



Die Berechnung von Korrekturfaktoren für Schwebekörperdurchflussmessgeräte bei geänderten Betriebsbedingungen

Dipl. Physiker Georg Rollmann

0 Vorwort

Die Kalibrierung von Schwebekörperdurchflussmessgeräten für Gase wird durch eine Änderung von

- Normdichte des Mediums und/oder
- Betriebsdruck und/oder
- Betriebstemperatur

verfälscht. Der abgelesene Volumenstrom muss dann durch Multiplikation mit einem Faktor korrigiert werden. Die Ermittlung dieser Korrekturfaktoren ist Gegenstand des folgenden Dokuments.

1 Theoretische Grundlagen

Für Gase mit geringer Dichte, verglichen mit der Dichte des Schwebekörpers, gilt:

$$q_M \sim \sqrt{D}$$

Hierbei ist q_M die pro Zeiteinheit durch das Messgerät strömende Masse in kg/h. D ist die Dichte des Gases im Betriebszustand. Für zwei verschiedene Gasdichten D_1 und D_2 mit den Massenströmen q_{M1} und q_{M2} folgt daraus:

$$q_{M2} = \sqrt{\frac{D_2}{D_1}} \cdot q_{M1} = K_M \cdot q_{M1}$$

Das bedeutet: Ist der, einer bestimmten Höhenstellung des Schwebekörpers mit der Kalibrierdichte D_1 entsprechende Massendurchfluss q_{M1} bekannt, so lässt sich der Massendurchfluss eines Mediums anderer Dichte D_2 durch Multiplikation mit dem Faktor $K_M = \sqrt{D_2/D_1}$ berechnen.

Gebräuchlich ist auch die Einheit m³/h im Normzustand (t=0 °C und p=1,013 bar abs). Die Abkürzung sei: m³/h i.N. Diese Einheit ist nicht universell. Sie hängt von der



Normdichte des entsprechenden Gases ab. Bei Verwendung von Gasen unterschiedlicher Dichte wirkt sich das auf die Berechnung der Korrekturfaktoren aus.

Aus der Gleichung $q_v = q_M / D$ lässt sich für den Volumenstrom q_v die Beziehung ableiten:

$$q_v \sim \frac{1}{\sqrt{D}}$$

Hierbei ist q_v der durch das Schwebekörpermessgerät fließende Volumenstrom in m^3/h . D bezeichnet die Dichte des Gases im Betriebszustand. Der Zustand „im Betrieb“ sei dargestellt durch die Abkürzung i.B. Zwischen den Volumenströmen q_{v1} und q_{v2} , die bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen einer bestimmten Höhenstellung des Schwebekörpers entsprechen, besteht damit der Zusammenhang:

$$q_{v2} = \sqrt{\frac{D_1}{D_2}} \cdot q_{v1} = K_v \cdot q_{v1}$$

2 Umrechnungen bei Verwendung eines Gases¹

Häufig ist die Dichte des Mediums im Betriebszustand nicht direkt bekannt. Sie steht mit den Größen Druck und Temperatur über die ideale Gasgleichung in Beziehung. Für ein hinreichend verdünntes Gas gilt:

$$D \sim \frac{p}{T}$$

Es lassen sich folgende Umrechnungsfaktoren für den Massendurchfluss (gemessen in kg/h oder m^3/h i.N.) und den Volumendurchfluss (in m^3/h i. B.) bei Verwendung ein und desselben Gases und konstanter Temperatur ableiten:

$$K_M^p = \sqrt{\frac{p_2}{p_1}} \quad \text{bzw.} \quad K_V^p = \sqrt{\frac{p_1}{p_2}}$$

Diese Umrechnungsfaktoren machen eine Aussage über den Einfluss des Betriebsdrucks. Bei konstantem Druck erhält man die folgenden Gleichungen, die den Einfluss der Betriebstemperatur wiedergeben:

$$K_M^T = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \quad \text{bzw.} \quad K_V^T = \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}$$

¹ Die Stoffliche Zusammensetzung ist konstant, Druck und Temperatur variieren.



Der Einfluss von Druck und Temperatur ist unabhängig voneinander und berechnet sich durch Multiplikation der entsprechenden Faktoren.

