

1. Funktionsweise

Volumenstrom-Messkreuze sind Druckdifferenznehmer zur Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit bzw. des Volumenstroms in Luftkanälen. Das Volumenstrom-Messkreuz besteht aus zwei Rohren, die quasi-diagonal in einem Kanalquerschnitt montiert werden. Diese Rohre sind mit einer Reihe gleichgroßer Bohrungen versehen. Auf einem Rohr zeigen die Bohrungen direkt der Strömung entgegen und sammeln den Gesamtdruck, auf dem anderen zeigen sie strömungsabwärts und nehmen den "substatischen" Druck auf. Durch die Verteilung der Bohrungen wird eine Mittelung der Drücke erreicht. Die Enden der Rohre werden nach außen geführt. Die Differenz zwischen diesen beiden Drücken repräsentiert das Druckdifferenzsignal, welches in Relation zur vorhandenen Geschwindigkeit bzw. dem Volumenstrom steht. In Relation zum dynamischen Druckanteil ist dieses Signal um den Faktor 2,0 stärker.

Bitte beachten Sie: mit den Volumenstrom-Messkreuzen kann nicht der statische Systemdruck gemessen werden!

2. Konstruktion

Die Messkreuzrohre bestehen aus Edelstahl, außerdem wird PVC, Polyurethan, Acetatkunststoff und Neopren/Santopengummi verwendet. Die Druckanschlüsse haben einen Durchmesser von 6 mm und sind zur Aufnahme von Kunststoffschläuchen geeignet. Die Mediumtemperatur darf 80°C nicht überschreiten.

3. Anwendungsmöglichkeiten

Das Volumenstrom-Messkreuz liefert nützliche und zuverlässige Ergebnisse im breiten Anwendungsbereich. Allerdings sollten Messkreuze nicht oder nur bedingt dort eingesetzt werden, wo hohe Luftfeuchtigkeit mit Kondensatbildung oder Verschmutzung durch Material klebriger Konsistenz vorhanden sind. In Luftkanälen mit höherer Staubbelastung sollte auf Zugriffsmöglichkeiten für eine regelmäßige Kontrolle und Reinigung geachtet werden. Das Messsignal eines Volumenstrom-Messkreuzes kann auf verschiedene Weise genutzt werden:

- 3.1 als Kontroll- und Regeleinrichtung in Verbindung mit einem radizierenden Druckmessumformer mit elektrischem Ausgang und einer entsprechenden Steuerung mit oder ohne Digitalanzeige der Strömungsgeschwindigkeit oder des Volumenstroms vor Ort,
- 3.2 zur Anzeige der Geschwindigkeit oder des Volumenstroms, z.B. mit einem Mikromanometer,
- 3.3 als Grenzwertmelder oder Warngerät in Verbindung mit entsprechendem Messumformer,
- 3.4 zur optischen Volumenstrom-Kontrolle mit einem einfachen flüssigkeitsgefüllten Manometer.

4. Positionierung

Volumenstrom-Messkreuze sind in geraden Kanalstücken und im rechten Winkel zur Kanalachse zu montieren. Folgende Hinweise sind zu beachten:

- 4.1 Halten Sie Abstand von mindestens $3,5 D$ zu Bögen ($r = 1D$) strömungsaufwärts und kleineren Störstellen.
- 4.2 Bei gravierenden Störstellen (z.B. rechtwinklige Bögen, Stellklappen) werden längere Beruhigungsstrecken benötigt, siehe dazu auch Absatz 10.
- 4.3 Strömungsabwärts sollte mindestens $3 D$ freie Auslaufstrecke vorhanden sein.
- 4.4 Vermeiden Sie plötzliche Erweiterungen des Kanals direkt vor dem Messkrenz (Bild 2a)
- 4.5 Eine örtliche Verjüngung ist nützlich zur Erhöhung der Druckdifferenz bei niedrigen Geschwindigkeiten (Abbildung 2b).
- 4.6 Bei starken Turbulenzen sollte im Abstand mindestens $2 D$ vor dem Messkrenz ein Gleichrichter eingebaut werden.

