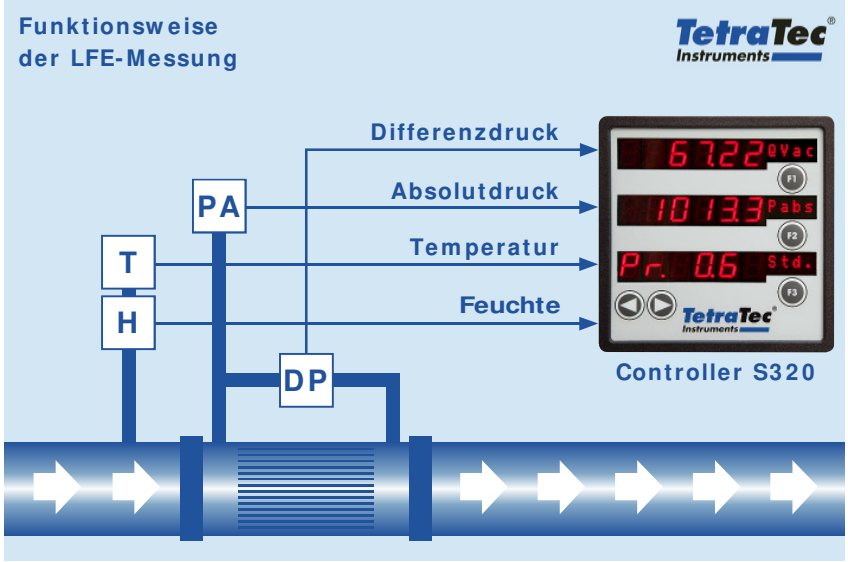
Gas-Durchflussmessung mit Laminar Flow Elementen (LFE)

1.) Messprinzip

Laminar Flow Elemente sind Messinstrumente für den aktuellen Volumenstrom, die nach dem Prinzip von Hagen-Poiseuille arbeiten. Die Durchströmung mit Luft oder einem anderen Gas bewirkt wegen der Viskosität (Reibung) des Gases einen Druckabfall über der LFE-Matrix, der annähernd linear zu der mittleren Strömungsgeschwindigkeit (aktueller Volumenstrom) in der Matrix des LFE ist. Sie bestehen normalerweise aus einem Kapillarrohrbündel oder einer gewickelten Edelstahlmatrix paralleler Dreiecks-Kapillaren, sowie zwei Anschlussbohrungen zur Differenzduckmessung an der Ein- und Ausgangsseite der Matrix.



Nach Hagen-Poiseuille ist der Durchfluss durch gerade Rohre bei laminarer Durchströmung mit Flüssigkeiten und auch Gasen) proportional zum Druckabfall Δp und umgekehrt proportional zur Viskosität η des strömenden Mediums.

$$Q_{vac} \sim \Delta p / \eta \qquad (1)$$

Anders formuliert: zur Erzeugung eines bestimmten aktuellen Volumenstroms Q_{vac} durch das LFE ist eine Druckdifferenz Δp zwischen Eingangs- und Ausgangsseite nötig, welche als Antriebskraft proportional zur Größe des mittleren Volumenstroms ist. Je größer der Volumenstrom sein soll und je größer die Viskosität (zähflüssiger) des Gases ist, desto größer muss die als treibende Kraft wirkende Druckdifferenz sein.

$$\Delta p \sim Q_{vac} \cdot \eta \qquad (2)$$

2.) Kalibrierung

Die Kalibrierung eines Laminar Flow Elements bestimmt die Proportionalitäts-Konstante in Gleichung (1) zwischen dem aktuellen Volumenstrom Q_{vac} und dem Differenzdruck Δp am LFE. Diese Konstante beinhaltet Fertigungstoleranzen und LFE-spezifische Daten wie Durchmesser, Länge und Anzahl der Kapillaren. Zum anderen gilt der Zusammenhang $Q_{vac} = c_{kal} \cdot \Delta p$ immer nur für einen bestimmten Wert der Viskosität des strömenden Mediums, die ihrerseits von der Gasart und Gastemperatur abhängt.
LFE-Kalibrierdaten sind daher immer auf bestimmte Kalibrierbedingungen und auf die Gasart bezogen.
Bei Einsatz des LFE unter diesen Kalibrierbedingungen kann der aktuelle Volumenstrom direkt aus dem Differenzdruck am LFE berechnet werden

$$Q_{vac} = c_{kal} \cdot \Delta p \qquad (3)$$

Bei Einsatz unter anderen Bedingungen ist dieser Durchflusswert über das Verhältnis aus Kalibrierviskosität und aktueller Viskosität zu korrigieren

$$Q_{vac} = c_{kal} \cdot \Delta p \cdot \eta_{kal} / \eta \qquad (4)$$

In den meisten Fällen werden LFE's mit Luft als Durchflussmedium eingesetzt. Die Viskosität von Luft ist bis 6 bar druckunabhägig uns hängt ansonsten in erster Linie nur von der Temperatur ab:

$$\eta_{Luft}(T) = 14{,}58 \cdot \frac{T^{3/2}}{(110{,}4 + T)} \qquad (5)$$

Dabei bedeuten:

