ÜBER DIE DURCHFLUSSMESSUNG MIT BLENDEN BEI SCHWANKENDER BETRIEBSWICHTE

H. KRONMÜLLER
Siemens & Halske AG, Karlsruhe, Deutschland

PROBLEMSTELLUNG

Bei Gasen ist die Wichte im Betriebszustand stark abhängig von den Zustandsgrößen Druck und Temperatur und auch von der Zusammensetzung. Bei der genauen Durchflußmessung, gleichgültig ob nach einem volumetrischen oder einem Wirkdruckverfahren, muß deshalb die Wichte im Betriebszustand und ihre Änderungen berücksichtigt werden. Eine Volumendurchflußmessung im gerade zufällig vorliegenden Betriebszustand ist wertlos. Das Ziel der Messung ist entweder der Volumendurchfluß, bezogen auf den Normalzustand, oder der Gewichtsdurchfluß [2].

In der Verfahrensindustrie ist die Durchflußmessung mit Hilfe von Drosselgeräten sehr beliebt. Die Ausführungen beschränken sich der Übersichtlichkeit wegen auf dieses Verfahren, gelten aber grundsätzlich für alle Meßmethoden. Im Zuge der Automatisierung werden nun immer mehr kurzfristige Bilanzen benötigt [6]. Komplizierte Produktionsverfahren verlangen nach einer exakten Durchflußmessung und Rationalisierungsmaßnahmen rücken Meßmethoden in den Vordergrund, die selbsttätig den Gewichts- bzw. Volumendurchfluß im Normalzustand errechnen. Die heute durchaus übliche Handauswertung wird an Bedeutung verlieren. Die selbsttätigen Verfahren vermeiden auch Fehler, die bei der Handauswertung durch menschliches Versagen entstehen, und die prinzipiellen Fehler der Handauswertung [3].

PRINZIPIELLE FEHLER DER HANDAUSWERTUNG

Der Volumendurchfluß von trockenen Gasen Q_n, bezogen auf den Normalzustand $_n$, ist in Abhängigkeit vom Wirkdruck Δp, den Betriebsgrößen absoluter stat. Druck p_1 und absoluter Temperatur T_1 und der Normalwichte γ_n gegeben durch (vgl. z. B. [5])

$$Q_n = A \sqrt{\Delta p} \sqrt{\frac{p_1 T_n}{p_n T_1 \gamma_n}} \left[\frac{n m^3}{h}\right]. \tag{1}$$

In der Konstanten A sind die Blendendaten und einige Gaskonstanten zusammengefaßt. Bei der Handauswertung wird für jede Durchflußstrecke der zeitliche Verlauf der Wurzel aus dem Wirkdruck $\Delta p(t)$, der absoluten

Betriebstemperatur $T_1(t)$, des statischen absoluten Drucks $p_1(t)$ und bei Gasen wechselnder Zusammensetzung die Wichte $\gamma_n(t)$ registriert.

Die vier verschiedenen Diagrammstreifen pro Meßstelle für einen bestimmten Zeitabschnitt τ, üblich ist 1 Tag, werden nun von Hand planimetriert. Mit diesen Mittelwerten errechnet die Auswertestelle einen mittleren Durchfluß ${}_H Q_n$ nach Formel (1)

$$ {}_H\bar{Q}_n = A\sqrt{\overline{\Delta p}}\,\sqrt{\frac{\bar{p}_1\,T_n}{p_n\,\bar{T}_1\,\bar{\gamma}_n}}\;\left[\frac{n\,m^3}{h}\right]. \tag{2}$$

Der mittlere Durchfluß der Handauswertung ist aber im allgemeinen Fall bei beliebigem Wirkdruck $\Delta p(t)$ dem tatsächlichen mittleren Durchfluß

$$\bar{Q}_n = \frac{1}{\tau}\int_0^\tau A\,\sqrt{\Delta p(t)}\,\sqrt{\frac{p_1(t)\,T_n}{p_n\,T_1(t)\,\gamma_n(t)}}\,dt$$

nur dann gleich, wenn sich Druck $p_1(t)$, Temperatur $T_1(t)$ und die Wichte $\gamma_n(t)$ im Beobachtungszeitraum nicht ändern. Bei der Handauswertung entstehen demnach grundsätzlich Fehler, die von der Größe der Zustandsgrößen- und Wichteänderungen im Beobachtungszeitraum abhängig sind. Für die Abschätzung werden zweckmäßig die relativen Abweichungen $\varepsilon_i(t)$ vom Mittelwert eingeführt.