Anmerkung:

bei rechteckigen Kanälen ist $D = (\text{Breite} + \text{Höhe des Kanals}) / 2$

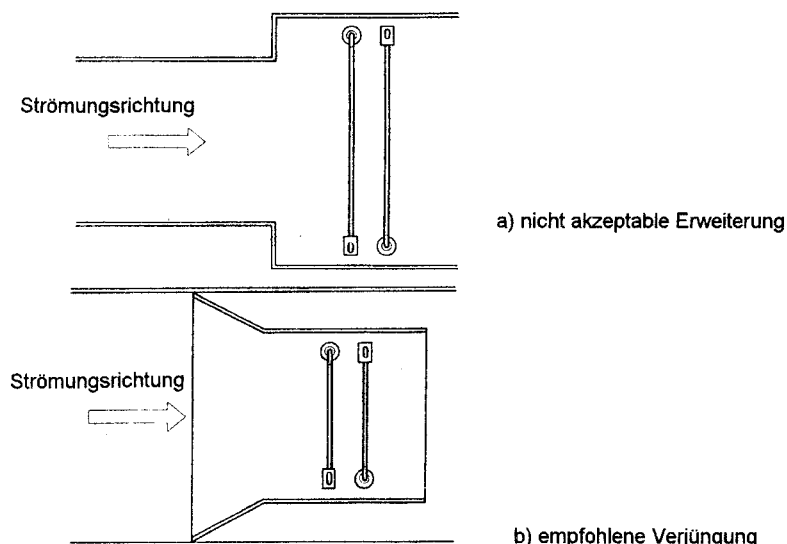


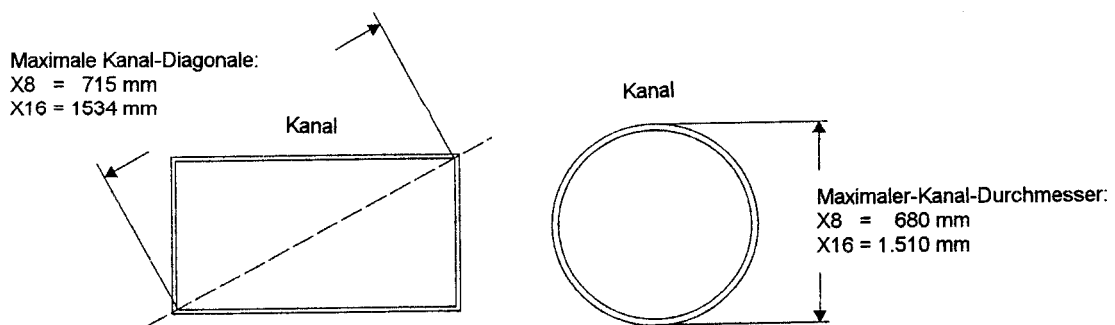
Abbildung 2 - Veränderung des Kanalquerschnitts an der Messstelle

5. Installation

Volumenstrom-Messkreuze können in quadratischen, rechteckigen oder runden Luftkanälen montiert werden. Der Durchmesser des runden Kanals sollte jedoch mindestens 350 mm betragen. Die flexiblen Flansche passen sich dann dem Radius der Kanalwand an. Je nach Größe des Kanals werden die Druckrohre vor Ort gekürzt.

Volumenstrom-Messkreuze werden in zwei Größen geliefert:

Rohrdurchmesser (mm)	Rohrlänge (mm)	max. Diagonale (mm) rechteckiger Kanal	max. Durchmesser (mm) runder Kanal
8	788	715	680
16	1518	1534	1510



Volumenstrom-Messkreuze werden in Bausätzen mit allen nötigen Einzelteilen geliefert. Inhalt des Bausatzes:

Bezeichnung	Menge
Druckaufnahmerohre mit Adapter	2
Klemmplatten	2
Endabdeckungen	2
Klemmscheiben	2
Bohrschablonen rechteckig	2
Bohrschablonen rund	2
Membrane	2
Druckanschlussstutzen (Kniestücke)	2
Rohrkappen	2
Tüllen	2
Kappendichtungen	2
Adapterdichtungen	2
Blechsrauben 3 x 13	16

5.1 Legen Sie den geeigneten Einbauort gemäß Absatz 4 fest.

5.2 Die Volumenstrom-Messkreuze sind zum Einbau in die "kürzeren" Luftkanalseiten vorgesehen. Markieren Sie den Kanal gemäß den Maßen nach Abbildung 3, kleben die selbstklebenden Bohrschablonen auf die entsprechenden Stellen und bohren die notwendigen Löcher. Entgraten Sie anschließend sorgfältig.

