

Luftgeschwindigkeitsmessung

Staurohr nach Prandtl und Zylindersonde als Staudruckgeber

Anwendung:

Unter den verschiedenen Möglichkeiten, die Luft- oder Gasgeschwindigkeit von laminaren Strömungen in rechteckigen und runden Kanälen zu messen, hat die Anwendung eines Staurohres nach Prof. Prandtl viele Vorteile. Auch die Strömungsmessung von Wasser ist damit möglich.

Geschwindigkeit - Durchfluß - statischer Druck: das kann beim Anschluß geeigneter Anzeiger durch das Staurohr ermittelt werden.

Vorteile des Staurohres nach Prandtl:

- Da das Staurohr eine absolute Meßmethode aufgrund einer klaren physikalischen Gesetzmäßigkeit ist, entfallen alle Eichungen im Strömungskanal mit Vergleichsmessungen, Eichkurven, unterschiedlichen Durchflußkoeffizienten (wie z.B. bei integrierenden Stabsonden oder parabolisch geformten Sondenköpfen). Deshalb heißt es in DIN 1946 (Lüftungstechnische Anlagen): „Im Kanal erfolgt die Geschwindigkeitsmessung am zuverlässigsten mit dem Prandtlischen Staurohr.“ . . . „Vergleichsprüfung nicht erforderlich.“
- Die Meßanordnung ist störunanfällig und sehr zuverlässig und bedarf nach dem Einbau kaum einer Wartung, nicht zuletzt deshalb, weil das System nicht vom Medium durchflossen wird und in der Strömung keine beweglichen Teile hat.
- Durch die robuste Bauweise ist es unempfindlich in Handhabung und Gebrauch und beim Transport.
- Das Staurohr besitzt eine große Richtungsunempfindlichkeit (größte zulässige Abweichung von der Mittelachse nach DIN 1946: $\pm 15^\circ$), was sich bei ungenauem Einbau und unbekannter Strömungsrichtung günstig auswirkt. Es ist lageunabhängig.
- Die Querschnittsverengung ist bei kleinen Staurohren ab etwa 50 mm Rohr- \emptyset äußerst gering. Der bleibende Druckverlust ist vernachlässigbar klein.
- Besonders für große Rohrdurchmesser und rechteckige Kanäle ist das Staurohr ein idealer, sehr preiswerter Wirkdruckgeber.
- Beim Staurohr sind die Ein- und Auslaufstrecken sehr kurz.
- Ausführung auch für hohe Temperaturen und aggressive Medien möglich (Werkstoff-Nr. 1.4541 und 1.4571).
- Verwendung auch bei unter Druck stehenden Leitungen möglich.
- Das Staurohr liefert ständig einen verzögerungsfreien Differenzdruck, so daß am Anzeiger jede Schwankung sofort erkannt werden kann.
- Die Übertragung des Meßwertes ist über gewisse Entfernungen möglich, wobei eine Vielzahl von Anzeigern, Transmittern und Schreibern für den Differenzdruck gewählt werden kann.

Theoretische Grundlagen der Messung mit dem Staurohr

Bei Verwendung eines Staurohres nach Prof. Dr. Ludwig Prandtl wird die Energiegleichung von Bernoulli angewandt: Die in einem strömenden Medium enthaltene Gesamtenergie ist die Summe des statischen und dynamischen Energieanteils.

$$\text{Gesamtdruck} = \text{statischer Druck} + \text{dynamischer Druck}$$

Der Gesamtdruck ist der auf einen kleinen Körper voll von der Strömung auftreffende Druck. Er wird als Plusdruck am halbkugelförmigen Kopf des Staurohres nach Prandtl gemessen. Der Gesamtdruck bleibt, abgesehen von Reibungsverlusten, im ganzen Rohrsystem konstant.

Der statische Druck p_{st} einer Strömung ist der dem Medium aufgezwungene "innere" Druck, den z.B. ein parallel zur Rohrwand strömendes Gas auf diese ausübt. Er kann am Ringspalt des Staurohres (Minusdruck) gemessen werden und ist auch bei nichtströmenden Medien vorhanden. Seine Größe bestimmt die Druckstufe (PN), nach der die Meßeinrichtung ausgelegt werden muß.

