

FAULGASMENGENMESSUNG

Wilhelm Frey, Leobendorf

1. Einleitung

Energieverbrauch und Energieerzeugung sind auf Kläranlagen ein wichtiges Thema. Der Faulgasvolumenstrom ist für die energetische Betrachtung und Bilanzierung der Schlammfäulung von Bedeutung. Im Rahmen der Auswertung von Betriebsdaten zur Gasproduktion, dem Gasverbrauch in BHKW's und Gasturbinen werden manchmal unplausible Ergebnisse erhalten. In einigen Fällen ist die Ursache schlicht eine fehlerhafte Faulgasvolumenstrommessung. Im folgenden Beitrag wird versucht einen Überblick über eingesetzte Faulgasmengenmessgeräte sowie deren Stärken und Schwächen zu geben.

2. Theoretische Zusammenhänge

Der Durchfluss ist das Volumen das pro Zeiteinheit in/aus einem Behälter strömt. Man kann ihn mit der Gleichung 1 berechnen:

$$Q = \frac{\text{Volumen [m}^3\text{]}}{\text{Zeit [s]}} \quad \text{Gleichung 1}$$

Für praktisch ausgeführte Messungen wird häufig die Definition, Gleichung 2, verwendet:

$$Q = \text{Fläche [m}^2\text{]} \cdot \text{Geschwindigkeit} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad \text{Gleichung 2}$$

Wie diese Definitionen zeigen, ist der Durchfluss also keiner unmittelbaren Messung zugänglich. Er kann aber aus den Messgrößen Zeit, Volumen, Fläche und Strömungsgeschwindigkeit berechnet werden.

Das Volumen gasförmiger Medien ist von der Dichte und damit von der Gaszusammensetzung, dem Druck und der Temperatur abhängig. Diese Kompressibilität ist bei der Durchflussmessung von Gasen unbedingt zu beachten.

Wichtig ist der Massenstrom und nicht der Volumenstrom. Daher wird bei Gasen der Volumenstrom im Normzustand angegeben, d.h. der Volumenstrom wird auf die Normtemperatur (0° Celsius = 273,15 Kelvin) und den Normdruck (1013,25 hPa absolut) umgerechnet.

Bei Messverfahren für Gase bei denen der Volumenstrom in Betriebskubikmeter ermittelt wird, ist daher auch die Messung des Systemdruckes und der Temperatur notwendig.

2.1 Zusammenhang zwischen Druck, Temperatur und Volumen von Gasen

Es gilt:

- Das Volumen eines Gases wird bei konstantem Druck und steigender Temperatur größer

UND

- Das Volumen eines Gases wird bei konstanter Temperatur und steigendem Druck kleiner.

Damit erhält man den allgemeinen Zusammenhang nach Gleichung 3:

$$\frac{\text{Druck [hPa]} \cdot \text{Volumen [m}^3\text{]}}{\text{Temperatur [K]}} = \text{konstant} \quad \text{Gleichung 3}$$

Die Umrechnung von Betriebskubikmeter (Index B) auf Normkubikmeter im Normzustand (Index N) erfolgt mit der Gleichung 4:

$$V_N = V_B \cdot \frac{p_B \cdot T_N}{p_N \cdot T_B} \quad \text{Gleichung 4}$$

Beispiel: In einer Rohrleitung strömt (trockenes) Faulgas mit einem (Über)Druck von 200 hPa und einer Temperatur von 15°C, der Umgebungsluftdruck beträgt 980 hPa. Der Volumenstrom wird mit 40 m³/h (im Betriebszustand) angezeigt. Wie groß ist der Volumenstrom des Gases unter Normbedingungen?

Lösung:

$$V_N = V_B \cdot \frac{p_B \cdot T_N}{p_N \cdot T_B} = 40 \cdot \frac{(980+200) \cdot 273,15}{1013,25 \cdot (273,15+15)} = 40 \cdot 1,104 = 44,2 \text{ m}^3/\text{h}$$

Mit diesem Volumenstrom kann man nun die enthaltene Energie berechnen.

In der Praxis wird man häufig feuchtes Gas antreffen. Die Vorgangsweise zur Umrechnung vom „Betriebszustand-feucht“ auf „Normzustand-trocken“ wird z.B. im Endbericht zum KAN Forschungsprojekt „Garantienachweise für die maschinelle Ausrüstung von Kläranlagen - Blockheizkraftwerke“ [1] dargestellt.

