



Bestimmung des Durchflusses in Schwebekörperdurchflussmessern bei von den Kalibrierbedingungen abweichenden äußeren Bedingungen

1 Theoretische Grundlagen

Aus der allgemeinen Schwebekörpergleichung [1] ergibt sich für Gase mit geringer Dichte verglichen mit der Dichte des Schwebekörpers folgende Abhängigkeit des Massenstroms bei einer bestimmten Höhe des Schwebekörpers von der Dichte des durchströmenden Mediums im Betriebszustand:

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

Hierbei gibt q_M die Masse der Gasmenge an, die pro Zeiteinheit durch den Strömungsmesser strömt, D ist die Dichte des Gases im Betriebszustand.

Die Massenströme für zwei verschiedene Gasdichten D_1 und D_2 seien mit q_M^1 und q_M^2 bezeichnet. Damit erhält man den Zusammenhang

$$q_M^2 = \sqrt{\frac{D_2}{D_1}} \cdot q_M^1 = K_M \cdot q_M^1.$$

Das bedeutet: Ist der Massendurchfluss q_M^1 , der einer bestimmten Höhe des Schwebekörpers entspricht, für eine bestimmte Dichte (z.B. die Kalibrierdichte) 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.

Die physikalische Einheit für den Massendurchfluss ist kg h^{-1} (Kilogramm pro Stunde). Gebräuchlich ist aber auch die Einheit $\text{Nm}^3 \text{h}^{-1}$ (Normkubikmeter pro Stunde). Diese Einheit ist aber in dem Sinne nicht universell, als dass sie von der Normdichte des entsprechenden Gases abhängt, was sich bei der Verwendung unterschiedlicher Gase in der Berechnung der Korrekturfaktoren bemerkbar macht.

Aus der Gleichung $q_V = q_M/D$ erhält man für den Volumenstrom q_V die Beziehung



$$q_V \sim \frac{1}{\sqrt{D}}.$$

Hierbei gibt q_V das Volumen der Gasmenge an, die pro Zeiteinheit durch den Strömungsmesser strömt, D ist wiederum die Dichte des Gases im Betriebszustand. Zwischen den Volumenströmen q_V^1 und q_V^2 , die bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen einer bestimmten Höhe des Schwebekörpers entsprechen, besteht damit der Zusammenhang

$$q_V^2 = \sqrt{\frac{D_1}{D_2}} \cdot q_V^1 = K_V \cdot q_V^1.$$

2 Umrechnungen bei Verwendung ein und desselben Gases

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

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

Somit ergeben sich folgende Umrechnungsfaktoren für den Massendurchfluss (gemessen in kg h^{-1} oder $\text{Nm}^3 \text{h}^{-1}$) und den Volumendurchfluss (in $\text{Bm}^3 \text{h}^{-1}$) bei Verwendung ein und desselben Gases und konstanter Temperatur:

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

Die beiden vorstehenden Faktoren beziehen sich somit auf den Einfluss des Betriebsdrucks. Bei konstantem Druck erhält man die folgenden Beziehungen, die den Einfluss der Betriebstemperatur wiedergeben:

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

Der Einfluss beider Größen (Druck und Temperatur) ist unabhängig voneinander und berechnet sich somit durch Multiplikation der entsprechenden Faktoren.



Anmerkung: Häufig möchte man einen gegebenen Volumendurchfluss V_B (in $\text{Bm}^3 \text{h}^{-1}$) in den entsprechenden Durchfluss V_N in $\text{Nm}^3 \text{h}^{-1}$ umrechnen. Man stellt sich also die Frage, welches Volumen 1 Bm^3 Gas bei Normbedingungen einnehmen würde (unter Beibehaltung der Gesamtmasse des Gases). Der entsprechende Umrechnungsfaktor ist dann gegeben durch das Verhältnis der Dichte

bei Betriebsbedingungen zur Dichte bei Normbedingungen. Mit der idealen Gasgleichung erhält man dann

$$V_N = \frac{\rho_B}{\rho_N} \cdot \frac{T_N}{T_B} \cdot V_B.$$

Dabei bedeuten ρ_B und ρ_N sowie T_B und T_N Druck und Temperatur bei Betriebs- und Normbedingungen.

