

FAULGASMENGMESSUNG

Wilhelm Frey

INHALT

- ⇒ Allgemeines
- ⇒ Volumenstrommesser
 - Drehkolbengaszähler
 - Turbinenradzähler
 - Ultraschall - Laufzeitmessung
 - Drosselgeräte (Blende, Düse, ...)
- ⇒ Massendurchflussmesser
 - Thermischer Massendurchflussmesser

WARUM WIRD DER FAULGASDURCHFLUSS GEMESSEN?

- ⇒ Der **Faulgasvolumenstrom** ist für die energetische Betrachtung und Bilanzierung der Kläranlage von Bedeutung.
- ⇒ Ermittlung der Eigenstromversorgung (energieautarke Kläranlage, Benchmarking, ...)
- ⇒ Bewertung von Blockheizkraftwerken, Kesselanlagen und Gasturbinen

ALLGEMEINES

- ⇒ Das Volumen gasförmiger Medien ist von der **Dichte** und damit vom Druck und der Temperatur abhängig. Diese **Kompressibilität** ist bei der Durchflussmessung von Gasen zu beachten.
- ⇒ Wichtig ist der **Massenstrom** und nicht der Volumenstrom. Daher wird bei Gasen der **Volumenstrom im Normzustand** angegeben, d.h. es wird der Volumenstrom auf die **Normtemperatur (0° Celsius; 273 Kelvin)** und den **Normdruck (1,013 bar absolut)** umgerechnet.
- ⇒ Bei Messverfahren für Gase bei denen der Volumenstrom in **Betriebskubikmeter** ermittelt wird, ist daher auch die Messung des Systemdruckes und der Temperatur erforderlich.

Zusammenhang zwischen Druck p, Temperatur T und Volumen V von Gasen

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{konstant} \quad T \text{ [Kelvin] ... absolute Temperatur}$$

$$\frac{p \cdot V}{t + 273} = \text{konstant} \quad t \text{ [}^\circ\text{C]... Temperatur in Grad Celsius}$$

Die **Umrechnung** von **Betriebskubikmeter** auf **Normkubikmeter** erfolgt mit der Gleichung:

$$V_N = V_B \cdot \frac{p_B \cdot T_N}{p_N \cdot T_B}$$

MESSEINRICHTUNGEN FÜR GASE

⇒ VOLUMENSTROMMESSUNG

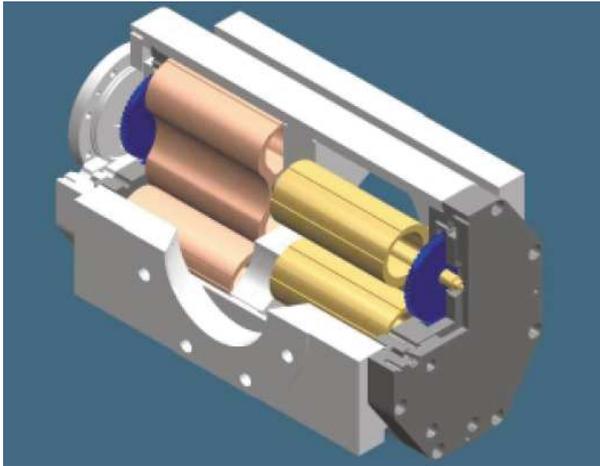
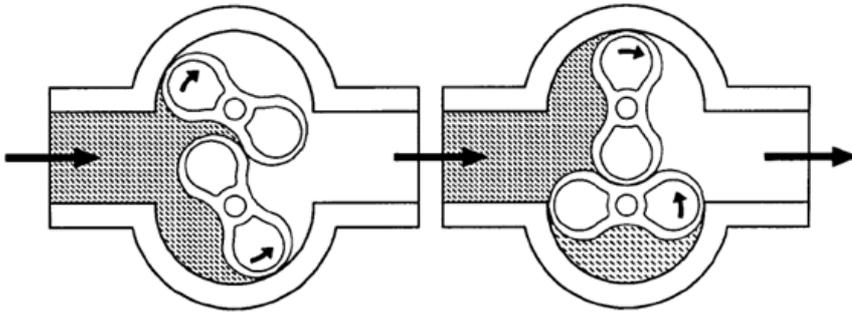
- Die Messung liefert den **Betriebsvolumenstrom**. Zur Berechnung des **Normvolumenstromes**, bzw. des **Massenstromes** ist zusätzlich die Messung der **Zustandsparameter** (Druck, Temperatur) erforderlich.