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\sqrt{\Delta p(t)} - \sqrt{\overline{\Delta p}}}{\sqrt{\overline{\Delta p}}} \qquad & \varepsilon_2 &= \frac{p_1(t) - \bar{p}_1}{\bar{p}_1} \\ \varepsilon_3 &= \frac{T_1(t) - \bar{T}_1}{\bar{T}_1} \qquad & \varepsilon_4 &= \frac{\gamma_n(t) - \bar{\gamma}_n}{\bar{\gamma}_n} \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

Der Durchfluß Q_n läßt sich mit Hilfe der Formeln (3) als Funktion der Mittelwerte und der relativen Abweichungen $\varepsilon_i(t)$ darstellen. Nimmt man an, daß die relativen Abweichungen $\varepsilon_i \leqslant 1$, $i = 2$, 3, 4 sind, läßt sich der Durchfluß Q_n als Potenzreihe nach $\varepsilon_{2,3,4}$ darstellen. Höhere Potenzen als 2. Ordnung können unberücksichtigt bleiben. Es ergibt sich:

$$\begin{aligned} Q_n = A\sqrt{\overline{\Delta p}}\,\sqrt{\frac{\bar{p}_1\,T_n}{p_n\,\bar{T}_1\,\bar{\gamma}_n}}\,\Big\{&1 + \varepsilon_1 + \frac{1}{2}(\varepsilon_2 - \varepsilon_3 - \varepsilon_4) + \frac{1}{8}(3\,\varepsilon_3^2 + 3\,\varepsilon_4^2 - 3\,\varepsilon_2^2) \\ &+ \frac{1}{2}\varepsilon_1(\varepsilon_2 - \varepsilon_3 - \varepsilon_4) + \frac{1}{4}(\varepsilon_3\,\varepsilon_4 - \varepsilon_2\,\varepsilon_3 - \varepsilon_2\,\varepsilon_4) + \ldots\Big\}. \end{aligned} \tag{4}$$

Beim Mitteln des Durchflusses Q_n verschwinden nach ihrer Definition (3) die Glieder 1. Ordnung und es folgt mit (2) für den relativen Fehler der Handauswertung:

$$F = \frac{{}_H\bar{Q}_n - \bar{Q}_n}{{}_H\bar{Q}_n}$$

$$= \frac{1}{8}\{4\,\overline{(\varepsilon_3 + \varepsilon_4 - \varepsilon_2)\,\varepsilon_1} + 2\,(\overline{\varepsilon_2\,\varepsilon_3} + \overline{\varepsilon_2\,\varepsilon_4} - \overline{\varepsilon_3\,\varepsilon_4}) + \overline{\varepsilon_2^2} - 3\,\overline{\varepsilon_3^2} - 3\,\overline{\varepsilon_4^2})\}. \quad (5)$$

Für beliebige, beschränkte Funktionen

$$|\varepsilon_i(t)| \leqslant \hat{\varepsilon}_i \quad i = 2, 3, 4 \quad \text{in} \quad 0 \leqslant t \leqslant \tau \quad (6)$$

bleibt nach dem Mittelwertsatz der Integralrechnung der Fehler immer kleiner als

$$|F| < \frac{1}{8}\{4\,\hat{\varepsilon}_1\,(\hat{\varepsilon}_2 + \hat{\varepsilon}_3 + \hat{\varepsilon}_4) + 2\,(\hat{\varepsilon}_2\,\hat{\varepsilon}_3 + \hat{\varepsilon}_2\,\hat{\varepsilon}_4) + 3\,\hat{\varepsilon}_3^2 + 3\,\hat{\varepsilon}_4^2 + 3\,\hat{\varepsilon}_2^2\}. \quad (7)$$

Nimmt man z. B. an, daß die Wurzel aus dem Wirkdruck, die abs. Temperatur, der abs. Druck und die Wichte höchstens um 5% um den Mittelwert im Beobachtungszeitraum schwanken, bleibt der Fehler der Handauswertung unter 0,8% Durchfluß.