Diese Umrechnung ist völlig unabhängig von der Verwendung irgendeines Messgerätes und bezieht sich einzig und allein auf einen Wechsel der Maßeinheiten -- bei vorgegebenen Betriebsbedingungen! Sie ist deshalb auch nicht mit der Frage nach der Kalibrierung von Durchflussmessgeräten in Beziehung zu setzen, wo man nach dem (Massen- oder Volumen-) Durchfluss, der einer bestimmten Anzeige des Messgerätes entspricht, bei verschiedenen Betriebsbedingungen fragt! In diesem Fall sind die Ausdrücke mit den Quadratwurzeln zu verwenden.

3 Umrechnungen bei Verwendung *unterschiedlicher Gase*

Möchte man den Durchfluss bei einer gewissen Höhe des Schwebekörpers unter Verwendung eines bestimmten Gases auf bekannte Daten für ein anderes Gas zurückführen, so kann man sich die Tatsache zunutze machen, dass das Dichteverhältnis zweier Gase bei Veränderung des Druckes und der Temperatur konstant bleibt. Kennt man also das Verhältnis der Dichten D_1 und D_2 zweier Gase bei bestimmten Werten für Druck und Temperatur (z.B. im Normzustand), so kann man die Dichte z.B. 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. Als Konsequenz daraus ergibt sich der Umrechnungsfaktor für den Massendurchfluss gemessen in kg h^{-1} zu



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

In der Einheit $\text{Nm}^3 \text{h}^{-1}$ hat der Umrechnungsfaktor aufgrund der Abhängigkeit der Einheit von der speziellen Gassorte genau den reziproken Wert

$$K_M = \sqrt{\frac{D_1}{D_2}} \quad (\text{gemessen in } \text{Nm}^3 \text{h}^{-1}).$$

Hierbei sind D_1 und D_2 die Dichten der Gase 1 und 2 bei bestimmten (für beide Gase gleichen) Parametern für Druck und Temperatur (z.B. im Normzustand).

Für den Volumendurchfluss (z.B. in $\text{Bm}^3 \text{h}^{-1}$) hat der Umrechnungsfaktor die Form

$$K_V = \sqrt{\frac{D_1}{D_2}} \quad (\text{gemessen in } \text{Bm}^3 \text{h}^{-1})$$

Die Umrechnungsfaktoren in Bezug auf Druck und Temperatur sind die gleichen, wie in 2. dargestellt. Zu beachten ist, dass bei der Durchflussbestimmung immer alle drei Faktoren (Kalibrierdichte, Druck und Temperatur) zu berücksichtigen sind.

4 Beispiele

4.1 Umrechnung des Massendurchflusses

Sie betreiben einen Schwebekörperdurchflussmesser, der für Luft bei einem Druck von 1 bar und einer Temperatur von 20 °C (=293 K) kalibriert wurde, 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 $10 \text{ Nm}^3 \text{h}^{-1}$ (Normkubikmeter pro Stunde). Der tatsächliche Durchfluss errechnet sich dann zu

$$\begin{aligned} q_M^{\text{neu}} &= \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \cdot q_M^{\text{alt}} \\ &= \sqrt{\frac{4 \text{ bar}}{1 \text{ bar}}} \cdot \sqrt{\frac{293 \text{ K}}{303 \text{ K}}} \cdot 10 \text{ Nm}^3 \text{h}^{-1} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} &= 2 \cdot 0,983 \cdot 10 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1} \\ &= 19,66 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1} \end{aligned}$$

Wenn Sie Ihren Schwebekörperdurchflussmesser demnach bei Ihren Bedingungen (q_M^{alt}) auf die Kundenbedingungen (q_M^{neu}) eichen wollen, müssen Sie an die Stelle, wo Sie einen Strich mit dem Durchfluss $10 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$ bei Ihren Bedingungen machen würden, eine Beschriftung von $19,66 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$ anbringen. Oder anders ausgedrückt, wenn Sie nach dem Massendurchfluss in $\text{Nm}^3 \text{ h}^{-1}$ fragen, den Sie für einen Strich bei $10 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$ bei Kundenbedingungen einstellen müssen, lautet die Antwort $10 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1} / 1,966 = 5,086 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$.

