

# Durchflußmessung mit Blenden, Düsen und Venturirohren in voll durchströmten Rohren mit Kreisquerschnitt (VDI-Durchflußmeßregeln)

**DIN**  
**1952**

Measurement of fluid flow by means of orifice plates, nozzles and venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full (VDI-rules for measurement of fluid)

Ersatz für  
Ausgabe 08.71

Mesure de débit des fluides au moyen de diaphragmes, tuyères et tubes de Venturi insérés dans des conduites en charge de section circulaire (règles du VDI pour mesures de débit des fluides)

Die Internationale Norm ISO 5167, Ausgabe 1. Februar 1980, ist in diese deutsche Norm sachlich (und weitestgehend auch formal) unverändert übernommen worden, wobei der Text durch Hinzufügen von Ergänzungen und Hinweisen auf deutsche Verhältnisse angepaßt wurde.

Weiterhin wurde der Text etwas gestrafft, indem gewisse Weitschweifigkeiten und Wiederholungen gestrichen sind, vorwiegend in den Abschnitten 7.1.7.3; 7.1.9; 7.2.4.5; 7.2.4.6; 8.1.2.5; 8.2.1.3; 9.1.2.1; 9.1.2.3 und 9.2.1.2.

Sachlich stimmt jedoch DIN 1952 mit ISO 5167 völlig überein.

## 1 Zweck und Anwendungsbereich

In dieser Norm werden die Abmessungen und die Anwendung (Einbau- und Betriebsbedingungen) von Blenden, Düsen und Venturirohren, die in einer voll gefüllten Rohrleitung zur Bestimmung des Durchflusses eingebaut sind, beschrieben. Außerdem werden die Berechnungsgrundlagen für den Durchfluß und für die damit verbundene Meßunsicherheit angegeben.

Die Norm gilt nur für Geräte, in denen die Strömung innerhalb der gesamten Meßstrecke im Unterschallbereich liegt, stationär ist oder sich nur langsam mit der Zeit ändert, und in denen das Fluid einphasig ist. Zusätzlich kann jedes Gerät nur in den festgelegten Grenzen, z. B. für den Rohrdurchmesser und für die Reynoldszahl, benutzt werden. Daher gilt die Norm weder für Rohrdurchmesser, die kleiner als 50 mm oder größer als 1200 mm sind, noch für Reynoldszahlen unter 3150.

In dieser Norm werden nur Gerätearten behandelt, für die Kalibrierungen in genügender Anzahl und Genauigkeit vorliegen, so daß deren Resultate auf ähnliche Anordnungen innerhalb bestimmter Grenzen der Meßunsicherheit übertragbar sind.

Die Geräte, die in die Rohrleitung eingebaut werden, heißen Drossel- oder auch Primärgeräte<sup>1)</sup>. Hierzu gehören auch die Druckentnahmen. Alle weiteren Geräte, die für die Messung erforderlich sind, heißen Sekundärgeräte. In dieser Norm werden nur die Drosselgeräte beschrieben, Sekundärgeräte<sup>2)</sup> werden nur gelegentlich erwähnt.

Folgende Arten von Drosselgeräten werden behandelt:

Blenden mit verschiedenen Druckentnahmen:

- Blenden mit Eck-Druckentnahme<sup>3)</sup>
- Blenden mit  $D$ - und  $D/2$ -Druckentnahme<sup>4)</sup>
- Blenden mit Flansch-Druckentnahme

Düsen:

- ISA-1932-Düse<sup>5)</sup>
- Langradius-Düse

beide unterscheiden sich sowohl in der Form als auch in der Lage der Druckentnahmen.

Venturirohre:

- Klassisches Venturirohr<sup>6)</sup>
- Venturidüse

beide unterscheiden sich ebenfalls sowohl in der Form als auch in der Lage der Druckentnahmen.

## 2 Formelzeichen und Definitionen

Die in der Norm verwendeten Begriffe und Formelzeichen sind in ISO 4006 "Measurement of fluid flow in closed conduits-Vocabulary and symbols" definiert<sup>7)</sup>.

Tabelle 1 enthält die Formelzeichen, die in dieser Norm benutzt werden.

Definitionen werden in den folgenden Abschnitten nur für Begriffe gegeben, die in einem bestimmten Sinne gebraucht werden oder bei denen es nützlich ist, ihre Bedeutung zu wiederholen.