Bei vielen Messsystemen ist die Gasfeuchte eine Ursache für Störungen. Eine wesentliche Verbesserung der Messbedingungen kann durch den Einbau einer Gasentfeuchtung (Kühlfalle) und einer Wiedererwärmung des Faulgases erreicht werden.

3. Volumenstrommessung

Die Messung liefert den Betriebsvolumenstrom. Zur Berechnung des Normvolumenstromes, bzw. des Massenstromes ist zusätzlich die Messung der Zustandsgrößen des Faulgases (Druck, Temperatur) erforderlich.

3.1 Drehkolbengaszähler

Drehkolbengaszähler gehören zur Gruppe der Verdrängungsdurchflussmesser. Die Geräte besitzen bewegliche Kammern, in denen die zu messende Stoffmenge portionenweise "abgemessen" und gleichzeitig weitertransportiert wird. Durch Abzählen der Einzelvolumina bzw. -portionen ergibt sich der Gesamtdurchfluss. Die Messkammer-Elemente werden vom Fluid in der Leitung bewegt. Die Anzahl der Umdrehungen sind ein Maß für das beförderte Volumen. Drehkolbengaszähler zeigen das durchströmende Volumen in Betriebskubikmeter an.

Vorteile:

- Sehr geringe Fehlergrenzen, eichfähig
- Sehr großer Messbereich
- Sehr geringer Druckverlust
- Ein- und Ausströmbedingungen haben keinen Einfluss auf das Ergebnis
- Keine Energieversorgung für die Messeinrichtung

Nachteile:

- Maximale Durchflüsse 600 (bis 1000) m³/h
- Nicht geeignet für verschmutzte und inhomogene Medien, Kondensat
- Bewegte Teile, Verschleiß
- Kondensate sind zu vermeiden (z.B. Heizung)
- Bei verschmutzten Gasen sind Filter vorzuschalten
- Pulsierende Strömung wird induziert
- Bewegte Teile in der Strömung – Einfrier- und Vereisungsgefahr.

In Abbildung 1 ist das Funktionsprinzip dargestellt.

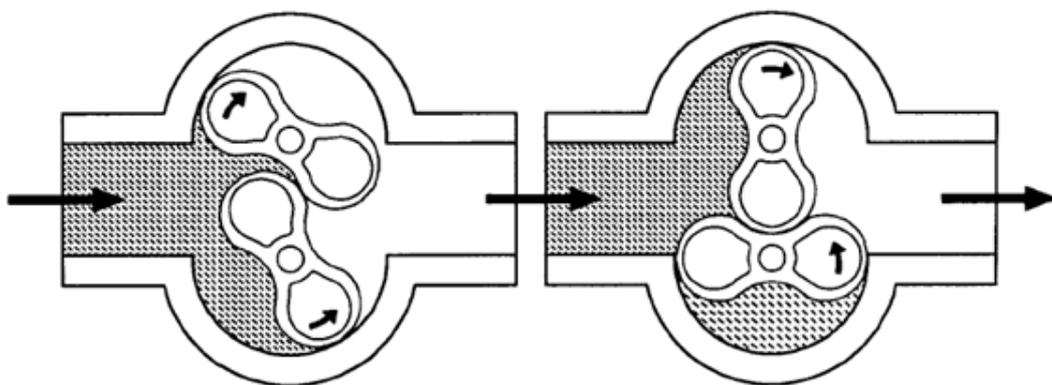


Abbildung 1: Funktionsprinzip Drehkolbengaszähler

3.2 Turbinenradzähler

Turbinenradgaszähler bestehen aus einem Gehäuse in dem ein Turbinenrad läuft. Vor dem Turbinenrad befindet sich ein „Gleichrichter“ um den Gasstrom zu stabilisieren und zu beschleunigen. Das durchströmende Gas treibt das Turbinenrad an, des-

sen Rotationsgeschwindigkeit proportional zur Geschwindigkeit des Gases ist. Die Drehbewegung wird zum Zählwerk übertragen. Turbinenradgaszähler zeigen das durchströmende Volumen in Betriebskubikmeter an.