4.2 Umrechnung des Volumendurchflusses

Sie betreiben einen Schwebekörperdurchflussmesser, der für Luft bei einem Druck von 1 bar und einer Temperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ($=293 \text{ K}$) geeicht wurde, bei einem Druck von 4 bar und einer Betriebstemperatur von $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ($=303 \text{ K}$). Bei einer bestimmten Ablesehöhe des Schwebekörpers beträgt der zugehörige angegebene Volumendurchfluss $10 \text{ Bm}^3 \text{ h}^{-1}$. Der tatsächliche Durchfluss errechnet sich dann zu

$$\begin{aligned} q_V^{\text{neu}} &= \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \cdot \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} \cdot q_V^{\text{alt}} \\ &= \sqrt{\frac{1 \text{ bar}}{4 \text{ bar}}} \cdot \sqrt{\frac{303 \text{ K}}{293 \text{ K}}} \cdot 10 \text{ Bm}^3 \text{ h}^{-1} \\ &= 0,5 \cdot 1,017 \cdot 10 \text{ Bm}^3 \text{ h}^{-1} \\ &= 5,085 \text{ Bm}^3 \text{ h}^{-1} \end{aligned}$$

Wenn Sie Ihren Schwebekörperdurchflussmesser demnach bei Ihren Bedingungen (q_M^{alt}) auf die Kundenbedingungen (q_M^{neu}) eichen wollen, müssen Sie an die Stelle, wo Sie einen Strich mit dem Durchfluss $10 \text{ Bm}^3 \text{ h}^{-1}$ bei Ihren Bedingungen machen würden, eine Beschriftung von $5,085 \text{ Bm}^3 \text{ h}^{-1}$ anbringen. Oder anders ausgedrückt, wenn Sie nach dem Volumendurchfluss in $\text{Bm}^3 \text{ h}^{-1}$ fragen, den Sie für einen Strich bei $10 \text{ Bm}^3 \text{ h}^{-1}$ bei Kundenbedingungen einstellen müssen, lautet die Antwort $10 \text{ Bm}^3 \text{ h}^{-1} / 0,5086 = 19,66 \text{ Bm}^3 \text{ h}^{-1}$.



4.3 Umrechnung des Massendurchflusses bei verschiedenen Gasen

Sie betreiben einen Schwebekörperdurchflussmesser, der für Luft bei einem Druck von 1 bar und einer Temperatur von 20 °C (=293 K) geeicht wurde, bei einem Betriebsdruck von 4 bar und einer Betriebstemperatur von 30 °C (=303 K) unter Verwendung eines anderen Mediums mit einer Eichdichte von 0,25 (bezogen auf Luft mit der Eichdichte 1.0). Bei einer bestimmten Ablesehöhe des Schwebekörpers beträgt der zugehörige angegebene Massendurchfluss $10 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$. Der tatsächliche Durchfluss errechnet sich dann zu

$$\begin{aligned} q_M^{\text{neu}} &= \sqrt{\frac{D_1}{D_2}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \cdot q_M^{\text{alt}} \\ &= \sqrt{\frac{1.0}{0,25}} \cdot \sqrt{\frac{4 \text{ bar}}{1 \text{ bar}}} \cdot \sqrt{\frac{293 \text{ K}}{303 \text{ K}}} \cdot 10 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1} \\ &= 2 \cdot 2 \cdot 0,983 \cdot 10 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1} \\ &= 39,32 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1} \end{aligned}$$

4.4 Umrechnung des Volumendurchflusses bei verschiedenen Gasen

Sie betreiben einen Schwebekörperdurchflussmesser, der für Luft bei einem Druck von 1 bar und einer Temperatur von 20 °C (=293 K) geeicht wurde, bei einem Betriebsdruck von 4 bar und einer Betriebstemperatur von 30 °C (=303 K) unter Verwendung eines anderen Mediums mit einer Eichdichte von 0,25 (bezogen auf Luft mit der Eichdichte 1.0). Bei einer bestimmten Ablesehöhe des Schwebekörpers beträgt der zugehörige angegebene Volumendurchfluss $10 \text{ Bm}^3 \text{ h}^{-1}$ (Betriebskubikmeter pro Stunde). Der tatsächliche Durchfluss errechnet sich dann zu

$$\begin{aligned} q_V^{\text{neu}} &= \sqrt{\frac{D_1}{D_2}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \cdot \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} \cdot q_V^{\text{alt}} \\ &= \sqrt{\frac{1.0}{0,25}} \cdot \sqrt{\frac{1 \text{ bar}}{4 \text{ bar}}} \cdot \sqrt{\frac{303 \text{ K}}{293 \text{ K}}} \cdot 10 \text{ Bm}^3 \text{ h}^{-1} \\ &= 2 \cdot 0,5 \cdot 1,017 \cdot 10 \text{ Bm}^3 \text{ h}^{-1} \\ &= 10,17 \text{ Bm}^3 \text{ h}^{-1} \end{aligned}$$



Kirchner und Tochter
Durchflussmesstechnik seit 1951

Literatur:

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