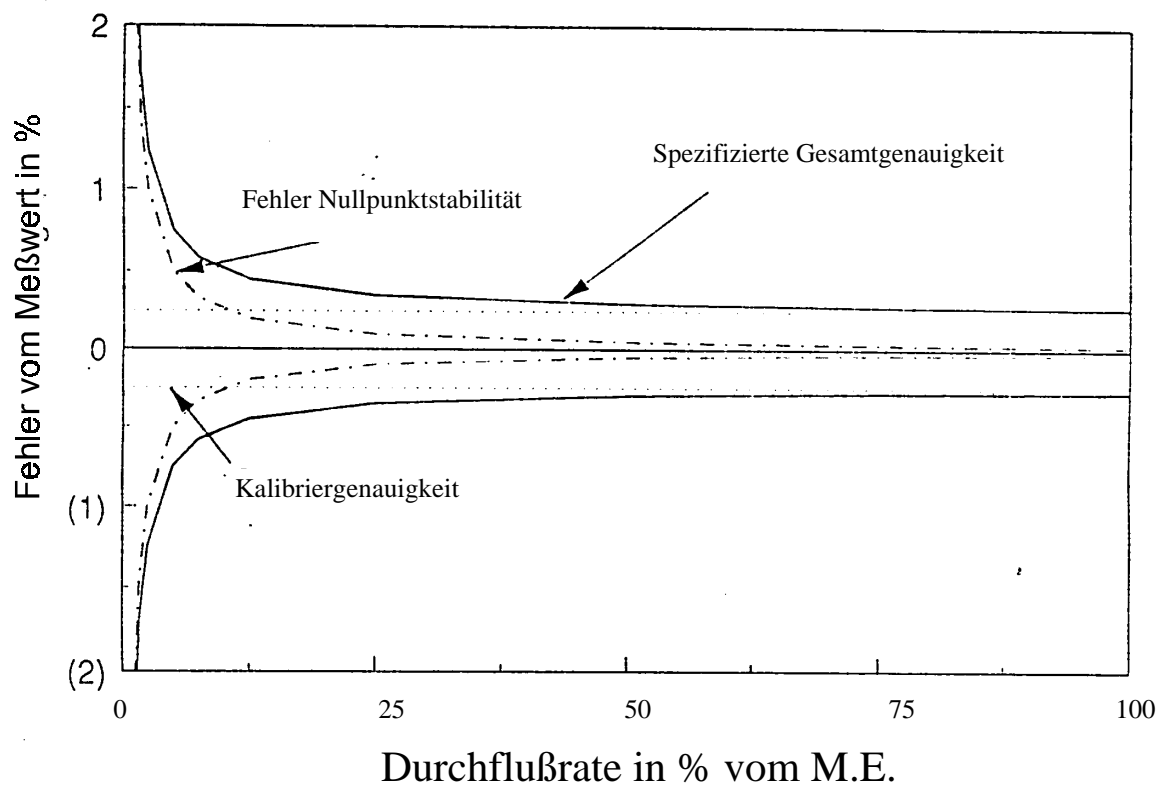


Abbildung 19

## 11. Meßbereich/Meßspannen

Die Meßbereichsangaben sollten jeweils auf die Angabe des kleinstmöglichen Meßbereiches 0-X kg/min. und des größtmöglichen Meßbereiches 0-X kg/min. jeweils für einen Gerätetyp untersucht werden. Dabei steht Meßbereich 0-X kg/min. immer für die Analogausgangsspezifikation von beispielsweise 4-20 mA=0 bis100% Ausgangssignal. Dabei ist es wichtig, auch die angestrebte Genauigkeit beim minimal erforderlichen Durchflußwert zu beachten (siehe Genauigkeit/Meßunsicherheit).

Häufig wird auch von der Meßspanne gesprochen und Sie finden beispielsweise Angaben wie 100:1 dahinter. Was heißt das? Man nimmt dazu den max. Meßbereichsendwert und dividiert diesen durch 100. Damit erhält man den wohl kleinstmöglichen Meßwert für den bestimmten Gerätetyp, wobei allerdings gar nichts über die zu erwartende Genauigkeit bei diesem kleinsten Durchflußwert ausgesagt wird.