Vorteile:

- Für sehr große Gasvolumenströme verfügbar
- Eichfähig
- Hohe Messgenauigkeit
- Großer Messbereich
- Geringe Empfindlichkeit gegen Strömungsstöreinflüsse
- Kurze Ein- und Auslaufstrecken realisierbar

Nachteile:

- Pulsationen/Vibrationen führen zu zusätzlichen Messunsicherheiten
- Je nach Bauform nennenswerter Druckverlust
- Bewegte Teile, Verschleiß
- Bei verschmutzten Gasen (Faulgas!) sind Filter vorzuschalten
- Bei aggressiven Medien (z.B. Feuchte, Schwefelwasserstoff) sind korrosionsbeständige Beschichtungen bzw. Materialien erforderlich
- Kondensate sind jedenfalls zu vermeiden (z.B. Ableitung, Kühlen, Heizen)

In Abbildung 2 ist das Funktionsprinzip eines Turbinenradzählers dargestellt.

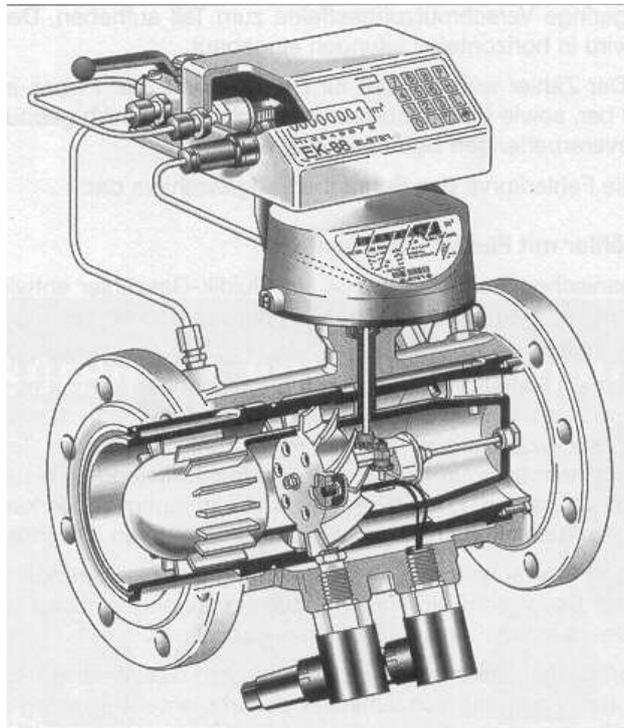


Abbildung 2: Funktionsprinzip eines Turbinenradzählers

3.3 Ultraschalllaufzeit Verfahren

Von den Messköpfen werden Signale in und gegen die Strömungsrichtung ausgesandt und empfangen. Durch die Überlagerung mit der Strömungsgeschwindigkeit sind die Signallaufzeit, die Phasenlage und die Frequenz der Signale in und gegen die Strömungsrichtung nicht gleich.

Als Ergebnis der Auswertung erhält man die über den Signallaufweg (Linie) gemittelte Strömungsgeschwindigkeit. Bei radialsymmetrischem Strömungsprofil entspricht die längs eines Durchmessers gemittelte Geschwindigkeit der über die Fläche gemittelten Geschwindigkeit. Neuere Systeme arbeiten bei größeren Nennweiten mit zwei Messpfaden um die Genauigkeit zu verbessern.

Vorteile:

- Es treten keine zusätzlichen Druckverluste durch Einbauten auf
- Einbau in geneigte und senkrechte Leitungen möglich
- Großer Messbereich
- Weitgehend vibrationsunempfindlich
- Bei neuen Geräten kann auch der Methangehalt durch Messung der Schallgeschwindigkeit und der Temperatur bestimmt werden

Nachteile:

- Empfindlich auf unsymmetrisches Strömungsprofil
- Ein- und Auslaufstrecken, oder Strömungsgleichrichter erforderlich
- Ablagerungen an den Sensoren/Wänden stören
- (Noch) wenig Erfahrung mit Faulgas

In Abbildung 3 ist das Funktionsprinzip des Ultraschall-Laufzeitverfahrens dargestellt.