5.3 Führen Sie die Rohre bis zum Anschlag in den Kanal ein und sichern Sie die Adapterplatten mit der entsprechenden Montageplatte und den Schrauben (Abbildung 4). Die Bohrungen längs der Druckaufnahmerohre müssen voneinander weg zeigen.

5.4 Während Sie die Rohre gegen die Kante des Kanals drücken, längen Sie sie so ab, dass noch ca. 5-7 mm außen vorstehen. Nach sorgfältigem Entgraten und Beseitigen aller scharfen Kanten schieben Sie die Rohrkappen auf (Abbildung 5).

5.5 Montieren Sie dann die Blechdurchführungen an den Außenseiten beginnend.

5.6 Jetzt werden die Dichtungen und die Rohrkappen mit dem runden Montagering und den Schrauben montiert (Abbildung 6).

5.7 Die Druckanschlussstutzen werden auf die Enden der Rohre aufgedrückt. Die Richtung, in die der Stutzen zeigt, kann frei gewählt werden. (Abbildung 7).

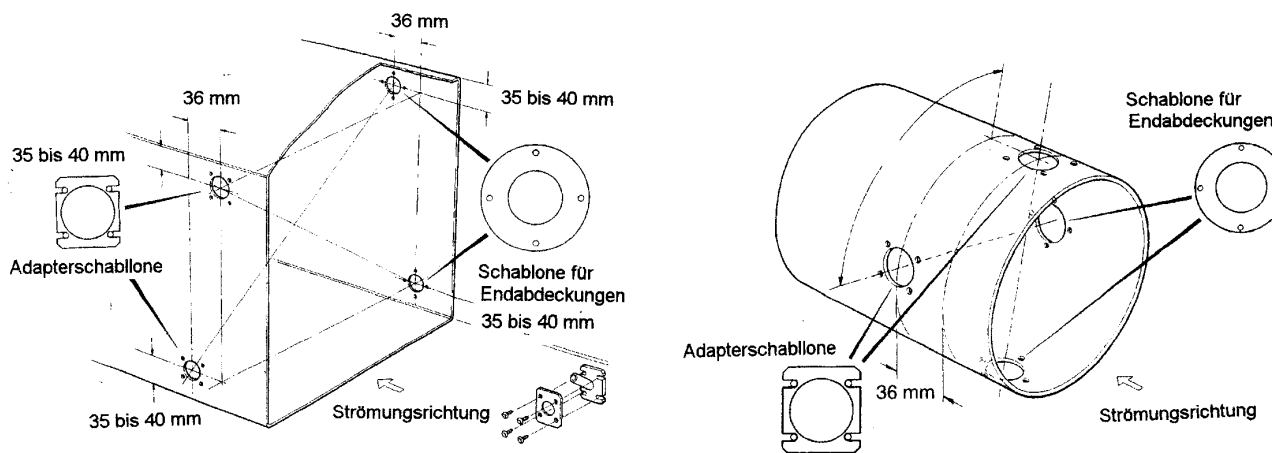


Abbildung 3 – Anordnung der Bohrungen (Maße in mm)