- 1) Ein Drosselgerät ist ein Wirkdruckgeber, der durch eine Strömungsverengung einen Wirkdruck erzeugt, siehe auch DIN 19 201.
- 2) Siehe ISO 2186 „Fluid flow in closed conduits – Connections for pressure signal transmission between primary and secondary devices“. Ferner Richtlinie VDI/VDE 3512 Blatt 1 „Meßanordnungen; Durchflußmessungen mit Drosselgeräten“.
- 3) Frühere deutsche Normblende.
- 4) Blenden mit Vena-Contracta-Druckentnahme werden hier nicht behandelt.
- 5) ISA ist die Abkürzung für „International Federation of the National Standardizing Associations“, dem Vorgänger der ISO vor 1946. Die ISA 1932-Düse ist mit der früheren deutschen Normdüse identisch.
- 6) In den USA wird das Klassische Venturirohr vielfach „Herschel venturi tube“ genannt.
- 7) Für die deutsche Sprache gilt DIN 19 201.

Fortsetzung Seite 2 bis 62

## 2.1 Formelzeichen

Tabelle 1. Formelzeichen

| Formelzeichen         | Dargestellte Größe                                                                                                                   | Dimensionen<br>M: Masse<br>L: Länge<br>T: Zeit<br>Θ: Temperatur | SI-Einheit <sup>3)</sup> |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------|
| $C$                   | Durchflußkoeffizient $C = \alpha/E$                                                                                                  | Dimension 1                                                     | 1                        |
| $d$                   | Durchmesser der Drosselöffnung unter Betriebsbedingungen                                                                             | L                                                               | m                        |
| $D$                   | Innerer Rohrdurchmesser stromaufwärts (bzw. Durchmesser des Einlaufzylinders beim Klassischen Venturirohr) unter Betriebsbedingungen | L                                                               | m                        |
| $e$                   | Relative Unsicherheit                                                                                                                | Dimension 1                                                     | 1                        |
| $E$                   | Vorgeschwindigkeitsfaktor $E = (1 - \beta^4)^{-1/2}$                                                                                 | Dimension 1                                                     | 1                        |
| $k$                   | Äquivalente Rohrrauheit (siehe Abschnitt 7.3.2.1)                                                                                    | L                                                               | m                        |
| $l$                   | Abstand der Druckentnahme vom Drosselgerät                                                                                           | L                                                               | m                        |
| $L$                   | Relativer Abstand der Druckentnahme vom Drosselgerät $L = l/D$                                                                       | Dimension 1                                                     | 1                        |
| $p$                   | Statischer Druck des Fluids                                                                                                          | $ML^{-1} T^{-2}$                                                | Pa                       |
| $q_m$                 | Massendurchfluß                                                                                                                      | $MT^{-1}$                                                       | kg/s                     |
| $q_v$                 | Volumendurchfluß                                                                                                                     | $L^3 T^{-1}$                                                    | m <sup>3</sup> /s        |
| $R$                   | Radius                                                                                                                               | L                                                               | m                        |
| $R_a$                 | Mittenrauhwert                                                                                                                       | L                                                               | m                        |
| $Re$                  | Reynoldszahl                                                                                                                         | Dimension 1                                                     | 1                        |
| $Re_D$                | Reynoldszahl bezogen auf D bzw. d                                                                                                    | Dimension 1                                                     | 1                        |
| $Re_d$                |                                                                                                                                      |                                                                 |                          |
| $t$                   | Temperatur des Fluids                                                                                                                | Θ                                                               | °C                       |
| $\bar{u}$             | Mittlere axiale Geschwindigkeit des Fluids in der Rohrleitung                                                                        | $LT^{-1}$                                                       | m/s                      |
| $X$                   | Akustisches Verhältnis $X = \Delta p / (p_1 \kappa)$                                                                                 | Dimension 1                                                     | 1                        |
| $\alpha$              | Durchflußzahl                                                                                                                        | Dimension 1                                                     | 1                        |
| $\beta$               | Durchmesserverhältnis $\beta = d/D^1)$                                                                                               | Dimension 1                                                     | 1                        |
| $\gamma$              | Verhältnis der spezifischen Wärmen <sup>2)</sup>                                                                                     | Dimension 1                                                     | 1                        |
| $\Delta p$            | Wirkdruck                                                                                                                            | $ML^{-1} T^{-2}$                                                | Pa                       |
| $\Delta \bar{\omega}$ | Druckverlust                                                                                                                         | $ML^{-1} T^{-2}$                                                | Pa                       |
| $\epsilon$            | Expansionszahl                                                                                                                       | Dimension 1                                                     | 1                        |
| $\kappa$              | Isentropenexponent                                                                                                                   | Dimension 1                                                     | 1                        |
| $\eta$                | Dynamische Viskosität des Fluids <sup>4)</sup>                                                                                       | $ML^{-1} T^{-1}$                                                | Pa · s                   |
| $\nu$                 | Kinematische Viskosität des Fluids $\nu = \eta/\rho$                                                                                 | $L^2 T^{-1}$                                                    | m <sup>2</sup> /s        |
| $\xi$                 | Relativer Druckverlust                                                                                                               | Dimension 1                                                     | 1                        |
| $\rho$                | Dichte des Fluids                                                                                                                    | $ML^{-3}$                                                       | kg/m <sup>3</sup>        |
| $\tau$                | Druckverhältnis $\tau = p_2/p_1$                                                                                                     | Dimension 1                                                     | 1                        |
| $\varphi$             | Gesamtwinkel des Diffusors                                                                                                           | Dimension 1                                                     | rad                      |