Nach der im Abschnitt Meßfehler (Meßunsicherheit) aufgeführten Fehler-Berechnungsformel und dem dort aufgeführten Beispiel ergibt sich folgendes:

$$E = + / - \frac{\frac{10}{100} \times 0.2 + 0.09}{10} \times 100 = + / - 1.1 \%$$

D.h. wenn das betreffende Gerät über eine Spanne von 100:1 betrieben wird, ist beim kleinsten Durchsatz von 10 gr/min. mit einem Fehler von +/-1,1 % oder +/- 0,11 gr/min. zu rechnen.

Um eine einheitliche Beurteilung der Meßspanne durchzuführen, sollten alle Geräte nach der gleichen Betrachtung beurteilt werden. Nur dann ist sichergestellt, daß bei den verschiedensten Fehlerbetrachtungen und Meßspannenangaben der unterschiedlichen Hersteller immer vergleichbare Beurteilungen möglich sind.

## 12. Benetzte Materialien

Die meisten Hersteller liefern die Massedurchflußmesser mit Meßwertaufnehmern, deren benetzte, also mit dem Produkt in Berührung kommende Teile, aus Edelstahl bestehen. In einigen Fällen werden auch Materialien, wie beispielsweise Hastelloy C oder Tantal angeboten. Dabei sollte auf jeden Fall durch Hinterfragung sichergestellt werden, ob auch tatsächlich alle benetzten Teile aus diesem Material bestehen. In allen Geräten werden neben den eigentlichen Meßrohren noch weitere benetzte, also mit dem Produkt in Kontakt stehende Teile, wie Gußstücke mit Umlenkungsbögen, Flansche und auch in einigen Fällen Dichtungen eingesetzt. Es sollte sichergestellt werden, daß auch diese Teile die angestrebte Korrosionsbeständigkeit aufweisen.

Desweiteren sind auch die Verbindungsstellen zwischen den verschiedenen benetzten Konstruktionsteilen zu beachten. Hauptaugenmerk liegt dabei auf benetzten Hartlötstellen, die in Verbindung mit der Prozeßflüssigkeit der Gefahr galvanischer Korrosion ausgesetzt sind. Ein weiterer wichtiger Punkt sind Verbindungsstellen zwischen verschiedenen benetzten Materialien, beispielsweise zwischen Edelstahl und Hastelloy C oder Edelstahl und Titan, etc. Diese sollten auch bezüglich der verwendeten Verbindungsart (Schweißung, Schweißmaterial, Lötung, Lötmitte, usw.) überprüft werden.

Da einige bestimmte Meßwertaufnehmerausführungen spezielle Eigenschaften dieser exotischen Materialien für ihren normalen Betrieb benötigen, sind beispielsweise die Aussagen, wie hohe Korrosionsbeständigkeit, mit Vorsicht anzugeben.

Das Material Titan hat beispielsweise hervorragende schwingungstechnische Eigenschaften und extrem niedrige Temperaturexpansionskoeffizienten, was natürlich dem Ideal der gewünschten Materialeigenschaften für Coriolis-Meßwertaufnehmer entgegenkommt. Titan ist auch beim Einsatz unter oxidierenden Atmosphären gut geeignet, während im Bereich reduzierender Betriebsbedingungen Titan weniger gut geeignet ist.

Das Material Tantal ist schon eines der besser geeigneten Materialien, die einen möglichst breiten Bereich, sowohl unter oxidierender als auch reduzierender Atmosphäre abdecken.

Wie aus dem Diagramm (Abb. 18) ersichtlich, sollte Edelstahl nur in Bereichen eingesetzt werden, in denen keine freien Chlor oder andere Halogen-Ionen auftreten können .

Wenn Edelstahl in Bereichen eingesetzt wird, in denen man mit freiem Chlor oder anderen Halogen-Ionen rechnen muß, kann man davon ausgehen, daß über kurz oder lang, je nach Betriebsbedingungen, mit Lochkorrosion zu rechnen ist. Bei Coriolis-Massedurchflußmessern die nach dem Biegeschwingerprinzip arbeiten, kommt es an den Stellen der höchsten Biegebelastung relativ schnell zum Meßrohrbruch durch Lochkorrosion. Weniger gefährdet sind Systeme bei denen die mechanische Belastung in einen Biegemodus und einen Torsionsmodus aufgeteilt wird, insbesondere auch dann, wenn gleichzeitig dickwandigere Meßrohre verwendet werden.