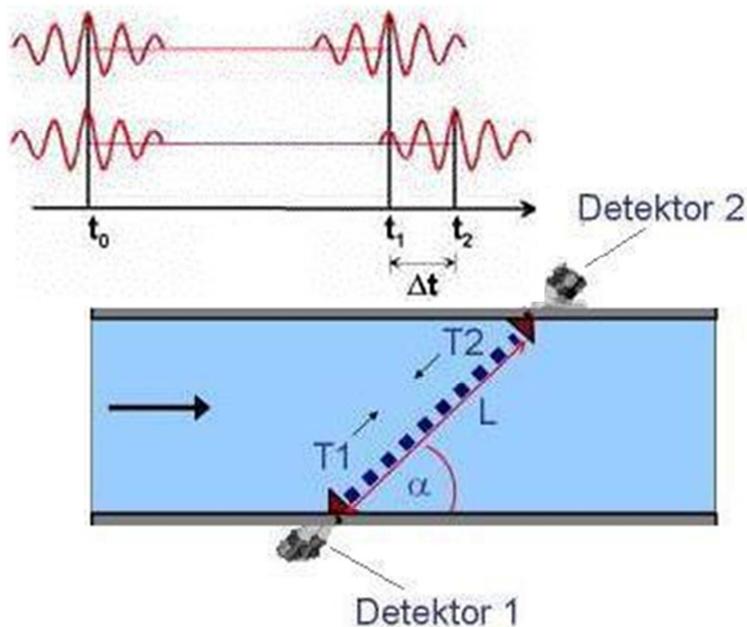


Abbildung 3: Funktionsprinzip des Ultraschall-Laufzeitverfahrens

3.4 Staudrucksonde

Die Funktion basiert auf einer Differenzdruckmessung. Im Staurohr sind zwei Messkammern untergebracht. Auf der Vorderseite wird der Plusdruck und auf der Rückseite der Minusdruck gemessen. Die Bohrungen in den Messkammern sind in experimentell ermittelten Abständen angeordnet. Auf der Vorderseite wird die Strömungsgeschwindigkeit durch den Staukörper auf Null abgebremst, wodurch hier ein höherer Druck gemessen wird als auf der Rückseite. Aus dem sich einstellenden Differenzdruck kann die Strömungsgeschwindigkeit und damit der Volumenstrom berechnet werden.

Vorteile:

- Einbau in geneigte Leitungen möglich
- Kostengünstige Installation
- Geringer Druckverlust
- Keine beweglichen Teile

Nachteile:

- Schmutzpartikel können zu Verstopfungen führen
- Schmutzfilter vorschalten
- Große Ein- und Auslaufstrecken erforderlich
- Kleiner Messbereich.
- Nichtlineare Kennlinie
- Pulsationen stören die Messung
- Tendenziell größere Messabweichungen

In Abbildung 4 ist die Durchflussmessung mit einer Staudrucksonde dargestellt.

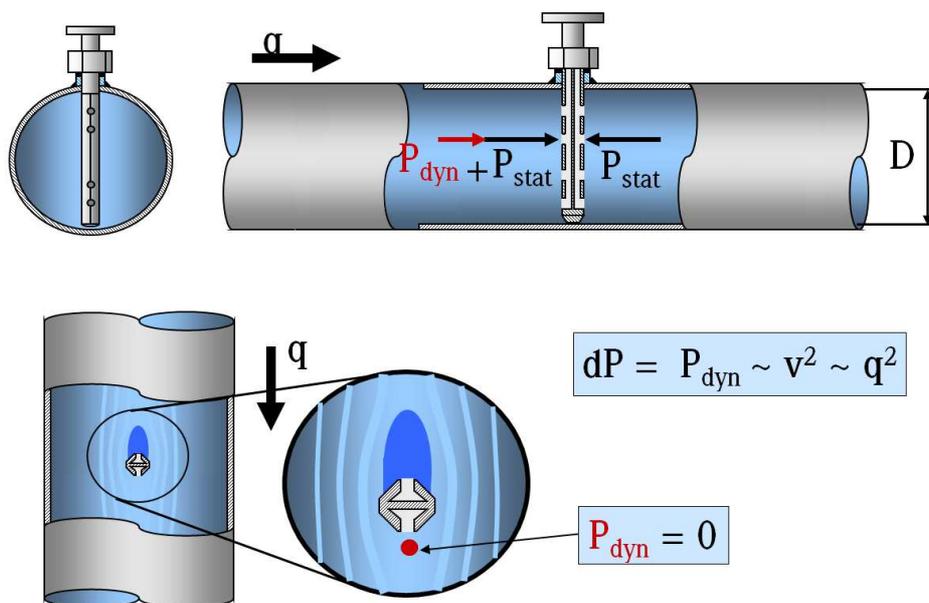


Abbildung 4: Durchflussmessung mit einer Staudrucksonde (Endress&Hauser)