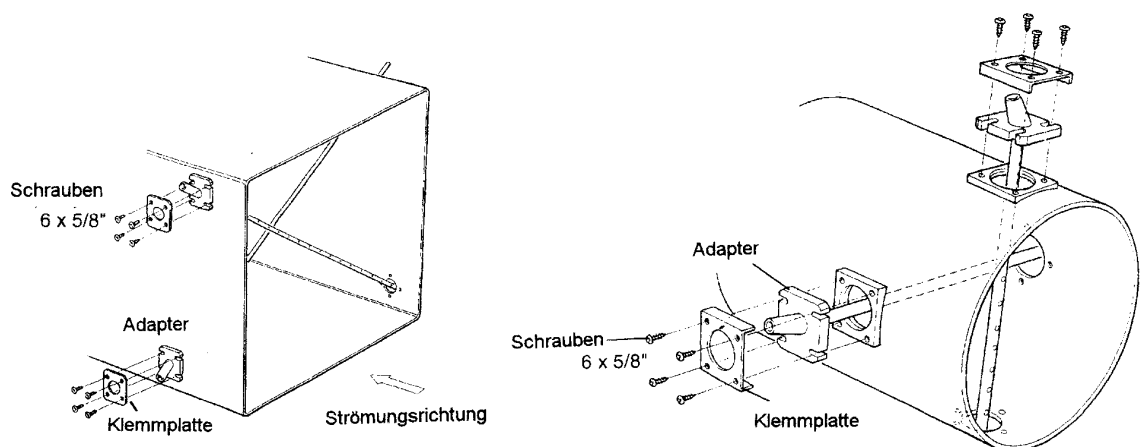


Abbildung 4 – Einsetzen der Rohre

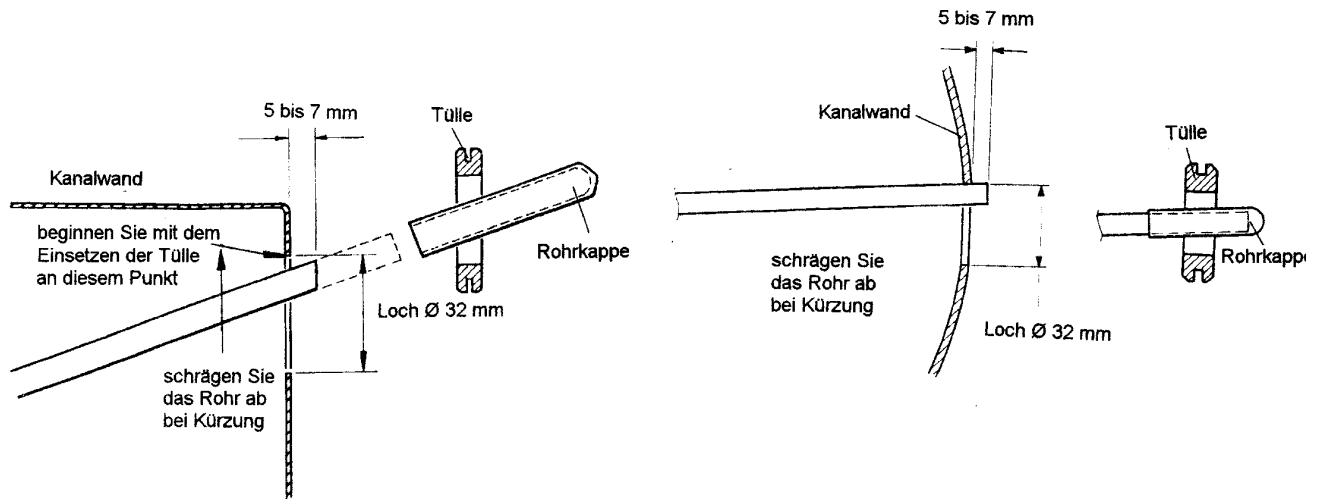


Abbildung 5 – Anpassen der Druckrohlänge

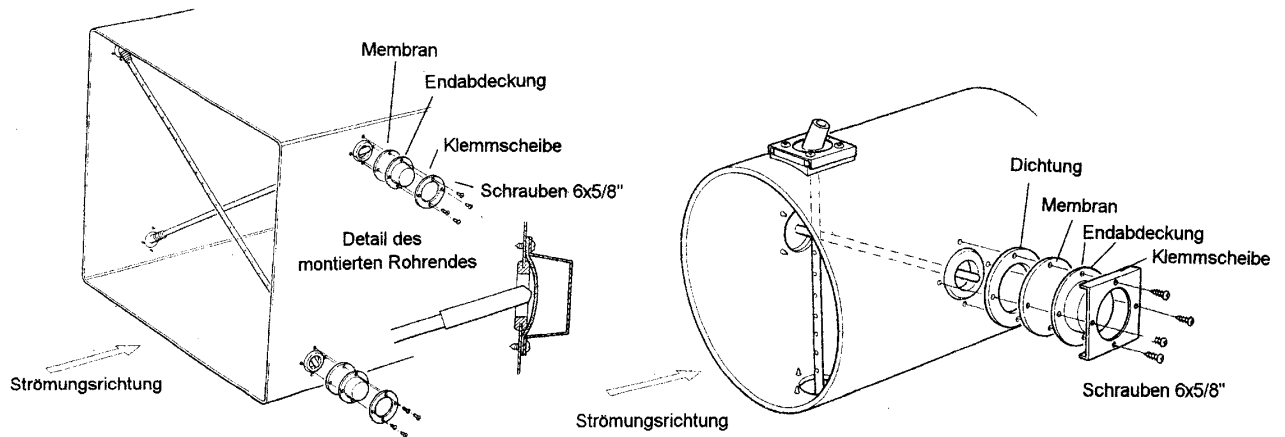


Abbildung 6 – Anordnung der Endabdeckungen

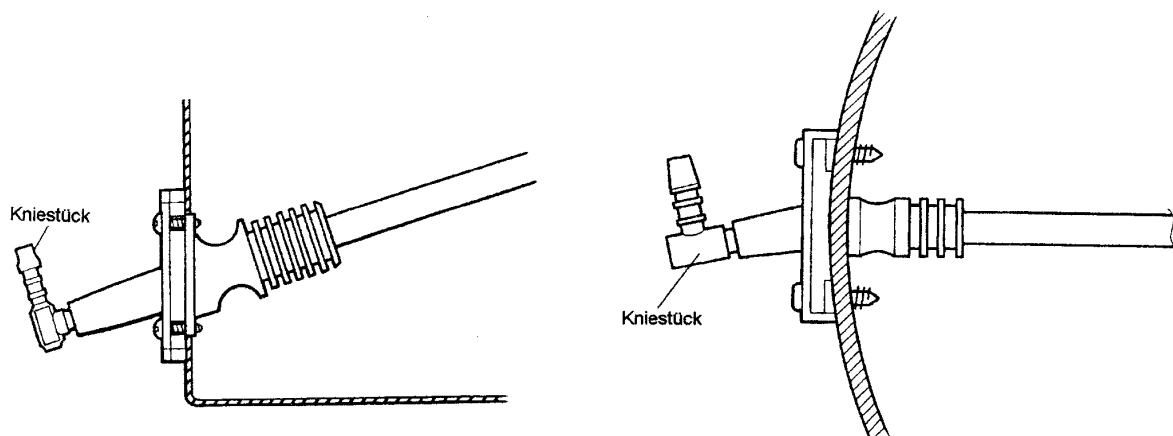


Abbildung 7 - Detail Adapter mit Kniestück

Abbildung 7 – Detail Adapter mit Kniestück

6. Instrumentierung

Die Volumenstrom-Messkreuze sind kein komplettes Messsystem. Zur Vervollständigung der Anlage ist noch eine nachgeordnete Messtechnik notwendig.

- 6.1 Für gelegentliche Überprüfungen sind die transportablen Handmessgeräte aus dem Volumenstrom Messgeräteprogramm (PVM100, MEDM 500) nützlich, wobei mit dem MEDM 500 unmittelbar Druck, Mediumgeschwindigkeit und Volumenstrom angezeigt werden kann.
- 6.2 Mit einem Druckmessumformer kann ein Industriestandardsignal bereitgestellt werden. PCE Deutschland hat eine Palette dieser Umformer in verschiedenen Ausführungen und mit unterschiedlichen Messbereichen im Programm.
- 6.3 Zum Zweck der Systemüberwachung kann ein Messumformer mit Relaisausgang angeboten werden. Fordern Sie weitere Unterlagen hierzu an.

Als Zubehör benötigen Sie flexiblen PVC-Schlauch, um die Druckanschlussstutzen mit den entsprechenden Messgeräten zu verbinden.