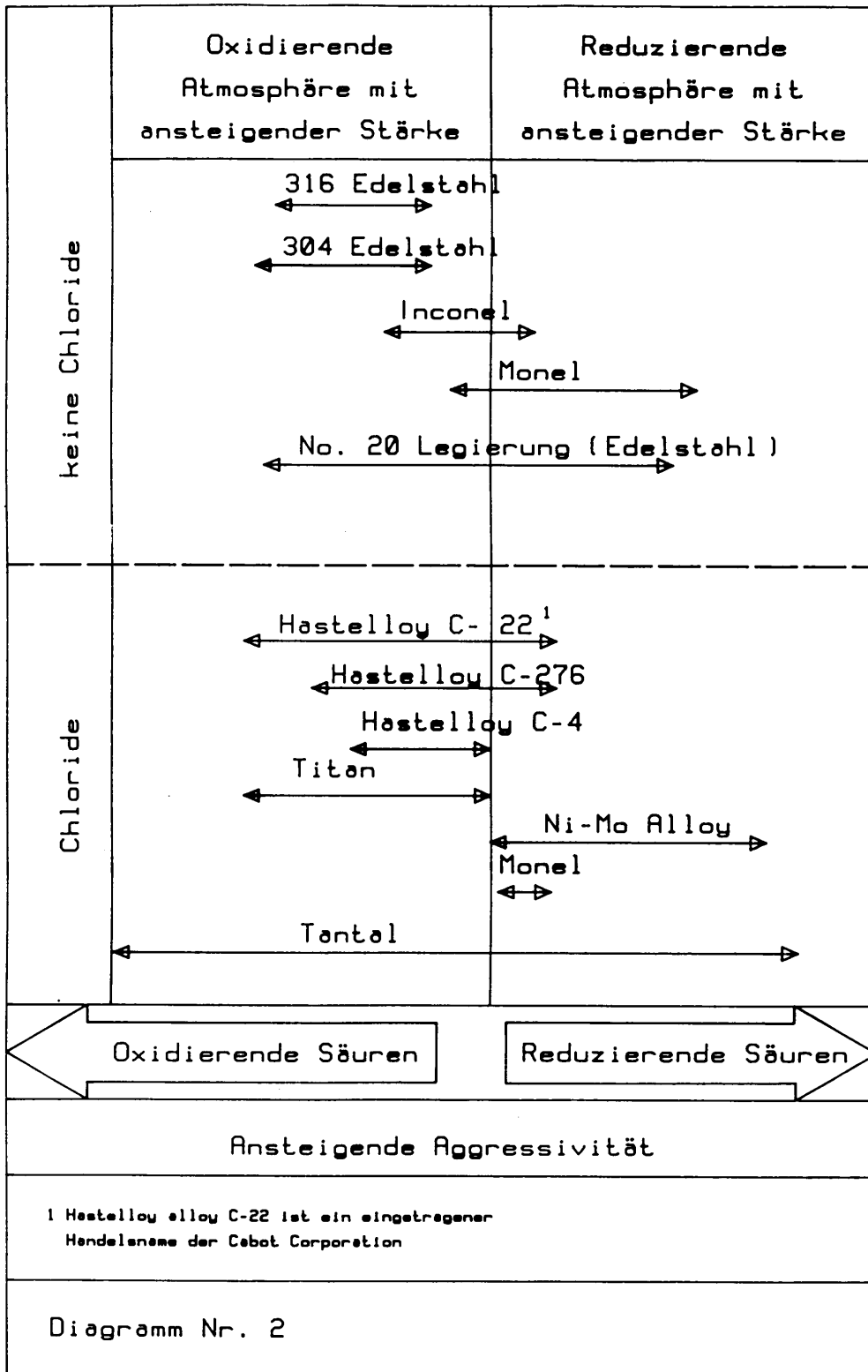


Abbildung 20

## 13. Transmitter

Je nach Hersteller werden die zu den Meßwertaufnehmern gehörenden Transmitter und Auswertelektroniken in verschiedenen Bauformen, wie Feldgehäuse, 19"-Kassette oder Schalttafelbau-Gehäuse angeboten. Bei der Auswahl des Gehäuses spielt daher der jeweilige Bedarf die Hauptrolle.