Der dynamische Druck p_d (Geschwindigkeitsdruck, Staudruck, Differenzdruck) ist der Teil des Gesamtdruckes, der durch die Geschwindigkeit des strömenden Gases erzeugt wird. Er kann mit Hilfe des Staurohres durch Differenzbildung an einem Differenzdruckmesser direkt abgelesen werden.

$$\text{Dynamischer Druck} = \text{Gesamtdruck} - \text{statischer Druck}$$

Er steht nach der z.Zt. gültigen Richtlinie SEB 384700 mit der **Gasgeschwindigkeit** in folgender Beziehung:

$$v_m = 4,43 \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot c}} \cdot \sqrt{p_{dm}} \quad [\text{m/s}]$$

$$\rho = (\rho_0 + w_0) \cdot 0,359 \cdot \frac{B + p_{st}}{273 + \vartheta} \cdot \frac{0,804}{0,804 + w_0} \quad [\text{kg/m}^3]$$



dosch messapparate

Bei Luft von 20 °C, 60% relativer Feuchte und 1013 mbar (760 mm QS) Barometerstand ist die

Gebrauchsformel:

$$v_m = 4,0457 \sqrt{p_{dm}}$$

m/s für Staurohr nach Prandtl

$$v_m = 3,1029 \sqrt{p_{dm}}$$

m/s für Zylindersonde

Die **Durchflußmenge** (Volumendurchfluß) erhält man durch Multiplikation der Geschwindigkeit mit dem Querschnitt:

$$V = v_m \cdot F \cdot 3600$$

[m³·/h]

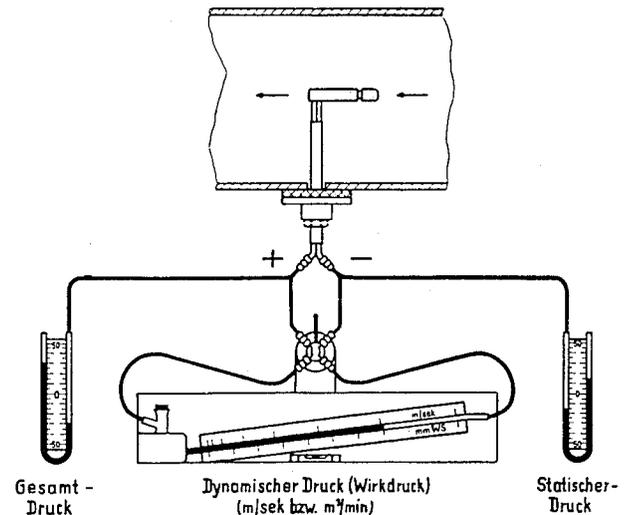
$$V_0 = V \cdot 0,359 \cdot \frac{B + p_{st}}{273 + \vartheta} \cdot \frac{0,804}{0,804 + w_0}$$

[m³/h] im Normalzustand

| | | | | | |
|----------|-----------------------|--|-------------|-----------------------|---|
| v_m | [m/s] | mittlere Gasgeschwindigkeit | B | [mm QS] | oder 0,750062 B [mbar] |
| ρ | [kg/m ³ f] | Gasdichte im Betriebszustand | | | Barometerstand an der Meßstelle |
| ρ_n | [kg/m ³] | Gasdichte im Normalzustand | p_{st} | [mm QS] | oder 0,750062 Pst [mbar] Unter- bzw. Überdruck an der Meßstelle |
| p_{dm} | [mm WS] | oder 10,197 P _{dm} [mbar] mittlerer dynamischer Druck | ϑ | [°C] | Gastemperatur |
| w_n | [kg/m ³] | Wassergehalt d. Gases i. Normalzust. | V | [m ³ f./h] | Gasmenge im Betriebszustand |
| C | - | Sonderbeiwert. Dieser beträgt: = 1,0 beim Staurohr nach Prandtl = 1,7 bei Zylindersonde (SEB 384700) | V_n | [m ³ /h] | Gasmenge im Normalzustand |
| | | | F | [m ²] | Querschnitt der Rohrleitung |