3.5 Wirbelablösefrequenz

Das Messprinzip beruht auf dem Effekt, dass bei der Umströmung eines Staukörpers hinter diesem Wirbel im Fluid entstehen. Diese Wirbel lösen sich wechselseitig hinter dem Staukörper ab. Die Frequenz mit der sich die Wirbel ablösen ist proportional der Strömungsgeschwindigkeit. Der Abstand zwischen zwei Wirbeln ist konstant, somit kann jedem Wirbel ein definiertes Volumen zugeordnet werden (Kalibrierung im Werk). Gemessen werden die zwischen den Wirbeln entstehenden (sehr kleinen) Druckdifferenzen.

Vorteile:

- Unempfindlich gegen Schwingungen
- Keine bewegten Teile in der Strömung
- Keine Nachkalibrierung vor Ort erforderlich
- Kein Verschleiß

Nachteile:

- Pulsationen im Fluid verursachen Messfehler
- Ausgeprägtes turbulentes Strömungsprofil notwendig ($Re > 20.000$)
- Lange Ein- und Auslaufstrecken notwendig
- Empfindlich auf Ablagerungen, Kondensate

In der Abbildung 5 ist das Funktionsprinzip einer Wirbelablösefrequenzmessung dargestellt.

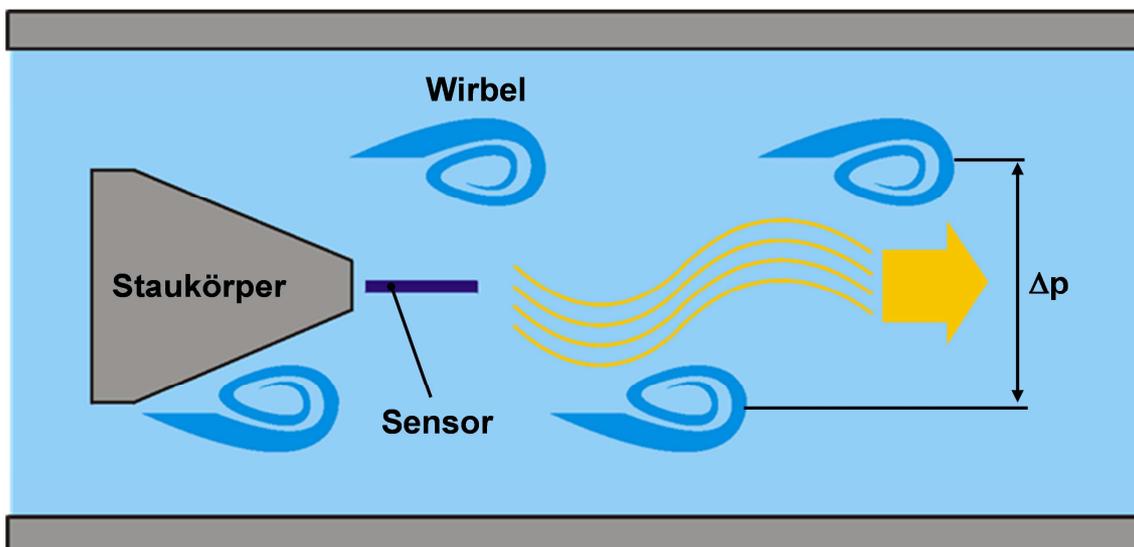


Abbildung 5: Funktionsprinzip Wirbelablösefrequenzmessung (Endress&Hauser)

3.6 Blenden, Düsen, Venturirohr

Das Messprinzip beruht auf dem Energieerhaltungssatz und der Kontinuitätsgleichung. Danach muss, wenn durch eine Verengung die Strömungsgeschwindigkeit (kinetische Energie) erhöht wird, eine andere Energie, hier die Druckenergie, verringert werden. Zur Bestimmung des Volumenstromes ist der Differenzdruck, die Gas-temperatur und der Absolutdruck zu messen.