Die Transmitter haben die Aufgabe, den Meßwertaufnehmer zu speisen, d.h. über die im Meßwertaufnehmer vorhandene, in der Regel elektromechanische Erregereinheit das oder die Meßrohre in Schwingung zu halten. Desweiteren werden die eigentlichen Meßsignale vom Aufnehmer verarbeitet und in die entsprechenden Ausgangssignale proportional zum Massedurchfluß umgewandelt.

Alle Geräte, die erhältlich sind, liefern natürlich als Basisfunktion die Massedurchflußmessung mit einem entsprechenden analogen Ausgangssignal. Da das Coriolis-Meßprinzip auch die Messung der Dichte zuläßt, steht diese Meßgröße u.U. auch als Ausgangsgröße zur Verfügung.

Die Temperatur wird bei allen Meßwertaufnehmern zu Kompensationszwecken ebenfalls gemessen und steht teilweise als Ausgangssignal zur Verfügung.

Je nach Hersteller bieten die Transmitter weitere Funktionen, die von Berechnungsmöglichkeiten verschiedener Parameter, wie Volumendurchfluß oder %-Feststoffkonzentration, errechnet aus den vorhandenen Meßsignalen für Massedurchfluß, Dichte und Temperatur bis zu Spezialfunktionen reichen. Darunter sind u.a. solch hilfreiche Funktionen, wie z.B. Chargendosierung oder PID-Regelung. Die Art und Anzahl der vorhandenen Ausgangskanäle ist von Hersteller zu Hersteller unterschiedlich. Fast jeder Transmitter ist mit einer mehr oder weniger umfangreichen Selbstdiagnostik ausgerüstet.

Die Verkabelung zwischen den Meßwertaufnehmern und dem Transmitter erfordert mehr oder weniger komplizierte Sonderkabel in mehradriger Ausführung. Wie kompliziert ein Kabel ist, läßt sich meistens schon am Preis dieses Kabels abschätzen. Einige Anbieter liefern Gerätekombinationen in sogenannter 2-Leiter-Ausführung. Dabei wird die Signalübertragung zwischen Transmitter (Auswertegerät) in digitaler Form über eine zweiadrige Verbindung durchgeführt. Das dazu nötige Kabel ist relativ preiswert.

Der Nachteil dabei ist, daß die eigentliche Signalverarbeitung/Aufbereitung vor Ort, also direkt am Meßwertaufnehmer, durchgeführt wird. Die dazu notwendige Halbleiter-Elektronik ist also den u.U. widrigen Betriebsverhältnissen der Umgebung ausgesetzt. Es kommt dadurch auch zu stärkeren Einschränkungen in den zulässigen Betriebstemperaturen. Die Bedienbarkeit der Transmitter ist unterschiedlich.

Einige Ausführungen sind "blind", d.h. ohne Bedientastatur und ohne Anzeige aufgeführt. Die Bedienung, d.h. Änderung von Parametern, kann nur mittels eines Handterminals oder über einen PC durchgeführt werden. Andere Geräte verfügen über eine Reihe analoger und digitaler Einstellmöglichkeiten (Potentiometer und DIP-Schalter/BCD-Schalter). Die wohl elegantesten Ausführungen sind mit einer teilweise mehrzeiligen alphanumerischen Digitalanzeige aufgeführt und können über ein zwei- oder dreitastige Tastatur bediengeführt programmiert werden.

Um an dieser Stelle nicht zu tief ins Detail einzudringen, liegt eine Tabelle mit zwei Mustereinträgen bei, die der interessierte Leser für einen eigenen Marktvergleich heranziehen und komplettieren kann .

## 14. Meßwertaufnehmer

Wie bereits an anderer Stelle erwähnt, werden die Meßwertaufnehmer in den verschiedensten Formen und Ausführungen angeboten. Um dem Betreiber die Auswahl des geeigneten Sensors zu erleichtern, liegt die Tabelle "Meßwertaufnehmer-Auswahlkriterien", mit Beispiel, bei. In dieser Tabelle können neben den angestrebten gewünschten Daten die der jeweiligen Anbieter eingetragen werden. Eine komplettierte Tabelle erleichtert den Überblick und erlaubt eine bessere Beurteilung der verschiedenen Fabrikate.