Schematischer Aufbau der Meßeinrichtung

Nebenstehend ist die Gesamtanordnung der Strömungsmessung in einer Rohrleitung mit Staurohr nach Prandtl dargestellt. Das Staurohr dient zur Erzeugung des Staudruckes. Dabei trifft auf die Stauspitze der **Gesamtdruck** auf (Plus +), während parallel zur Rohrachse der **statische Druck** (Minus -) aufgenommen wird. Beide können einzeln z.B. durch U-Rohre gemessen werden. Der Differenzdruck zwischen beiden Anschlüssen steht mit der Strömungsgeschwindigkeit (oder dem Durchfluß) in einem quadratischen Zusammenhang, so daß die Teilstriche der Geschwindigkeitsskala des Schräghr-Manometers am Anfang zusammengedrängt sind. Radizierung bei V 521 oder Ringwaagen möglich.



Anweisung zur Messung mit dem Staurohr

1) Hinweise zur Auswahl des Staurohres oder der Zylindersonde

- Durchmesser:** Da nur die geometrischen Maße festgelegt sind, können die Staurohre in verschiedenen Durchmessern ausgeführt werden. Unsere Maße entsprechen den Angaben nach Prof. Prandtl (siehe Tabelle). Die Richtlinie SEB 384700 gibt an, daß der Sonden-Außen-Durchmesser nicht kleiner als 8 mm sein sollte. Beim Staurohr von 3 mm Ø (Innendurchmesser von 1 mm) genügen schon geringste Verunreinigungen oder die Bildung eines Kondensat-Tröpfchens, um die Messung ungenau werden zu lassen oder undurchführbar zu machen. Je staubhaltiger das Gas, desto größer muß die Stauöffnung sein.
- Nennlänge** (Länge des Eintauchschafes): Diese muß mindestens den halben Kanaldurchmesser zuzüglich der Kanalwandstärke betragen. Diesen Wert auf die nächst größere, listenmäßige Nennlänge aufrunden. Bei größeren Längen und waagrechtem Einbau läßt sich eine gewisse Staurohrdurchbiegung nicht vermeiden. Verstärktes Außenrohr wählen und folgende Vorschrift beachten:

„Bei großen Rohrdurchmessern müssen die Staurohre an genügend starken, vibrationssteifen Haltestangen befestigt werden, die den Querschnitt nicht unzulässig verengen. Fest eingebaute Staurohre werden an einem vibrationssteifen Meßkreuz befestigt.“

2) Ein- und Auslaufstrecken:

Zur Vermeidung von Wirbelbildungen sollen nach DIN 1946 bei Staurohren nach Prandtl vorgesehen werden ($D = \text{Rohrinnen}\varnothing$ oder flächengleicher Querschnitt bei rechteckigen Kanälen):

Gerade, störungsfreie Einlaufstrecke = 6 bis 7 D

Gerade, störungsfreie Auslaufstrecke = 2 bis 3 D

Bei starker Verwirbelung ist ein Gleichrichter notwendig.

3) Das Staurohr nach Prandtl

wird mit seinem Düsenkopf parallel zur Rohrleitung, entgegen der Strömungsrichtung in die Mittelachse des Rohres eingebracht. Anschluß entsprechend dem "schematischen Aufbau der Meßeinrichtung". Bei starken Wirbeln ergibt sich ein zu hoher Staudruck. Bei Versuchs- und Labormessungen genügt die Abdichtung mittels eines durchbohrten oder zweiteiligen Gummistopfens. Bei stationärer Verwendung erhält das Staurohr eine Einschraubstopfbuchse, die in eine auf die Rohrleitung angeschweißte Muffe oder einen Gewindeflansch eingeschraubt wird.