Der Fehler der Handauswertung kann aber bei größeren Schwankungen im Beobachtungszeitraum unzulässig große Werte annehmen. Dafür ein Beispiel: bei Änderungen der Wurzel aus dem Wirkdruck um $\pm$ 50%, Druck-, Temperatur- und Wichteänderungen um $\pm$ 10% können Fehler bis zu $\pm$ 7,5% vom wahren mittleren Durchfluß auftreten.

Die Reihe von Zahlenbeispielen läßt sich mit Formel (5) beliebig fortsetzen; das eine Beispiel zeigt aber deutlich, daß bei der Handauswertung grundsätzlich Fehler auftreten können, die für viele Anwendungsfälle unzulässig hoch liegen. Kontinuierlich umwertende Verfahren, die nicht mit Mittelwerten arbeiten, vermeiden diese Fehler und sind für genaue Messungen unerläßlich.

EINIGE VERFAHREN ZUR ECHTEN DURCHFLUSSMESSUNG

Die Durchflußgleichung läßt sich entsprechend Gl. (1) so schreiben:

$$Q_n = A\sqrt{\frac{\Delta p}{\bar{\gamma}_n}} \cdot \sqrt{\frac{p_1\,T_n\,\bar{\gamma}_n}{p_n\,T_1\,\gamma_n}} = A\sqrt{\frac{\Delta p}{\bar{\gamma}_n}} \cdot \sqrt{\frac{1}{f(T_1, p_1, \gamma_n)}}. \quad (8)$$

In der Form wird die Aufgabe, die Zustandsgrößen und die Wichte zu berücksichtigen, besonders deutlich: der Durchfluß eines Gases von einer Bezugswichte γ_n wird mit einem von den Zustandsgrößen und der Wichte abhängigen Faktor multipliziert. Die Rechenoperation „Multiplizieren" ist kennzeichnend für die vorliegende Aufgabe.

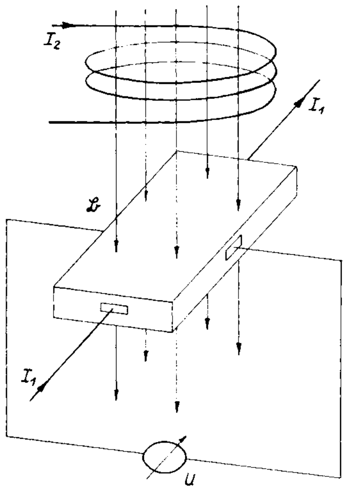

Bild 1.

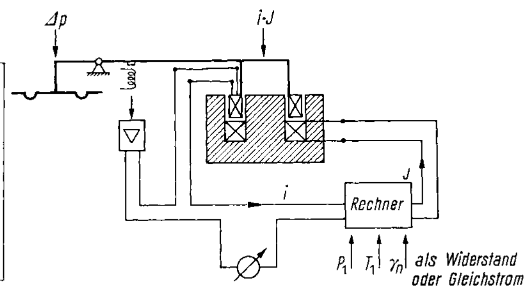

Bild 2.

Bild 1.—Hallmultiplikator. $u \sim I_1 \cdot B \sim I_1 \cdot I_2$.

Bild 2.—Radiz. elektr. Wirkdruck-Meßumformer und Rechner.

$$\Delta p = i \cdot J \qquad J = i\, f(T_1, p_1, \gamma_n)$$

$$Q_n \sim i \sim \sqrt{\Delta p}\, \sqrt{\frac{1}{f(T_1\, p_1 \cdot \gamma_n)}} \qquad = i\, \frac{T_1\, \gamma_n\, p_n}{T_n\, \tilde{\gamma}_n\, p_1}.$$

Im allgemeinen Fall dürfte der Einsatz von digitalen Mitteln für die Durchflußumwertung zu aufwendig sein. Denkt man daran, für viele Durchflußstrecken eine zentrale Recheneinheit einzusetzen, könnte die Abfragespanne zu lang werden und die Genauigkeit der Rechnung durch die abgetasteten zufälligen Augenblickswerte beeinträchtigt werden. Die Behandlung des Problems mit einfachen elektrischen Analogrechnern bietet sich an.