⇒ MASSENSTROMMESSUNG

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

VERDRÄNGUNGSDURCHFLUSSMESSER

Ausführungsbeispiel: Drehkolbenzähler



VERDRÄNGUNGSDURCHFLUSSMESSER

⇒ Die Geräte besitzen bewegliche **Kammern**, in denen die zu messende Stoffmenge portionenweise "abgemessen" und gleichzeitig weitertransportiert wird. Durch **Abzählen der Einzelmessungen** bzw. -portionen ergibt sich der Gesamtdurchfluss. Die Messkammer-Elemente (Zahnräder, Kolben, Schraubenspindeln, Taumelscheiben, usw.) werden vom Druck in der Leitung bewegt. Die **Anzahl der Umdrehungen** sind ein Maß für das beförderte Volumen.

VERDRÄNGUNGSDURCHFLUSSMESSER

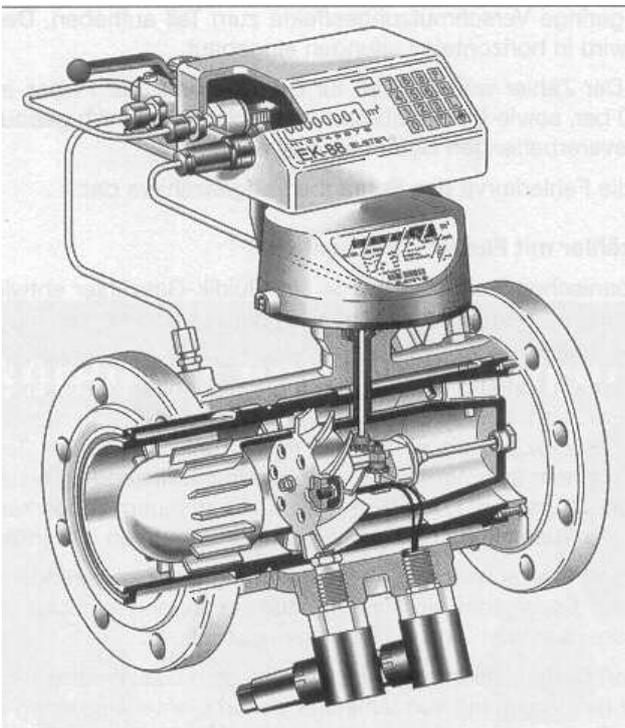
Vorteile:

- ⇒ Sehr geringe Fehlergrenzen, **eichfähig**
- ⇒ Großer Messbereich
- ⇒ **Geringer** Druckverlust
- ⇒ Ein- und Ausströmbedingungen haben keinen Einfluss auf das Ergebnis

Nachteile:

- ⇒ Maximale Durchflüsse 600 (bis 1000) m³/h
- ⇒ Bewegte Teile in der Strömung
- ⇒ Pulsierende Strömung wird induziert
- ⇒ Nicht geeignet für verschmutzte und inhomogene Medien, Kondensate stören, Einfrier- und Vereisungsgefahr (Filter vorschalten, Heizen, Kühlfalle)
- ⇒ Bei aggressiven Medien (z.B. Schwefelwasserstoff) sind korrosionsbeständige Beschichtungen bzw. Materialien erforderlich
- ⇒ Tendenziell teurer als andere Verfahren.

TURBINENRADZÄHLER



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, dessen Rotationsgeschwindigkeit proportional zur Geschwindigkeit des Gases ist. Die Drehbewegung wird auf ein Zählwerk übertragen.
- ⇒ Turbinenradgaszähler zeigen das durchströmende Volumen in Betriebskubikmeter an.