4) Anschluß

Der nach unten weisende Anschluß (Plus +) und der in Strömungsrichtung weisende Anschluß (Minus -) werden mit den Anschlüssen des Differenzdruckanzeigers verbunden, sinnvollerweise unter Zwischenschaltung eines Vierwegehahnes oder Doppelhahnes, der beide Meßleitungen gleichzeitig ein- und ausschaltet und die Nullstellung der Differenzdruckanzeiger ermöglicht. Bei Schlauch-tüllenanschlüssen eignet sich elastischer Labor-Gummischlauch (leicht lösbar) oder PVC-Schlauch (stationäre Verlegung). Für Metall-Leitungen werden meist Schneidringverschraubungen (Ermeto) für Rohr von 12 mm \varnothing vorgesehen.

5) Als Anzeiger

können Flüssigkeits-Manometer, Ringwaagen, Zeigerdifferenzdruckmesser mit Kapselfeder oder mit überdrucksicherem Membranmeßwerk, Differenzdrucktransmitter und Schreiber verwendet werden, wobei in vielen Fällen eine Funktionsskala direkt in Geschwindigkeits- oder Durchflußeinheiten vorgesehen werden kann. Andernfalls müssen die Werte aus dem Differenzdruck durch die "Gebrauchsformel" (s.o.) errechnet werden.

6) Bildung des Mittelwertes:

a) Das Staurohr mißt die Geschwindigkeit **punktförmig** an der Stelle der Strömung, an der sich die Sondenspitze befindet. In dem Rohr herrscht aber ein Geschwindigkeitsprofil, wobei die Geschwindigkeit in der Rohrmitte am größten ist und um so weiter absinkt, je näher man der Rohrwandung kommt. Für genaue Messungen ist es deshalb notwendig, das Geschwindigkeitsprofil für 2 zueinander senkrecht stehende Rohrachsen aufzunehmen, um die **mittlere Geschwindigkeit** zu erhalten. Es wird folgendes Verfahren angewandt: Man teilt den Rohrquerschnitt in flächengleiche Kreisringe auf, wobei die Messung genau im Radius des Schwerpunktkreises jedes Ringes erfolgen soll. Aus den ermittelten Einzelgeschwindigkeiten wird die mittlere Geschwindigkeit durch Bildung des arithmetischen Mittels errechnet. Die Schwerpunktradien bei flächengleichen Kreisringen und Durchmesser $D = 1,00$ sind:

| Anzahl der Kreisringe | r1 | r2 | r3 | r4 | r5 | r6 | r7 | r8 | r9 | r10 |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 5 | 0,95 | 0,84 | 0,71 | 0,55 | 0,31 | -- | -- | -- | -- | -- |
| 10 | 0,98 | 0,92 | 0,87 | 0,81 | 0,75 | 0,67 | 0,59 | 0,50 | 0,39 | 0,22 |

Bei beliebigem Rohrinne Durchmesser in mm muß dieser mit den vorgenannten Werten multipliziert werden, um die Schwerpunktradien in mm zu erhalten. Notfalls genügt es, die Messungen über **eine** Rohrachse durchzuführen.

- b) Bei rechteckigen Kanälen wird der Querschnitt in 9-16 Quadrate unterteilt, die Geschwindigkeit in der Mitte jeden Quadrates gemessen und daraus das arithmetische Mittel gebildet.
- c) Wenn die Durchschnittsgeschwindigkeit ermittelt ist, wird das Staurohr solange verschoben, bis die Stelle erreicht ist, an der die errechnete Durchschnittsgeschwindigkeit herrscht. Hier erfolgt im Dauerbetrieb der endgültige Einbau.
- d) **Einfache Methode:** Da der Geschwindigkeitsabfall in allen Rohren annähernd gleich ist, kann der Düsenkopf des Staurohres auch genau in Rohrachse gebracht werden. Die dann ermittelte maximale Geschwindigkeit der Strömung muß für Rohr \varnothing bis 100 mm nach DIN 1946 mit dem Faktor 0,9 multipliziert werden, um die annähernd durchschnittliche Geschwindigkeit zu erhalten. Für größere Rohre ist in der Literatur der Faktor 0,84 angegeben.