Durch Messung des Differenzdrucks lässt sich bei bekannter Querschnittsgeometrie der Volumenstrom berechnen. Drosselgeräte (Blenden, Düsen und Venturirohre sind in EN ISO 5167 [2] genormt.

Die Messung setzt definierte Strömungsverhältnisse voraus. Durch die Rohrleitungsführung und Einbauten werden die Strömungsprofile verzerrt. Die Güte einer Messung hängt weitgehend von den Strömungsverhältnissen ab.

Die am Drosselgerät anstehenden Drücke werden über einzelne Bohrungen oder über eine Ringkammer (genauer aber auch teurer) abgegriffen. Die Druckentnahmerohrleitungen bzw., Schläuche sind so zu verlegen, dass anfallendes Kondensat wieder in das Rohr zurückfließen kann.

Das Durchmesser Verhältnis bestimmt, in Abhängigkeit des Volumenstroms, den sich einstellenden Wirkdruck und den bleibende Druckverlust. Das Durchmesser Verhältnis d/D wird aus dem kleinsten Durchmesser d der Drosselöffnung und dem Innendurchmesser D des Einlaufrohres berechnet. Bestimmt wird dieses Verhältnis durch den minimal zu messenden Durchfluss und der dabei zu erreichenden Messunsicherheit. Bei kleinem Durchmesser Verhältnis d/D tritt bei gleichem Volumenstrom ein deutlich größerer Differenzdruck auf. Dadurch steigt auch der bleibende Druckverlust (Energieverlust).

Vorteile

- Sehr geringe Messabweichungen
- Genormte Ausführungen
- Einfache Konstruktion
- Einbaulage egal
- Langzeitstabil
- Keine beweglichen Teile

Nachteile

- Kleiner Messbereich
- Bleibender Druckverlust relativ hoch
- Exakte Fertigung notwendig
- Verschmutzungen verursachen Messabweichungen
- Lange Ein- und Auslaufstrecken erforderlich

In Abbildung 6 ist das Prinzip eines Drosselgerätes dargestellt.

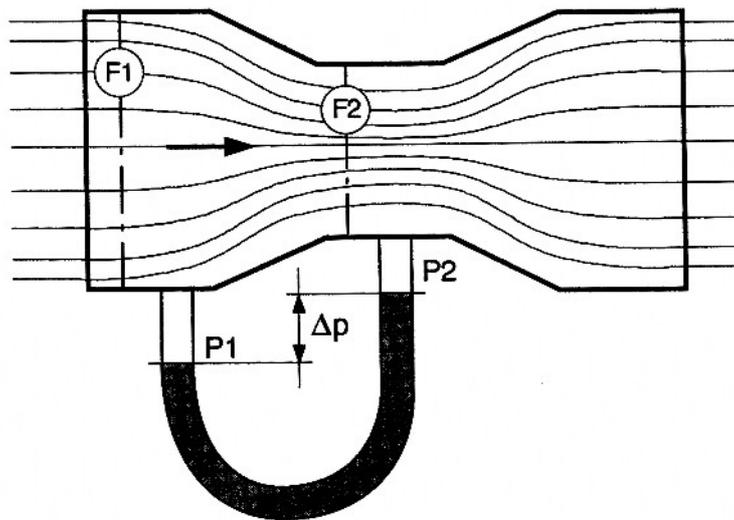


Abbildung 6: Aufbau eines Drosselgerätes

4. Massenströmmessung

Das Messprinzip ermöglicht direkt eine Ermittlung der Masse die pro Zeiteinheit durch die Messstelle durchströmt. Aus dem Massenstrom ist die Berechnung des Volumenstromes im Normzustand ohne Messung des Betriebsdruckes und der Betriebstemperatur möglich.

4.1 Coriolis Massendurchflussmessung

Das Messprinzip beruht auf dem Coriolis-Effekt. Dieser besagt, dass bei Überlagerung von drehender und geradliniger Bewegung Trägheitskräfte auftreten. Die Umsetzung in der Praxis benutzt definiert schwingende Rohre, die vom Fluid durchströmt werden. Einlaufseitig wird die Schwingung gebremst, auslaufseitig wird sie beschleunigt. Die, auf den im Rohr strömenden Massedurchfluss, wirkenden Trägheitskräfte verursacht eine Verbiegung des Messrohres. Diese (sehr kleine) Messrohrverformung wird mit Sensoren erfasst und daraus der Massedurchfluss berechnet. Haupteinsatzgebiet des Verfahrens sind die industrielle Verfahrenstechnik und abrechnungsrelevante Durchflussmengen.