TURBINENRADZÄHLER

Vorteile:

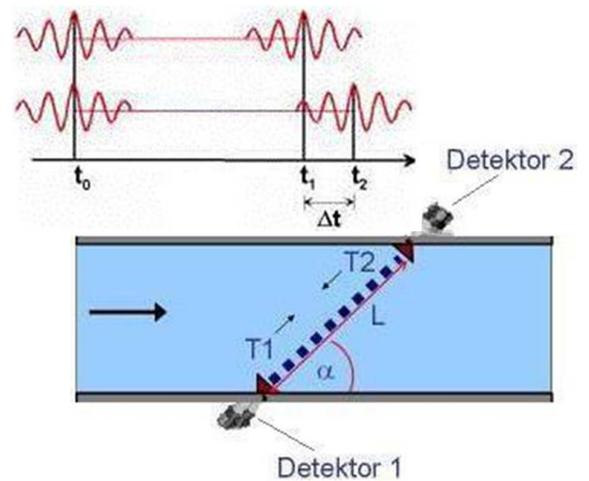
- ⇒ Für sehr **große** Gasvolumenströme verfügbar
- ⇒ Hohe Messgenauigkeit, großer Messbereich, **eichfähig**
- ⇒ Geringe Empfindlichkeit gegen Strömungsstöreinflüsse
- ⇒ Kurze Ein- und Auslaufstrecken realisierbar

Nachteile:

- ⇒ Pulsierende Strömungen verursachen eine zusätzliche Messunsicherheit
- ⇒ Je nach Bauform nennenswerter Druckverlust
- ⇒ Bewegte Teile in der Strömung
- ⇒ Nicht geeignet für verschmutzte und inhomogene Medien, Kondensate stören, Einfrier- und Vereisungsgefahr (Filter vorschalten, Heizen, Kühlfalle)
- ⇒ Bei aggressiven Medien (z.B. Schwefelwasserstoff) sind korrosionsbeständige Beschichtungen bzw. Materialien erforderlich

ULTRASCHALL - LAUFZEIT

- ⇒ Durch die Überlagerung mit der Strömungsgeschwindigkeit ist die Signallaufzeit der Signale in und gegen die Strömungsrichtung nicht gleich.
- ⇒ Als Ergebnis der Auswertung der Laufzeitdifferenz erhält man die über den Signallaufweg (Linie) gemittelte Strömungsgeschwindigkeit.



Ultraschall - Laufzeitverfahren

Vorteile:

- ⇒ Es treten keine zusätzlichen Druckverluste durch Einbauten auf
- ⇒ Einbau in geneigte und senkrechte Leitungen möglich.
- ⇒ Großer Messbereich
- ⇒ Weitgehend vibrationsunempfindlich
- ⇒ Bei neuen Geräten wird der Methangehalt bestimmt

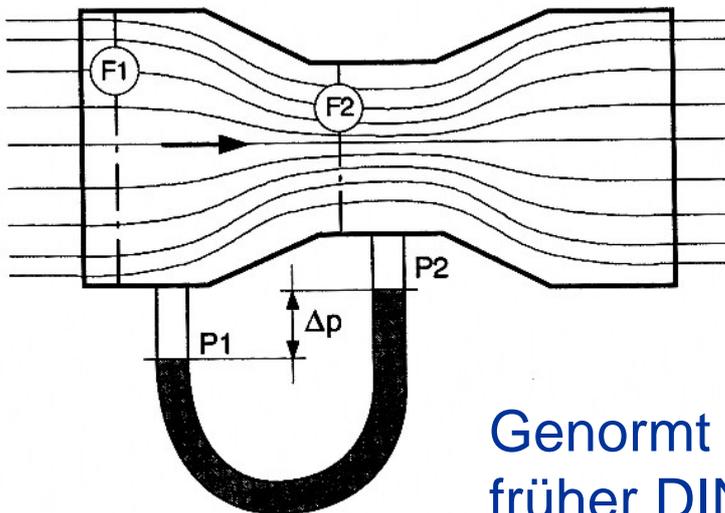
Nachteile:

- ⇒ Tendenziell höhere Messabweichungen
- ⇒ Empfindlich auf unsymmetrisches Strömungsprofil
- ⇒ Ablagerungen an den Sensoren/Wänden stören
- ⇒ (Noch) wenig Erfahrung mit Faulgas

DROSSELGERÄTE - Aufbau

⇒ ENERGIEERHALTUNGSSATZ

POTENTIELLE + KINETISCHE + DRUCKENERGIE = KONSTANT



Genormt in EN ISO 5167
früher DIN 1952

DROSSELGERÄTE - Funktion

- ⇒ 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.
- ⇒ Durch Messung des **Differenzdrucks** lässt sich bei bekannter Querschnittsgeometrie der Volumenstrom berechnen.
- ⇒ 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.

DROSSELGERÄTE – Funktion (1)

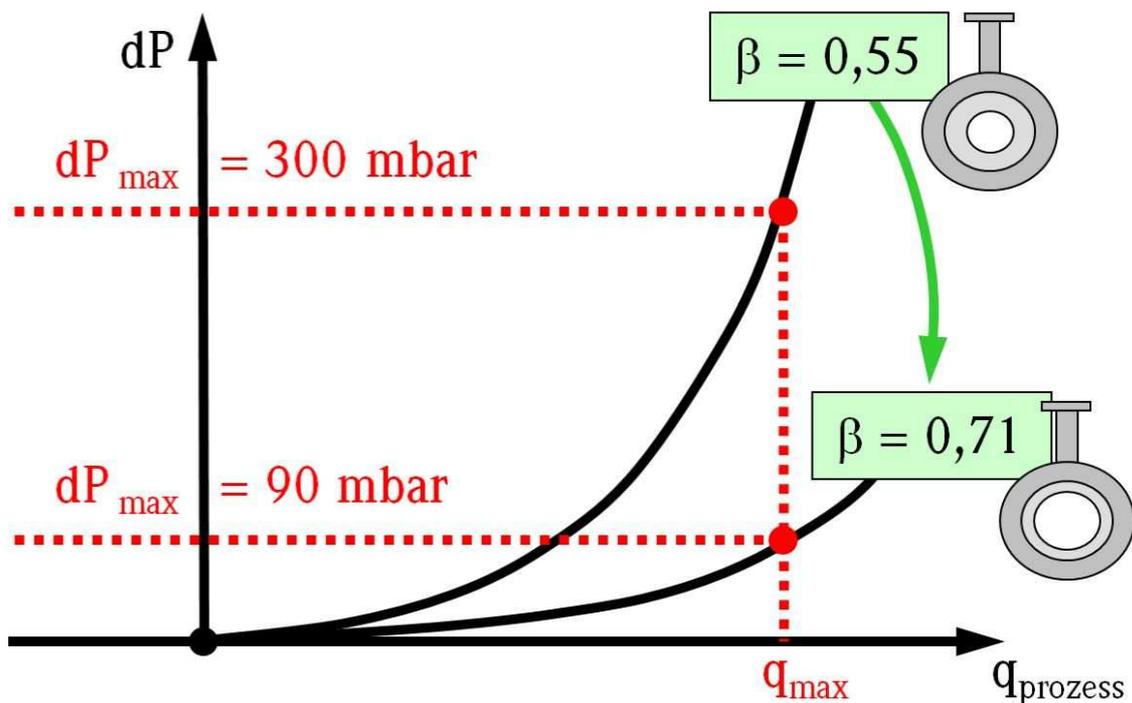
- ⇒ Zur Bestimmung des Volumenstromes ist der Differenzdruck, die Gastemperatur und der Absolutdruck zu messen.
- ⇒ Die am Drosselgerät anstehenden Drücke werden über einzelne Bohrungen oder über eine Ringkammer (genauer, teurer) abgegriffen.
- ⇒ Die Druckentnahmerohrleitungen bzw., Schläuche sind so zu verlegen, dass anfallendes Kondensat wieder in das Rohr zurückfließen kann. Im Winter ist eine Begleitheizung sinnvoll.
- ⇒ Die erforderlichen Beruhigungsstrecken bewegen sich je nach Gestaltung der Einlaufseite zwischen 10 bis 34 D.