7. Signalauswertung

Da die Volumenstrom-Messkreuze als Bausatz geliefert werden und anwenderseitig auf Länge gebracht werden, ist es nur möglich, eine typische Strömungsgeschwindigkeitskurve dem Messkrenz beizulegen. Mit Hilfe dieser Kurve ist es möglich, die Luftgeschwindigkeit bzw. den Volumenstrom gemäß den in Tabelle 10 dargestellten Toleranzen zu bestimmen unter der Voraussetzung, dass die Empfehlungen aus Absatz 4 eingehalten werden. Bei höheren Genauigkeitsansprüchen ist eine Kalibrierung vor Ort erforderlich.

7.1 Strömungsgeschwindigkeit und Volumenstrom

Der mit dem Volumenstrom-Messkrenz ermittelte Differenzdruck ist proportional zum dynamischen Druck des Systems. Mit einem geeigneten Messumformer wird der dynamische Druck in ein elektrisches Signal umgeformt und durch elektronische Radizierung linearisiert. PCE Deutschland bietet Ihnen den entsprechend optimalen Messbereich an. Das analoge Messsignal entspricht dann von 0 bis 100 % dem Volumenstrom Ihrer Anlage.

7.2 Verstärkungsfaktor

Das Verhältnis zwischen dem mit dem Volumenstrom -Messkrenz ermittelten Differenzdruck und dem mittleren dynamischen Druck bei gegebener Strömungsgeschwindigkeit ist der Verstärkungsfaktor M.

Allgemein gilt: $p_d = p_g - p_s$

Da vom Messkrenz kein statischer Druck p_s abzuleiten ist, muss mit dem Verstärkungsfaktor gerechnet werden.

Formel 1 - Verstärkungsfaktor

$$M = \frac{\Delta p}{p_d}$$

Formel 2 - Herleitung der Strömungsgeschwindigkeit

$$w = \sqrt{\frac{2}{\rho} \times p_d} \Rightarrow 1,291 \sqrt{p_d}$$

Formel 3 - daraus folgt die Grundformel für das Messkreuz

$$w = \sqrt{\frac{2}{\rho} \times \frac{\Delta p}{M}} \Rightarrow 1,291 \sqrt{\frac{\Delta p}{M}}$$

Formel 4 - und wenn man Änderungen der Luftdichte berücksichtigt

$$w = \sqrt{\frac{2}{\rho} \times \frac{\Delta p}{M} \times CF} \Rightarrow 1,291 \sqrt{\frac{\Delta p}{M} \times CF}$$

Formel 5 - Volumenstrom

$$\dot{V} = A \sqrt{\frac{2}{\rho} \times \frac{\Delta p}{M} \times CF} \Rightarrow A \times w$$

Formel 6 - Druckverlustfaktor

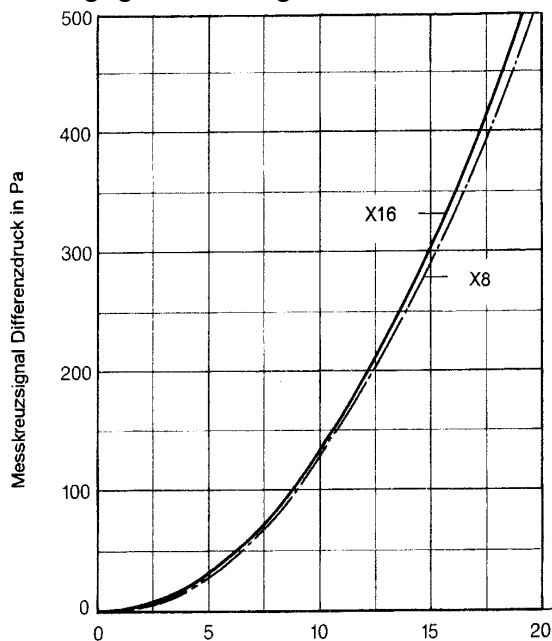
$$L = \frac{p_L}{p_d}$$

Abkürzungen in den Formeln bedeuten:

7.3 Druckverluste

Das Messkreuz bildet einen Systemwiderstand, der in einem Druckverlust resultiert. Der Druckverlust wird jeweils 1/2 D vor und hinter dem Messkreuz gemessen. Der Druckverlust wird nach der Formel 6 berechnet.