Analoges elektrisches Multiplizieren ist im wesentlichen mit folgenden Mitteln möglich:

1. Wenn sämtliche Größen als Widerstände vorliegen, mit Wheatstone'schen Brückenschaltungen.

2. Wenn die Größen teilweise als Widerstand und Ströme vorkommen, mit dem Ohm'schen Gesetz ($U = i \cdot R$).

3. Wenn alle Größen in Gleichströme umgeformt sind, können mit dynamometrischen Anordnungen mech. Kräfte erzeugt werden, die proportional dem Produkt zweier Ströme sind.

4. Gleichströme lassen sich auch in Hallmultiplikatoren miteinander zu einer Hallspannung multiplizieren. Ein Strom erzeugt das magnetische Feld in der Feldwicklung, der andere fließt als Steuerstrom durch das Hallplättchen; die Hallspannung entspricht dem Produkt der beiden Ströme (Bild 1).

Mit diesen Mitteln und der Vielzahl von Wirkdruckmessern lassen sich beliebig viele selbsttätig umwertende Durchflußmessungen entwerfen. Die folgende Auswahl kann deshalb nicht vollständig sein.

Zur Wirkdruckmessung von Gasen sind elektrisch radizierende Wirkdruck-Meßumformer nach dem Kraftvergleich sehr beliebt [3]. Die Rechenverfahren werden hier besonders elegant und grundsätzlich exakt. Die Zusammenschaltung von Rechner und Meßumformer zeigt Bild 2.

In der Meßzelle, hier einer Membran, wird eine dem Wirkdruck proportionale Kraft erzeugt. Der Meßkraft entgegen wirkt die Anziehungskraft einer Tauchspule, die sich in einem Elektromagneten bewegt. Ein induktiver Abgriff und Verstärker überwachen den Kraftvergleich und bemessen den Strom i durch die Tauchspule so, daß immer Gleichgewicht zwischen Meßkraft und Tauchspulkraft besteht.

Der Tauchspulstrom i fließt durch den Rechner, dem weiter noch die Zustandsgrößen und — wenn erforderlich — die Wichte als elektrische Größe zugeführt werden.

Der Rechner liefert einen Strom $J = i \cdot f(T_1, p_1, \gamma_n)$, der die Erregung des Elektromagneten speist. Die Tauchspulkraft wird damit proportional $i \cdot if(T_1, p_1, \gamma_n)$. Da beim Kraftvergleich immer Gleichgewicht zwischen Meßkraft und Tauchspulkraft herrscht, gilt — von Gerätekonstanten abgesehen:

$$\Delta p \sim i^2 f(T_1, p_1, \gamma_n) \tag{9}$$

oder

$$i \sim \sqrt{\Delta p}\, \sqrt{\frac{1}{f(T_1, p_1, \gamma_n)}}.$$

Der Vergleich mit (8) ergibt, daß der Strom i ein Maß für den Durchfluß ist.

Der Aufbau der Rechner, die die Funktion $J = i \cdot f(Tp\gamma)$ liefern, richtet sich zweckmäßig nach der Form der Zustandsgrößen. Bild $3a$ zeigt einen Rechner, der Druck, Temperatur und Wichte in Form von Widerständen verarbeitet. Zwei Verstärker sorgen dafür, daß die Spannungsabfälle von je zwei Widerständen gleich groß sind. Es gilt:

$$i \cdot R_T = i_1 \cdot R_p,$$

$$i_1 \cdot R_\gamma = J \cdot R.$$

Für den Rechnerstrom J ergibt sich:

$$J = \frac{i}{R} \cdot \frac{R_T R_\gamma}{R_p}. \tag{10}$$

Entsprechen die Widerstände R_T, R_p und R_γ der absoluten Temperatur, dem absoluten Druck und der Wichte und wird R entsprechend dimensioniert, wird die Durchflußgleichung (8) exakt erfüllt.