DROSSELGERÄTE – Funktion (2)

- ⇒ 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)

DROSSELGERÄTE:

Durchmesser – Volumenstrom - Differenzdruck

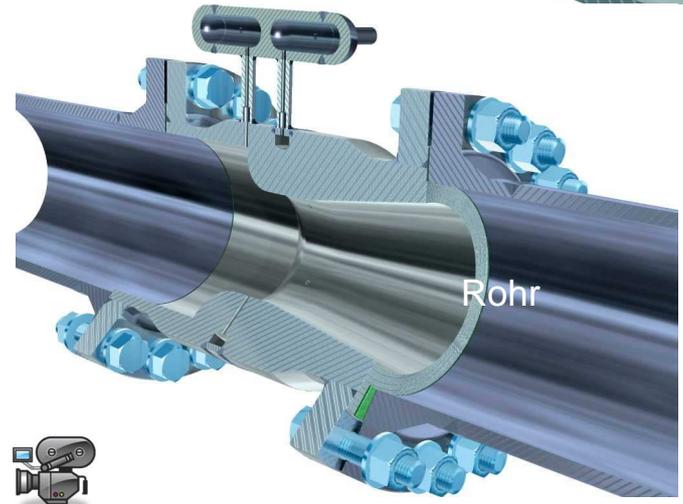
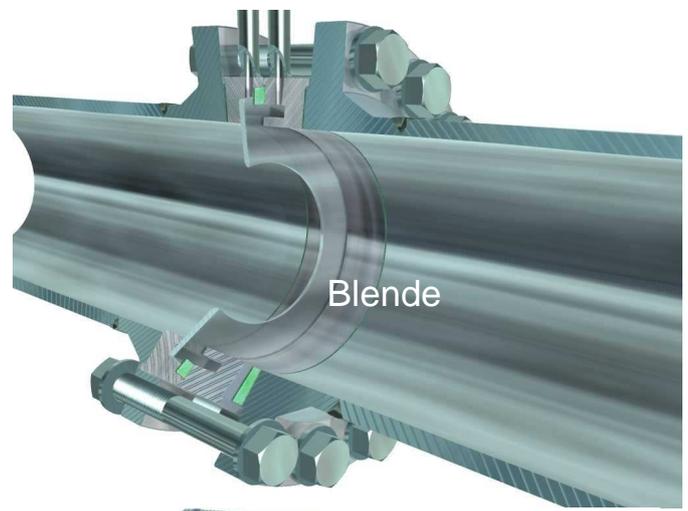
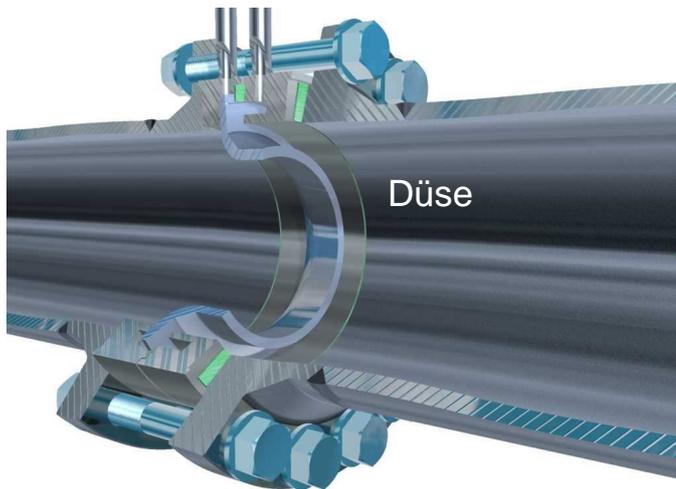


DROSSELGERÄTE – Funktion (3)

⇒ Der Wirkdruck steigt quadratisch mit dem Durchfluss. Bei dreifachem Durchfluss (z.B. $100 \text{ m}^3/\text{h} \Rightarrow 300 \text{ m}^3/\text{h}$) tritt der neunfache (!) Wirkdruck (z.B. $10 \text{ hPa} \Rightarrow 90 \text{ hPa}$) auf. Daraus ist ersichtlich, dass nur ein kleiner Messbereich bei guter Messgenauigkeit zur Verfügung steht. Der Differenzdruckaufnehmer muss hohe Genauigkeit haben, so dass auch bei kleinen Durchflüssen geringe Messabweichung erreicht werden. Der Absolutdruckaufnehmer und die Temperaturmessung haben wesentlich geringeren Einfluss auf das Messresultat (Volumenstrom im Normzustand).