Anmerkung: Häufig hat der Anwender folgende Fragestellung: Welches Volumen nehmen die Betriebskubikmeter des Gases bei Normbedingungen unter Beibehaltung seiner Gesamtmasse ein. Der entsprechende Umrechnungsfaktor leitet sich aus dem Verhältnis der Dichte bei Betriebsbedingungen zur Dichte bei Normbedingungen ab. Aufgrund der idealen Gasgleichung erhalten wir:

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

Dabei bedeuten p_B und p_N sowie T_B und T_N Druck und Temperatur bei Betriebs- und Normbedingungen. Dies ist eine Anwendung des Gesetzes idealer Gase und nicht mit der Umrechnung von Skalen kalibrierter Gläser mittels der o.g. Quadratwurzelausdrücke zu verwechseln!

3 Umrechnungen bei Verwendung unterschiedlicher Gase

Der Durchfluss eines Gases soll auf bekannte Daten eines anderen Gases zurückgeführt werden. Es gilt: Das Dichteverhältnis zweier Gase bleibt bei Veränderung des Druckes und der Temperatur konstant. Ist das Verhältnis der Dichten zweier Gase D_1 und D_2 bei definierten Werten für Druck und Temperatur (z.B. im Normzustand) bekannt, lässt sich die Dichte des Gases 2 bei Betriebsbedingungen aus der Dichte des Gases 1 bei diesen Bedingungen durch Multiplikation mit dem Faktor $\sqrt{D_2/D_1}$ berechnen. Daraus folgt der Umrechnungsfaktor für den Massendurchfluss gemessen in kg/h zu

$$K_M = \sqrt{\frac{D_2}{D_1}} \quad (\text{gemessen in } kg \cdot h^{-1})$$

In der Einheit m^3/h i. N. hat der Umrechnungsfaktor aufgrund der Abhängigkeit der Einheit des Gases den reziproken Wert

$$K_V = \sqrt{\frac{D_1}{D_2}} \quad (\text{gemessen in } m^3 \cdot h^{-1} \text{ i. N.})$$

Hierbei bezeichnen D_1 und D_2 die Dichten der Gase 1 und 2 bei für beide Gase gleichen Parametern für Druck und Temperatur (z.B. i. N.).

Für Umrechnung des Volumendurchflusses (z.B. in m^3/h i. B.) gilt die Formel:

$$K_V = \sqrt{\frac{D_1}{D_2}} \quad (\text{gemessen in } m^3/h \text{ i. B.})$$



Die Umrechnungsfaktoren in Bezug auf Druck und Temperatur sind die gleichen, wie in 2. dargestellt. Bei der Durchflussbestimmung müssen immer alle drei Faktoren (Kalibrierdichte, Druck und Temperatur) berücksichtigt werden.

4 Beispiele

4.1 Umrechnung des Massendurchflusses

Sie betreiben ein Schwebekörperdurchflussmessgerät, das für Luft bei einem Druck von 1 bar und einer Temperatur von 20 °C (=293 K) kalibriert wurde, nun bei einem Druck von 4 bar und einer Betriebstemperatur von 30 °C (=303 K). Bei einer bestimmten Ablesehöhe des Schwebekörpers beträgt der zugehörige angegebene Massendurchfluss $10 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ i. N. (Kubikmeter pro Stunde im Normzustand). Der tatsächliche Durchfluss errechnet sich dann zu

$$\begin{aligned} q_M^{\text{neu}} &= \sqrt{\frac{p_2}{p_1}} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \cdot q_M^{\text{alt}} \\ &= \sqrt{\frac{4 \text{ bar}}{1 \text{ bar}}} \cdot \sqrt{\frac{293 \text{ K}}{303 \text{ K}}} \cdot 10 \text{ m}^3/\text{h i. N.} \\ &= 2 \cdot 0,983 \cdot 10 \text{ m}^3/\text{h i. N.} \\ &= 19,66 \text{ m}^3/\text{h i. N.} \end{aligned}$$

Bei den oben beschriebenen, nun veränderten Betriebsbedingungen (q_M^{neu}) fließen bei einem angezeigten Durchflusswert bezogen auf die alten Betriebsbedingungen (q_M^{alt}) von 10 m³/h i. N. tatsächlich 19,66 m³/h i. N. durch. Oder anders ausgedrückt: Wenn Sie nach dem Massendurchfluss in m³/h i. N. fragen, den Sie für einen Strich bei 10 m³/h i. N. aufgrund der zuvor beschriebenen geänderten Betriebsbedingungen einstellen müssen, lautet die Antwort $10 \text{ m}^3/\text{h i. N.} / 1,966 = 5,086 \text{ m}^3/\text{h i. N.}$