Abbildung 8 - Kurve der mittleren Strömungsgeschwindigkeit



Mittlere Strömungsgeschwindigkeit in m/s

Diese Kurve geht von der Dichte der Luft von 1,2 kg/m³ aus und sollte nur bei gängigen Genauigkeitsanforderungen angewendet werden. Für höhere Genauigkeitsansprüche ist eine Kalibrierung vor Ort unumgänglich.

1,291 = Faktor für Standard Luft (1,2 kg/m³)
 w = Strömungsgeschwindigkeit in m/s
 Δp = Differenzdruck aus dem Messkreuz in Pa

Pa

M = Verstärkungsfaktor

p_d = Dynamischer Druckanteil

p_s = Statischer Druck

p_L = Druckverlust

ρ = Dichte der Luft in kg/m³

CF = Korrekturfaktor $(= \frac{p_0}{p} = \frac{101350}{B} \times \frac{T}{293})$

B = barometrischer Luftdruck in Pa

T = absolute Temperatur in K

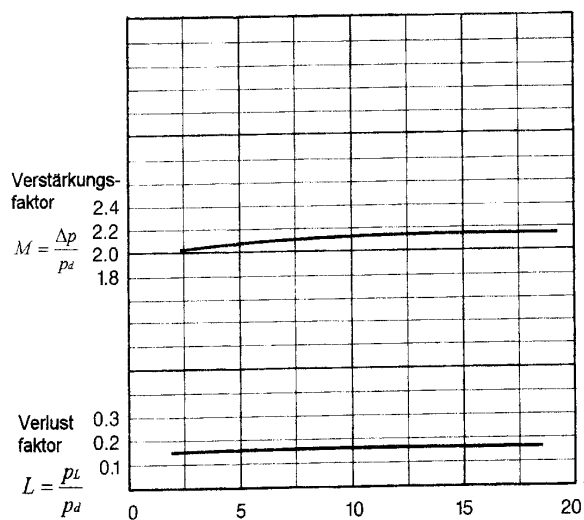
(= Temp. in °C + 273)

\dot{V} = Volumenstrom in m³/s

A = Querschnitt des Kanals in m².

L = Druckverlust-Faktor

Abbildung 9 - Kurve des Verstärkungsfaktors und des Verlustfaktors



Mittlere Strömungsgeschwindigkeit in m/s

8. Leistungskurven

Abbildung 8 zeigt eine Kurve, in der auf der Y-Achse der vom Messkreuz abgegebene Differenzdruck, auf der X-Achse die entsprechende Strömungsgeschwindigkeit dargestellt sind. Die Kurve gilt für Standardbedingungen und Luft einer Dichte $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$.

Für höhere Genauigkeiten muss eine Kalibrierung vor Ort (s. nächsten Absatz) gemacht werden. Abbildung 9 stellt den Verstärkungsfaktor M und den Verlustfaktor L graphisch dar.

9. Kalibrierung vor Ort

Zum Erreichen der höchst möglichen Genauigkeit müssen Volumenstrom-Messkreuze vor Ort eingemessen werden. Jede technisch sinnvolle Methode kann genutzt werden, um den tatsächlichen Volumenstrom im System zu bestimmen und in Relation zum Messkreuzsignal zu setzen. Die Vergleichsmessung kann je nach Gegebenheiten mit einem Anemometer oder Staurohr und Mikromanometer erfolgen. Staurohre, Mikromanometer und Anemometer verschiedener Bauart sind in einer großen Auswahl bei PCE-Deutschland erhältlich. Die im folgenden beschriebene Methode bedient sich des Staurohres, um mit einer Netzmessung den durchschnittlichen dynamischen Druck und somit die tatsächliche Strömungsgeschwindigkeit festzustellen.