Vorteile:

- Massedurchfluss (durch die Phasenverschiebung)
- Dichtebestimmung (durch die Frequenz)
- Unabhängig von Ein- und Auslaufstrecken
- Unabhängig von Druck und Temperatur
- Bei Doppelrohrbauform unabhängig von äußeren Schwingungen
- Kein Verschleiß

Nachteile:

- Sehr hohe Investitionskosten
- Empfindlich auf Ablagerungen, Kondensate
- Maximal DN 100
- Wenig Erfahrung mit Faulgas

In der Abbildung 7 ist das Funktionsprinzip eines (Doppelrohr) Coriolis Massendurchflussmessers dargestellt.

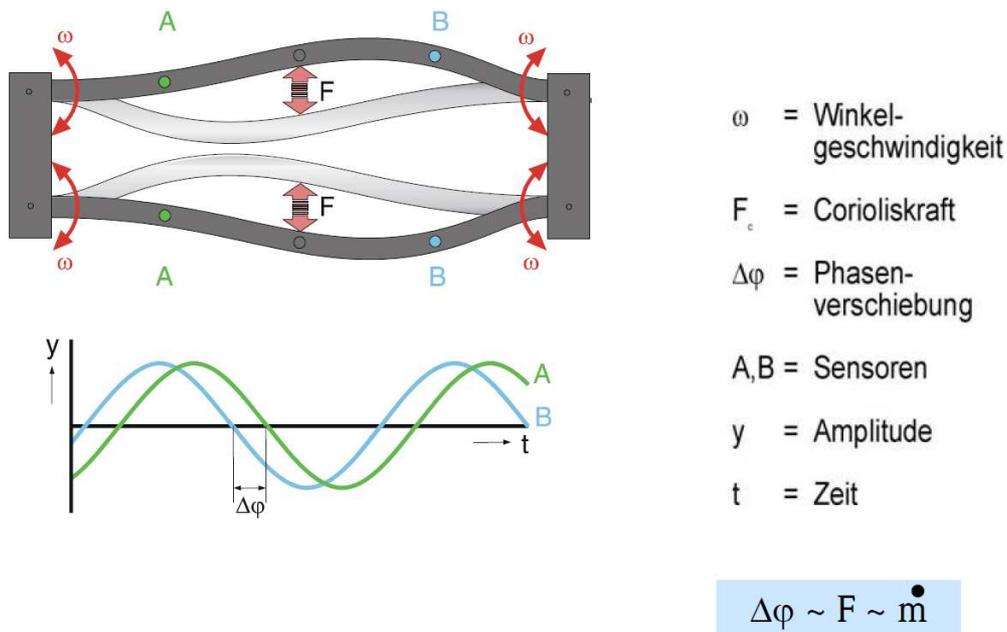


Abbildung 7: Coriolis Massendurchflussmesser (Endress&Hauser)

4.2 Thermische Massendurchflussmessung

Das an einem beheizten Sensor vorbeiströmende Gas kühlt diesen ab. Die Abkühlung (Wärmeabgabe) ist von der Strömungsgeschwindigkeit der Gasmoleküle, den physikalischen Eigenschaften des Gases (spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Gaszusammensetzung) und der Differenz zwischen Sensor- und Gastemperatur abhängig. Üblicherweise werden ein beheizter und ein unbeheizter Sensor nebeneinander angeordnet. Zur Messwertbildung werden die Differenztemperatur ΔT , die sich zwischen dem beheizten und dem unbeheizten Fühler einstellt und die Heizleistung herangezogen. Gemessen wird die Gasmasse pro Zeit (Massenstrom). Ist die Zusammensetzung des Gases und damit die Dichte bekannt, kann der Volumenstrom berechnet werden.

Zur Sicherstellung des Messergebnisses muss das Medium mit all seinen Eigenschaften bekannt sein und sollte keinen Schwankungen in der Zusammensetzung unterliegen. Bei der Messung von Faulgas mit schwankender Zusammensetzung sind Messunsicherheiten zu erwarten.