	η	Viskosität in [µPoi]
	T	Temperatur in [°K], T = 273,15 + t
	t	Temperatur in [°C]

Beispiel: Ein LFE wurde mit Luft kalibriert bei der Temperatur t_{kal} = 21,1°C. Bei der Kalibrierung wurde bei einem Volumenstrom von 22,36 l/min ein Druckabfall von 10 mbar am LFE gemessen (c_{kal} = 2,236 l/(min·mbar)). Zum Einsatz kommt das LFE bei einer Lufttemperatur von 25°C.
Bei einem Druckabfall von 10mbar ändert sich der Volumenstrom gegenüber der Kalibrierung zu

$$Q_{vac} = 2{,}236\ \text{l/(min·mbar)} \cdot 10\text{mbar} \cdot \eta(294{,}25°\text{K}) / \eta(298{,}15°\text{K})$$
$$= 22{,}36\ \text{l/min} \cdot 181{,}86\mu\text{Poi} / 183{,}72\mu\text{Poi} = 22{,}13\ \text{l/min}$$

Eine nicht berücksichtigte Temperaturabweichung ΔT gegenüber der Kalibriertemperatur ruft im Bereich zwischen ca. 10 und 30°C folgende Abweichungen im Durchfluss hervor:

Δt [°C]	1	5	10
ΔQ [%v.M.]	0,26	1,3	2,6

3.) LFE Kalibrierkennlinie

Gleichungen (3) bzw. (4) stellen eine Vereinfachung der tatsächlichen Zusammenhänge dar. Man beobachtet daher bei LFE's in der Regel eine Abweichung von der linearen Beziehung (1) zwischen Q_{vac} und Δp in der Größenordnung bis ca. 2% (Bauch der Kennlinie). Zur Erreichung einer besseren Messgenauigkeit empfiehlt sich daher die Verwendung einer Polynomentwicklung zweiter (oder höherer) Ordnung:

$$Q_{kal} = B \cdot \Delta p + C \cdot \Delta p^2 \qquad (6)$$

bzw. $$Q_{vac} = (B \cdot \Delta p + C \cdot \Delta p^2) \cdot \eta_{kal} / \eta_{ac} \qquad (7)$$

Die Abweichung zwischen Polynomwert und gemessenem Durchfluss bei der Kalibrierung reduziert sich dadurch in der Regel auf weniger als ca. 0,2%.

4.) LFE Durchfluss-Umrechnung

Zur Umrechnung des aktuellen Volumenstroms auf Massen- oder Normvolumenstrom wird die **Kontinuitätsgleichung (Massenerhaltung) und die Dichteumrechnung entsprechend dem Gasgesetz** der Thermodynamik angewandt:

$$Q_m = \rho_{ac} \cdot Q_{vac} = \rho_{no} \cdot Q_{vno} = \rho \cdot Q \qquad (8)$$ mit Dichte $$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P \cdot M}{Z \cdot R \cdot T} = \frac{P}{Z \cdot R_S \cdot T} \qquad (9)$$

Alle Grössen in SI-Einheiten [m, kg, s, Pa, K]; Luft: Rs=287,0651 J/(kg*K); Z(ideal) = 1

5.) Anwendungsbereich

Die obige Beschreibung gilt für einen Temperaturbereich von 0 – 70°C. Zur Korrektur von Feuchteeinflüssen und für höhere Temperaturen sollte die Viskositätsberechnung nach Kestin-Whitelaw verwendet werden. Die Viskosität selbst bleibt bis 6 bar druckunabhängig, es treten aber bedingt durch Kompressionseffekte am Kapillareingang Druckabhängigkeiten auf, die eine Verschiebung der Kalibrierkurve um ca. 1%/bar bei Abweichungen vom Kalibrierdruck bewirken. Dies kann durch eine Kalibrierung bei Betriebsdruck vermieden oder durch das Reynoldszahl basierte „Universal flow“-Auswerteverfahren korrigiert werden.