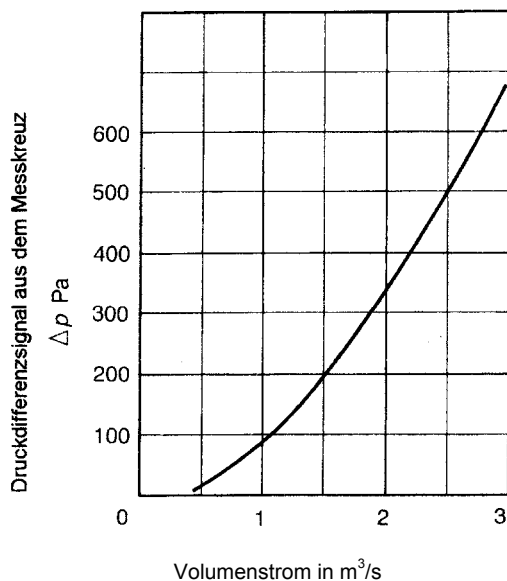
- 9.1 Installieren Sie das Volumenstrom-Messkreuz wie in Absatz 6 beschrieben und verbinden Sie es mit einem Manometer oder Messumformer passenden Messbereichs.
- 9.2 Bereiten Sie eine genügend große Anzahl von Bohrungen strömungsaufwärts des Messkreuzes vor, um durch eine Netzmessung ein repräsentatives Messergebnis zu erhalten.
- 9.3 Bringen Sie das System in einen charakteristischen Arbeitszustand und führen die Staurohrmessung durch. Notieren Sie die ermittelten Werte sowohl vom Messkreuz als auch vom Staurohr.
- 9.4 Wenn möglich, machen Sie die Messungen bei mindestens zwei unterschiedlichen Betriebszuständen der Anlage.
- 9.5 Die Berechnungen werden nach den Formeln durchgeführt, wie im Absatz 8 beschrieben.
- 9.6 Folgende Beispielwerte dienen zur Anleitung:

Mit dem Staurohr ermittelte dynamische Drücke										
Messung Nr.	Staurohr-Netzmessung					Durchschnittliche Werte		Messkreuz Δp	Mag.-Faktor $\frac{\Delta p}{p_d} = M$	Volumenstromkonstante $K' = A \times \frac{1,291}{\sqrt{M}}$
	1	2	3	4	5	$\sqrt{p_d}$	p_d			
p_d $\sqrt{p_d}$	250 15,81	230 15,17	260 16,12	240 15,49	212 14,56	15,43	238,08	514,2	2,160	0,1098
p_d $\sqrt{p_d}$	96 9,80	92 9,59	99 9,95	96 9,8	90 9,49	9,73	94,67	199,8	2,110	0,1111
p_d $\sqrt{p_d}$	48 6,93	46 6,78	47 6,86	51 7,14	45 6,71	6,88	47,33	98,1	2,072	0,1121
Kanalquerschnitt = 250 x 500 mm = 0,125 m ²								Ø K' = 0,1110		

In diesem Beispiel wurden für drei Betriebszustände je fünf Messungen mit dem Staurohr gemacht und die entsprechenden Drücke aus dem Messkreuz notiert. Mit diesen Daten und den Daten aus der nächsten Tabelle kann dann ein Volumenstromdiagramm speziell für diese Messstelle erstellt werden.

Daten für das Volumenstromdiagramm								
Δp vom Messkreuz in Pa	25	50	100	200	300	400	500	600
Wurzel aus Δp	5,00	7,07	10,00	14,14	17,32	20,00	22,36	24,49
Volumenstrom in m^3/s $\varnothing K' \times \sqrt{\Delta p}$	0,555	0,785	1,110	1,570	1,923	2,220	2,482	2,718

Resultierendes Volumenstromdiagramm:



10. Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messwerte.

Nach der folgenden Tabelle können Sie die zu erwartenden Fehlertoleranzen durch Systemeinflüsse und die Mindestabstände von Systemhindernissen beurteilen:

Hindernis:	Abstand für Toleranz:	
	ca. $\pm 10\%$	ca. $\pm 15\%$
rechtwinkliges Kniestück	10 D	3,5 D
Bogen ($R = < 1 D$)	10 D	3,5 D
Schalldämpfer	10 D	3,5 D
Bogen 30°	3,5 D	2,0 D
Verjüngung	3,5 D	2,0 D

Bei rechteckigen Kanälen gilt $D = (\text{Breite} + \text{Höhe}) / 2$. Die Wiederholgenauigkeit ist jedenfalls besser als $\pm 5\%$. Durch Kalibrierung vor Ort kann eine Fehlertoleranz von weniger als $\pm 5\%$ erreicht werden.