DROSSELGERÄTE EN ISO 5167-1,2,3

- ⇒ Messblende
- ⇒ Venturidüse
- ⇒ Venturirohr

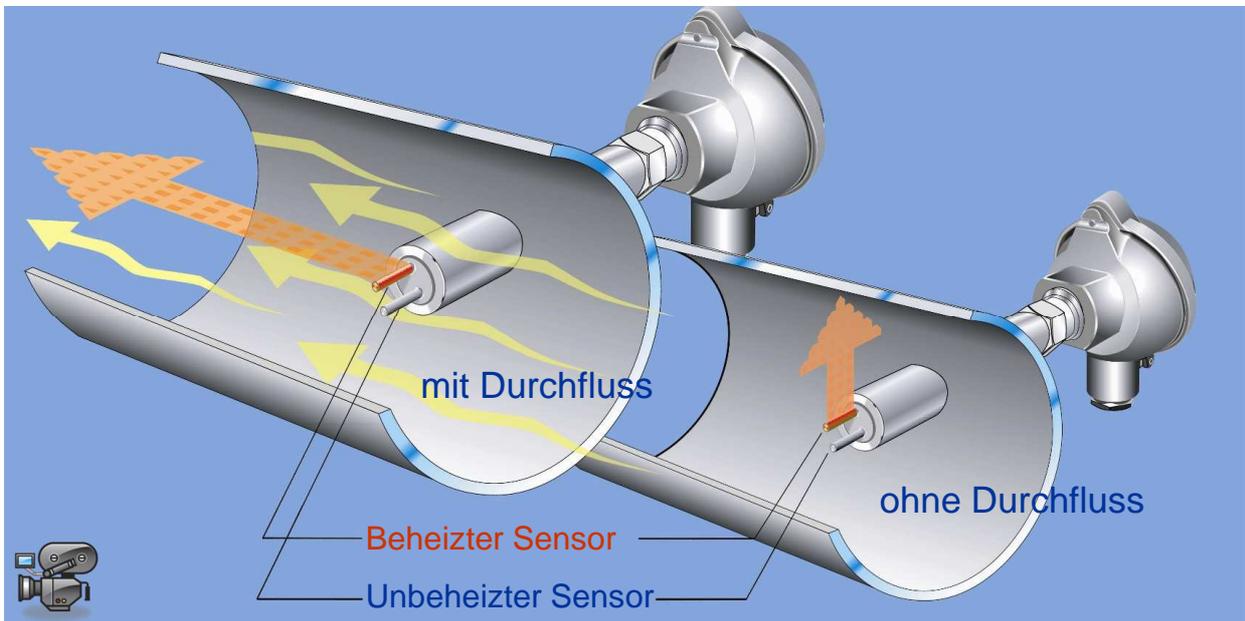


DROSSELGERÄTE: Vor – und Nachteile

- | | |
|--|--|
| ☺ Genormte Ausführungen | ☹ Kleiner Messbereich |
| ☺ Einfache Konstruktion | ☹ Bleibender Druckverlust relativ hoch |
| ☺ Einbaulage egal | ☹ Exakte Fertigung notwendig |
| ☺ Langzeitstabil | ☹ Verschmutzungen verursachen Messabweichungen |
| ☺ Keine beweglichen Teile | ☹ Große Einbaulängen |
| ☺ Sehr geringe Messabweichungen möglich! | |

THERMISCHER MASSENDURCHFLUSSMESSER

Der Beheizter Sensor gibt Wärme ab – die Temperaturdifferenz bzw. die Heizleistung ist ein Maß für die vorbeiströmende Gasmasse.