Die Positionierung des Sensors ist extrem wichtig. Es wird jedenfalls empfohlen die optional verfügbaren Einbauarmaturen des Herstellers zu verwenden.

Vorteile:

- Keine beweglichen Teile
- Vernachlässigbarer Druck- und Energieverlust
- Weitgehend schmutzunempfindlich
- Großer Messbereich: $Q_{min} : Q_{max} = 1 : 50$
- Erfassen von Kleinstmengen (Schleichmengenerfassung) möglich
- Wenig Wartung und Verschleiß
- Weitgehend vibrationsunempfindlich

Nachteile:

- Sehr Aufwändige Justierung durch den Hersteller
- Der beheizte und der unbeheizte Sensor dürfen sich nicht beeinflussen
- Bei Änderung der Messstellengeometrie ist eine Nachkalibrierung durch den Hersteller erforderlich. (Neuermittlung der Kalibrierparameter)
- Beim Nichteinhalten der notwendigen (großen) Einbaulängen sind Strömungsgleichrichter erforderlich
- Messwertkontrolle nach dem Einbau aufwändig
- Relativ hohe Investitionskosten

In Abbildung 8 ein thermischer Massendurchflussmesser dargestellt.

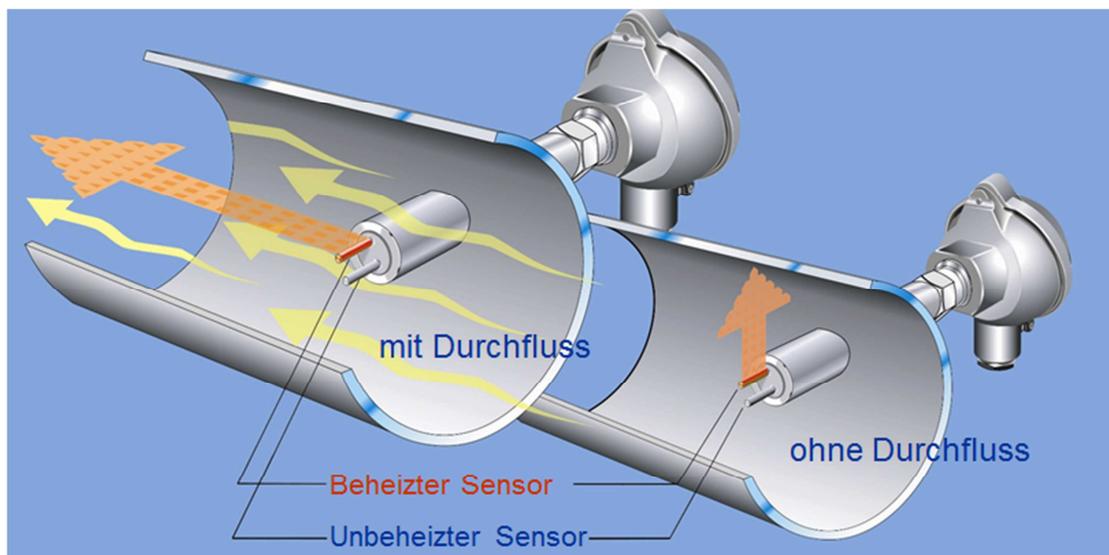


Abbildung 8: Thermischer Massendurchflussmesser (Binder GmbH)

5. Literatur

- [1] FREY W. (2010): Endbericht zum KAN Forschungsprojekt „Garantienachweise für die maschinelle Ausrüstung von Kläranlagen - Blockheizkraftwerke“ entnommen werden (www.kan.at → KAN Materialien → Berichte; http://www.kan.at/KAN.aspx_param_target_is_84630_and_Title_is-Berichte.v.aspx)
- [2] EN ISO 5167 Teil 1-4:2003: Durchflussmessung von Fluiden mit Drosselgeräten in voll durchströmten Leitungen mit Kreisquerschnitt

Verfasser:

Dipl.-Ing. Dr. Wilhelm Frey
Abwassertechnische **A**usbildung und **B**eratung
Leobendorf / Hofgartenstraße 4/2
A-2100 Korneuburg
e-mail: aab.frey@aon.at
internet: www.aabfrey.com