Es ist zu beachten, daß die Betriebsdrücke der eigentlichen Meßrohre in der Regel wesentlich höher liegen als die für die standardmäßig angebotenen Flansche. Höhere Flanschdruckstufen sind in der Regel jedoch auf Wunsch lieferbar.

Aus sicherheitstechnischen Gründen für den Betrieb mit hochgefährlichen Produkten (giftig, explosiv, etc.) bieten einige Lieferanten Meßwertaufnehmer an, die in druckfeste Behälter eingebaut sind. Ein Lieferant, der aus in erster Linie funktionstechnischen Gründen die Meßrohre in einem massiven Stahlrohr eingebaut hat, offeriert diese Tatsache ebenfalls als eine Art Sicherheits- oder Druckbehälter. Die Druckbehälter sind recht kostspielig, relativ schwer und haben entsprechend große Abmessungen. In den meisten Fällen dürfte jedoch eine Berstscheibe im Meßwertaufnehmergehäuse ausreichen, um zusätzliche Sicherheit zu gewinnen. Die beste Gewähr jedoch für einen langlebigen Betrieb ist die richtige Materialwahl für den jeweiligen Einsatzfall und natürlich möglichst dickwandige Meßrohre, damit der Eventualfall gar nicht erst eintritt.

Viele Hersteller bieten Ausführungen für extreme Betriebstemperaturen an, beispielsweise für unter  $-200^{\circ}\text{C}$  oder bis zu  $400^{\circ}\text{C}$ . Die Praxis hat gezeigt, daß dabei die am Sensor notwendigen elektrischen und elektronischen Komponenten im Grenzbereich betrieben werden.

Daher sollten Geräte, die bei extremen Temperaturen betrieben werden, nach Möglichkeit immer auf Betriebstemperatur gehalten werden durch den Einsatz von Heizungen bzw. Kühleinrichtungen. In den meisten Fällen können die Lieferanten auch Heizungen (elektrisch-, flüssig-, oder dampfbeheizt) auch für den explosionsgefährdeten Bereich, mitliefern. Ansonsten besteht die Gefahr, daß durch häufige Temperaturschocks beispielsweise die elektromagnetischen Erreger- oder Sensorspulen beschädigt werden.

Um Geräte im tiefkalten Bereich zu betreiben, sollten die Meßwertaufnehmergehäuse zumindest hermetisch dicht (verschweißt) sein, um Kondensatbildung auf den Meßrohren zu vermeiden. Sind die Gehäuse nicht dicht, entsteht beim Abkühlen des Gehäuses im Inneren ein Unterdruck, der Luft und natürlich Feuchtigkeit einströmen läßt.

Es gibt noch einige weitere Möglichkeiten, um diesem Problem zu entgehen. Dazu sollten die Hersteller konsultiert werden, die für ihre jeweiligen Meßwertaufnehmer-Versionen wohl die passende Lösung parat haben.

Beim Einsatz in extremen Temperaturbereichen ist auch zu beachten, daß die angebotenen Signalkabel für die Betriebstemperaturen geeignet sind. Normales PVC-isoliertes Kabel kann in der Regel nur für  $20^{\circ}\text{C}$  bis  $+85^{\circ}\text{C}$  (ruhender Zustand) eingesetzt werden. Speziell im Anschlußbereich des Sensors wird daher teflon-isoliertes oder anderes temperaturbeständiges Kabel benötigt. Man sollte auch darauf achten, daß die vorhandenen Anschlüsse im temperaturgefährdeten Bereich (Klemmen oder Stecker) für die jeweilige Betriebstemperatur geeignet sind und nicht korrodieren oder anderweitig geschädigt werden.

Zum Abschluß dieses Kapitels noch einige Hinweise zum Einbau der Meßwertaufnehmer in eine Prozeßrohrleitung. Je nach Fabrikat sind für den Einbau spezielle Richtlinien zu beachten. Da es sich bei den Coriolis-Durchflußmessern um Geräte handelt, die mit Frequenzen/Schwingungen arbeiten, versteht es sich fast von selbst, daß von extern eingebrachte Schwingungen u.U. zu Beeinflussungen führen können. Dabei spielt die Betriebsfrequenz der jeweiligen Meßwertaufnehmer im Zusammenhang mit der Frequenz der anlagenbedingten Vibration eine große Rolle. Teilweise sind die Transmitter in der Lage, mittels elektronischem Signalfilter und Signaldämpfung dies zu kompensieren. Jedoch ist es immer ratsam, die Geräte an möglichst vibrationsarmen Stellen zu installieren.