THERMISCHER MASSENDURCHFLUSSMESSER Funktion

- ⇒ 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.

THERMISCHER MASSENDURCHFLUSSMESSER

Auswertung

- ⇒ Es werden zwei Wege zur Datenauswertung besprochen
 - Der Sensor wird mit konstanter Leistung beheizt, d.h. es wird mit konstantem Strom gearbeitet.
 - Die Temperaturdifferenz wird konstant gehalten und es wird die elektrische Heizleistung variiert.
- ⇒ Gemessen wird die Gasmasse pro Zeit (Massenstrom) in kg/h. Ist die Zusammensetzung des Gases und damit die Dichte bekannt, kann der Volumenstrom berechnet werden.

THERMISCHER MASSENDURCHFLUSSMESSER

Vorteile

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

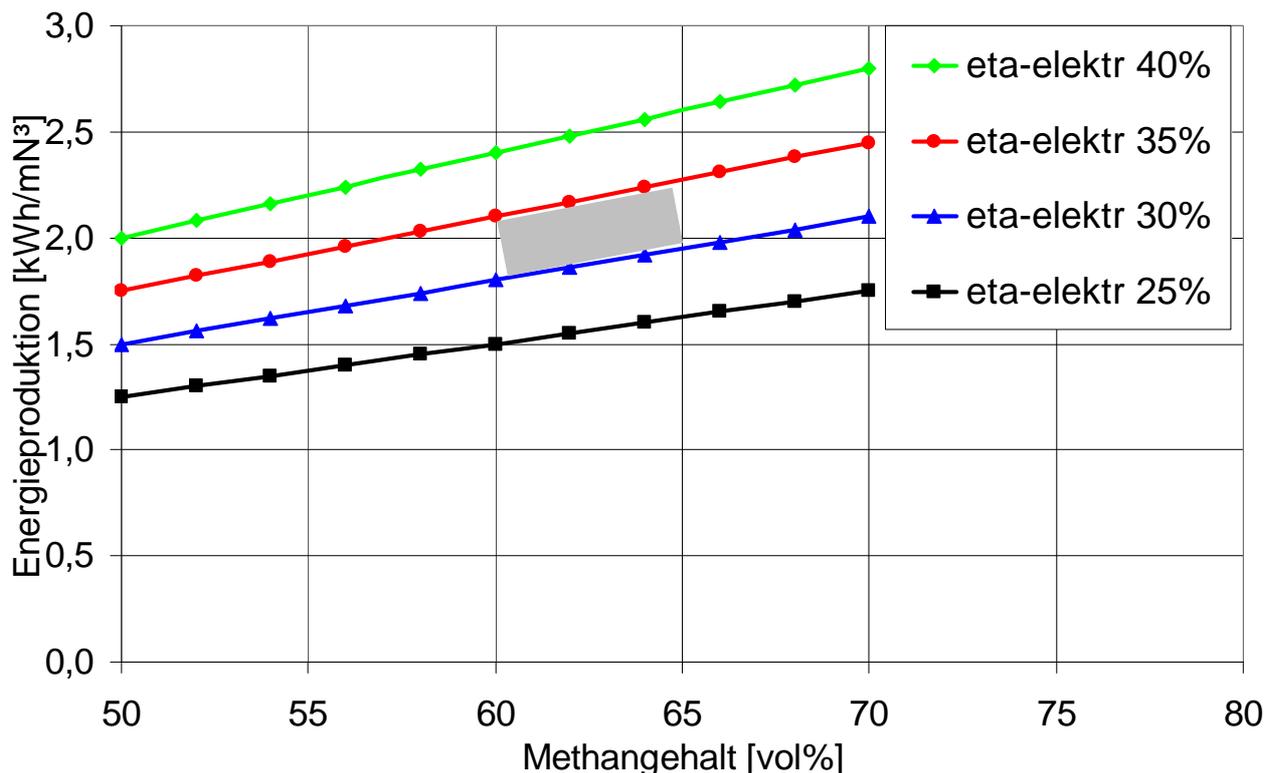
Nachteile

- ⇒ 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

Überprüfung von Durchflussmessungen (1)