4.2 Umrechnung des Volumendurchflusses

Sie betreiben ein Schwebekörperdurchflussmessgerät, das für Luft bei einem Druck von 1 bar und einer Temperatur von 20 °C (=293 K) kalibriert wurde, nun bei einem Druck von 4 bar und einer Betriebstemperatur von 30 °C (=303 K). Bei einer bestimmten Höhenstellung des Schwebekörpers beträgt der zugehörige angegebene Volumendurchfluss 10 m³/h i. B. Der tatsächliche Durchfluss errechnet sich dann



$$\begin{aligned}q_V^{\text{neu}} &= \sqrt{\frac{p_1}{p_2}} \cdot \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} \cdot q_V^{\text{alt}} \\&= \sqrt{\frac{1 \text{ bar}}{4 \text{ bar}}} \cdot \sqrt{\frac{303 \text{ K}}{293 \text{ K}}} \cdot 10 \text{ m}^3/\text{h i. B.} \\&= 0,5 \cdot 1,017 \cdot 10 \text{ m}^3/\text{h i. B.} \\&= 5,085 \text{ m}^3/\text{h i. B.}\end{aligned}$$

Bei den oben beschriebenen, nun veränderten Betriebsbedingungen (q_M^{neu}) fließen bei einem angezeigten Durchflusswert bezogen auf die alten Betriebsbedingungen (q_M^{alt}) von 10 m³/h i. B. tatsächlich 5,085 m³/h i. B. durch. Anders ausgedrückt: Wenn Sie nach dem Volumendurchfluss in m³/h i. B. fragen, den Sie für einen Strich bei 10 m³/h i. B. bei Kundenbedingungen einstellen müssen, lautet die Antwort 10 m³/h i. B. / 0,5086 = 19,66 m³/h i. B.

4.3 Umrechnung des Massendurchflusses bei verschiedenen Gasen

Sie betreiben ein Schwebekörperdurchflussmessgerät, das für Luft bei einem Druck von 1 bar und einer Temperatur von 20 °C (=293 K) kalibriert wurde, bei einem Betriebsdruck von 4 bar und einer Betriebstemperatur von 30 °C (=303 K) unter Verwendung eines anderen Mediums mit einer Kalibrierdichte von 0,25 (bezogen auf Luft mit der Kalibrierdichte 1.0). Bei einer bestimmten Höhenstellung des Schwebekörpers beträgt der zugehörige angegebene Massendurchfluss m³/h i. N. Der tatsächliche Durchfluss errechnet sich dann zu

$$\begin{aligned}q_M^{\text{neu}} &= \sqrt{\frac{D_1}{D_2}} \cdot \sqrt{\frac{p_2}{p_1}} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \cdot q_M^{\text{alt}} \\&= \sqrt{\frac{1,0}{0,25}} \cdot \sqrt{\frac{4 \text{ bar}}{1 \text{ bar}}} \cdot \sqrt{\frac{293 \text{ K}}{303 \text{ K}}} \cdot 10 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ i. N.} \\&= 2 \cdot 2 \cdot 0,983 \cdot 10 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ i. N.} \\&= 39,32 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ i. N.}\end{aligned}$$



4.4 Umrechnung des Volumendurchflusses bei verschiedenen Gasen

Sie betreiben ein Schwebekörperdurchflussmessgerät, das für Luft bei einem Druck von 1 bar und einer Temperatur von 20 °C (=293 K) kalibriert wurde, bei einem Betriebsdruck von 4 bar und einer Betriebstemperatur von 30 °C (=303 K) unter Verwendung eines anderen Mediums mit einer Kalibrierdichte von 0,25 (bezogen auf Luft mit der Kalibrierdichte 1.0). Bei einer bestimmten Höhenstellung des Schwebekörpers beträgt der zugehörige angegebene Volumendurchfluss 10 m³/h i. B. (Kubikmeter pro Stunde im Betrieb). Der tatsächliche Durchfluss errechnet sich dann zu

$$\begin{aligned} q_V^{\text{neu}} &= \sqrt{\frac{D_1}{D_2}} \cdot \sqrt{\frac{p_1}{p_2}} \cdot \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} \cdot q_V^{\text{alt}} \\ &= \sqrt{\frac{1.0}{0,25}} \cdot \sqrt{\frac{1\text{bar}}{4\text{ bar}}} \cdot \sqrt{\frac{303\text{K}}{293\text{K}}} \cdot 10 \text{ m}^3/\text{h i. B.} \\ &= 2 \cdot 0,5 \cdot 1,017 \cdot 10 \text{ m}^3/\text{h i. B.} \\ &= 10,17 \text{ m}^3/\text{h i.B.} \end{aligned}$$

Literatur:

[1] VDE/VDI-Richtlinien VDE/VDI 3513, *Schwebekörper-Durchflussmesser: Berechnungsverfahren*, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf (1971)