Eine weitere Komponente, die zu Beeinflussungen der Meßergebnisse führen kann, sind mechanische Verspannungen von den Prozeßleitungen her auf Anschlüsse des Meßwertaufnehmers wirkend. Da bei fast allen Fabrikaten, mit einer Ausnahme, die eigentlichen Meßrohre praktisch direkt mit den Flanschen in mechanisch fester Verbindung stehen, können sich diese Verspannungen auch bei recht massiv wirkenden Verstrebungen und Trägerkonstruktionen durchaus negativ auf das Meßergebnis auswirken. Ursache für Verspannungen können sein, schlecht oder gar nicht abgefangene Rohrleitungen, thermische Ausdehnung bzw. Kontraktion, schlechte Ausrichtung der Flansche o.ä. Sorgfältiges Abfangen der Rohrleitungen und genaues Ausrichten der Flansche geben die beste Gewähr für eine einwandfreie Funktion.

## **15. Schlußbemerkung**

Die verschiedenen, auf dem Markt erhältlichen Geräte haben in den meisten Fällen das eine oder andere Merkmal aufzuweisen, welche das jeweilige Gerät für eine bestimmte Anwendung prädestiniert erscheinen läßt. Unter Berücksichtigung der in diesem Artikel genannten Hinweise und den anwendungstechnischen Erfordernissen sollte nicht zuletzt auch der vom Geräteanbieter gebotene Service und die qualifizierte Beratung eine Entscheidungsgrundlage sein.

## Anhang

### Gas- und Flüssigkeitsmessung auch von kleinsten Mengen mit einem Coriolis-Massedurchflußmessgerät

Der einzigartige Coriolismessaufnehmer ermöglicht die Messung von Durchflüssen ab 1 g/min. bei Flüssigkeiten, sowie die Messung von Gasen mit einem Betriebsdruck > 5 bar ohne jegliche Druckkorrektur. Es können auch Durchflüsse bis 2000 kg/min und Drücke bis über 900 bar mit höchster Genauigkeit (+/- 0,2 %) v. Meßwert) gemessen werden. Diese schwierigen Meßaufgaben können mit dem sogenannten "Drehschwinger" Coriolismessaufnehmer gelöst werden, weil bei diesem System, trotz niedrigster Belastung der Meßrohre, relativ große Schwingungsamplituden der Meßrohrschleife erzielt werden können. Große Meßamplituden ermöglichen einen großen Meßeffect und hohe Meßwertstabilität bei externen Störungen. Bei Amplituden in der Größenordnung des Innendurchmessers des Meßrohres spielt die Kompressibilität von Gasen mit niedriger Dichte nahezu keine Rolle, da sämtliche Gasmoleküle durch die Bewegung des Rohres beschleunigt werden. Bei anderen Fabrikaten mit relativ kleinen Amplituden, - z.B. gerades Rohr - wird der Meßeffect stark abhängig von der Gasdichte. Ein ähnlicher Effect ergibt sich bei Flüssigkeits-/gasgemischen, oder Gaseinschlüssen in der Flüssigkeit, wobei hier noch der negative Einfluß der Dämpfung der Schwingbewegung hinzukommt, wenn die Energie im Schwingsystem relativ niedrig ist. Bei dem "Drehschwinger" mit zusätzlicher Schwungmasse ist die Energie im System sehr hoch.

Die relativ große Schwingungsamplitude hat noch den Vorteil, daß generell mit ausreichend großem Meßeffect dickwandige Rohre verwendet werden. Diese erhöhen die Stabilität und geben Sicherheit bezüglich Druck, Abrasion und Korrosion.

Das kreisförmig gebogene und beidseitig eingespannte Rohr ist druckstabil und wird in sich durch die Drehbewegung nicht deformiert. Somit können auch starke Pulsationen, z.B. bei der Verwendung von Kolbenpumpen, das Meßsignal nicht nennenswert beeinflussen.