- ⇒ Kontrolle beim Einbau in Anlehnung an das ÖWAV Regelblatt 38 sinnvoll (Einbaugeometrie, Datenübertragung, ...)
- ⇒ Durch den Einsatz verändert sich die Messabweichung
 - Kondensat, Beläge, Gaszusammensetzung, etc.
 - Alterung von Bauelementen
 - Regelmäßige Kontrolle sinnvoll
- ⇒ Plausibilitätsprüfung mit Energiebilanzen
 - Abschätzung des Methananfalls über die produzierte elektrische Energie
$$\text{CH}_4 [\text{m}_\text{N}^3] = \text{el. Energie} [\text{kWh}] / (10 [\text{kWh}/\text{m}_\text{N}^3] \cdot \eta_\text{el.})$$
 - el. Wirkungsgrade moderner BHKW's je nach Größe und Belastung 25 – 40% (z.B. 100 kW elektrisch bei 100% Belastung $\eta > 35\%$)

Plausibilitätsprüfung - Energieproduktion



Überprüfung von Durchflussmessungen (2)

- ⇒ Kontrollmessungen vor Ort
 - Herstellerfirmen/Dienstleister
 - Referenzmesssystem muss eingebaut werden



- ⇒ Werkskalibrierung
 - Messgerät muss zur Kalibrierstelle geschickt werden
 - Problem Medium: Faulgas steht nicht zur Verfügung

Fehlerbetrachtung – Fehlerfortpflanzung (1)

- ⇒ Viele Werte werden durch Verknüpfung verschiedener Messwerte berechnet, z. B.:
 - Glühverlust = Schlammmasse – Glührückstand
 - Zulauf KA = (Zulauf Gemeinde A) + (Zulauf Gemeinde B)
 - Durchfluss = Querschnittfläche x Geschwindigkeit
 - Umrechnung von Betriebsvolumenstrom auf Normvolumenstrom
 - Fracht = Wassermenge x Konzentration
- ⇒ Für Produkte und Quotienten gilt:
 - Der mittlere **relative** Fehler ist gleich der Wurzel aus der Summe der quadrierten relativen Fehler der einzelnen Werte.
- ⇒ Für Summen und Differenzen gilt:
 - Der mittlere **absolute** Fehler ist gleich der Wurzel aus der Summe der quadrierten absoluten Fehler der einzelnen Werte.

Fehlerbetrachtung – Fehlerfortpflanzung (2)

Beispiel: Durchflussmessung an einer Faulgasleitung

- ⇒ Ein Ultraschallmessgerät zeigt einen Volumenstrom von 75 m³/h an. Laut Herstellerangabe beträgt der relative Fehler 1,5% v.M..
- ⇒ Der Methangehalt wird mit 63,0 vol% (rel. Fehler 2% v.E.) angezeigt. (→ Bei einem Messbereichsendwert von 100 vol% Methan bedeutet das einen absoluten Fehler von 2vol% Methan und damit einen rel. Fehler 3,2% v.M.)
- ⇒ Die Temperatur beträgt 15 °C (rel. Fehler 0,5%).
- ⇒ Der Druck wird nicht gemessen sondern mit 1000 hPa in die Auswertelektronik eingegeben. Die Luftdruckschwankung am Aufstellungsort beträgt ±20hPa (→ Wertet man diese Schwankung als Messabweichung, entspricht das einem rel. Fehler von 2%)

Lösung:

		Messwert	rel. Fehler	abs. Fehler	(rel. Fehler) ²
Volumenstrom Faulgas	mB ³ /h	75,0	1,5	1,13	2,25
Temperatur	°C	15,0	0,5	0,08	0,25
Druck	hPa	1000	2,0	20,0	4,00
Methangehalt	vol%	63,0	3,2	2,02	10,24
Volumenstrom Faulgas	mN ³ /h	70,2	2,5	1,79	
Volumenstrom Methan	mN ³ /h	44,2	4,1	1,81	



Vielen Dank!