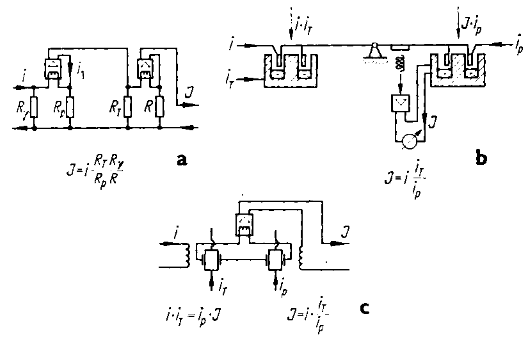

Bild 3.—Rechner für die Funktion $J = i\ f(T_1, p_1, \gamma_n)$. (*a*) Zustandsgrößen und Wichte; (*b*) Zustandsgrößen als Gleichstrom, Rechenbalken als Widerstände; (*c*) Zustandsgrößen als Gleichstrom, Hallmultiplikatoren.

Der Rechner (Bild 3*b*) arbeitet mit zwei dynamometrischen Meßwerken. Induktiver Abgriff und Verstärker steuern den Strom J durch die Tauchspule 2 so, daß zwischen Tauchspule 1 und Tauchspule 2 Gleichgewicht herrscht. Für das Kräftegleichgewicht gilt:

$$i \cdot i_T = J \cdot i_p$$

oder

$$J = i \cdot \frac{i_T}{i_p}. \tag{11}$$

Ist i_T und i_p dem absoluten Druck und der absoluten Temperatur proportional, erfüllt der Rechner zusammen mit dem Meßumformer die Durchflußgleichung (8). Hier ist angenommen, daß sich die Zusammensetzung des Gases nicht wesentlich ändert und die Änderung deshalb nicht berücksichtigt zu werden braucht.

Die gleiche Aufgabe für Druck und Temperatur als Gleichströme erfüllt der Rechner (3*c*). Die Strom-Multiplikation geschieht hier in Hallmultiplikatoren. Der Verstärker sorgt durch seinen Strom J durch die Erregung des Hallmultiplikators 2 dafür, daß beide Hallspannungen einander gleich sind.

Es gilt:

$$i \cdot i_T = J \cdot i_p$$

$$J = i \cdot \frac{i_m}{i_p}. \tag{12}$$

Selbstverständlich lassen sich die Beispiele (3*b*) und (3*c*) auch für den Fall einer veränderlichen Wichte erweitern. Die Lösung (3*a*), die mit Widerständen in den Zustandsgrößen arbeitet, zeichnet sich durch ausschließlich ruhende Bauteile im Rechner und kleinen Aufwand im Rechner und den Gebern für die Zustandsgrößen aus (Temperaturmessung mit Widerstandsgeber, Druck- und Wichtemesser mit Widerstandsgebern). Am aufwendigsten erscheint Lösung (3*b*) mit einem kompletten Kraftvergleichs-

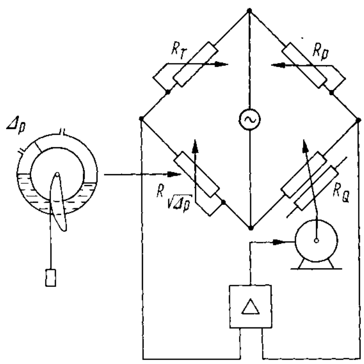

Bild 4.

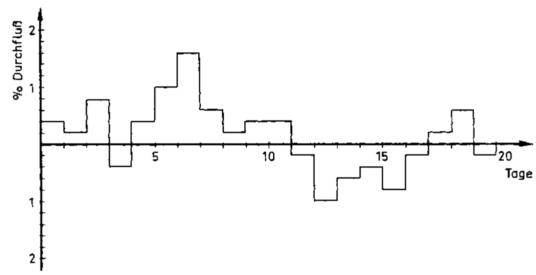

Bild 5.

Bild 4.—Brückenrechner. $R_Q = R_{\sqrt{\Delta p}} \cdot \frac{R_p}{R_T}$, Wirkdruck, Druck und Temperatur als Widerstand.

Bild 5.—Differenz zweier Durchflüsse gemessen mit zwei gleichen Anordnungen an einer Strecke.

system im Rechner. Druck und Temperatur müssen als Gleichstrom vorliegen. Zur Messung werden also vollwertige Meßumformer benötigt. Eine hohe Genauigkeit ist zu erwarten.

Das gleiche gilt für (3*c*). Darüber hinaus zeichnet sich diese Lösung durch ruhende, rein elektrische Bauteile ohne Wartung aus.

Werden Ausschlaggeräte zur Wirkdruckmessung eingesetzt, deren Ausschlag der Wurzel aus dem Wirkdruck proportional ist wie z. B. Ringwaagen und Quecksilberschwimmermanometer, wird bei der Durchflußumwertung häufig mit einer Näherung, die für kleine Änderungen der Zustandsgrößen und Wichte gültig ist, gearbeitet (1):

$$Q_n = A \sqrt{\frac{\Delta p}{\tilde{\gamma}_n}} \sqrt{\frac{p_1\, T_n\, \tilde{\gamma}_n}{p_n\, T_1\, \gamma_n}} \approx A \sqrt{\frac{\Delta p}{\tilde{\gamma}_n}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{(p_n + p_1)\, T_n\, \tilde{\gamma}_n}{p_n\, (T_1 + T_n)\, (\gamma_n + \tilde{\gamma}_n)}. \tag{13}$$

Nimmt die 2. Wurzel den Wert 1,15 an, entsteht durch die Näherung (13) ein Fehler von 0,9% Durchfluß.

Liefert der Durchflußmesser einen Gleichstrom, so können grundsätzlich die gleichen Rechner wie in Bild 3 eingesetzt werden. Die Werte der Zustandsgrößen R_i oder i_i müssen dann nach (13) dem Bezugswert plus dem Betriebswert proportional sein:

$$\begin{aligned} R_p &\sim p_n + p_1 \qquad & i_p &\sim p_n + p_1 \\ R_T &\sim T_n + T_1 \qquad & i_T &\sim T_n + T_1. \end{aligned} \tag{14}$$

Häufig sind aber Wirkdruckmesser nach dem Ausschlagverfahren mit Widerstandsgebern ausgerüstet. In dem Fall empfehlen sich selbstabgleichende

Wheatstone'sche Brücken als Rechner (Bild 4 für den Fall der Druck- und Temperaturkorrektur).

Im Brückengleichgewicht gilt

$$R_{Qn} = R_{\sqrt{\Delta p}} \cdot \frac{R_p}{R_T}. \tag{15}$$

R_{Q_n} ist dem Durchfluss proportional, wenn nach (13)

$$R_p \sim p_n + p_1 \quad \text{und} \quad R_T \sim T_n + T_1$$

ist.

ERZIELBARE GENAUIGKEITEN UND VERSUCHSERGEBNISSE

Eine Durchflußstrecke wurde mit zwei Blenden ca 2 km voneinander entfernt ausgerüstet. Beide Meßstellen wurden mit radizierenden elektrischen Wirkdruck-Meßumformern und Rechnern nach dem Ohm'schen Gesetz, etwa der Type in Bild 3*b* entsprechend, ausgerüstet. Die Rohrleitung hatte eine lichte Weite von 1 m, der mittlere Durchfluß lag bei 10^5 Nm^3/h. Ausgedehnte Versuche zeigten, daß über längere Zeit hinweg mit einer Übereinstimmung der beiden Messungen gerechnet werden kann, die besser als 2% Durchfluß ist (Bild 5).

LITERATUR

1. Calame, H., *DECHEMA-Monographien* **27**, 225 (1955).
2. Euler, H., *Arch. Eisenhüttenw.* **5**, 131 (1931).
3. Kronmüller, H., *Z. Regelungstechnik* **11**, 391 (1958).
4. —— *Siemens-Z.* **31**, 10/11, 486 (1957).
5. VDI-Durchflußmeßregeln DIN 1952. *Arbeitsblatt* **4**, p. 38.
6. Weber, E., *Siemens-Z.* **34**, 690 (1960).