1) Statt des Durchmesserverhältnisses wird vielfach auch das Öffnungsverhältnis  $m = \beta^2 = d^2/D^2$  verwendet.

2) Verhältnis der spezifischen Wärmen bei konstantem Druck zu der bei konstanter Temperatur. Für ideale Gase sind die Zahlenwerte dieses Verhältnisses und die des Isentropenexponenten (siehe Abschnitt 2.4.3) gleich. Dieser Wert hängt dann nur mehr von der Gasart ab.

3) 1 steht hier für das Verhältnis zweier gleicher SI-Einheiten.

4) In dieser Norm wird in Übereinstimmung mit ISO 31/III, ISO 5168 und DIN 1304 für die dynamische Viskosität das Formelzeichen  $\eta$  verwendet.

Index 1 bezieht sich auf den Zustand stromaufwärts, in der Ebene der Plus-Druckentnahme (siehe DIN 19 201)

Index 2 bezieht sich auf den Zustand stromabwärts, in der Ebene der Minus-Druckentnahme (siehe DIN 19 201)

## 2.2 Druckmessung: Definitionen

### 2.2.1 Druckentnahme

Öffnung in der Rohrwand, deren innere Kante mit der Innenwand des Rohres bündig ist.

Die Öffnung ist gewöhnlich kreisrund, in bestimmten Fällen kann sie aber auch ein ringförmiger Schlitz sein.

### 2.2.2 Statischer Druck eines Fluids, das durch eine gerade Rohrleitung fließt

Druck, der durch Anschluß eines Manometers an eine Druckentnahme gemessen werden kann. In dieser Norm wird nur der absolute Druck benutzt.

### 2.2.3 Wirkdruck

Differenz der statischen Drücke zwischen den Druckentnahmen im Einlauf (Plus-Druckentnahme) und Auslauf (Minus-Druckentnahme) eines Drosselgerätes (bzw. im Halsteil eines Venturirohres), das in eine gerade, durchströmte Rohrleitung eingebaut ist, wobei Höhenunterschiede zwischen den Druckentnahmen im Ein- und Auslauf berücksichtigt sind.

Der Ausdruck „Wirkdruck“ wird nur verwendet, wenn sich die Druckentnahmen an den Stellen befinden, die in der Norm für die verschiedenen Drosselgeräte vorgeschrieben sind.

### 2.2.4 Druckverhältnis

Verhältnis des absoluten statischen Druckes an der Druckentnahme im Auslauf zu dem an der Druckentnahme im Einlauf.

## 2.3 Drosselgeräte: Definitionen

### 2.3.1 Drosselöffnung

Kleinster Öffnungsquerschnitt in einem Drosselgerät.

Die genormten Drosselöffnungen sind kreisrund und coaxial zur Rohrachse.

### 2.3.2 Blende

Blenden sind dünne Scheiben mit kreisrunder Öffnung und scharfer rechtwinkliger Kante der Drosselöffnung. Ihre Dicke ist klein gegen den Rohrdurchmesser, und die Einlaufkante der Drosselöffnung ist scharf und rechtwinklig.

### 2.3.3 Düse

Düsen bestehen aus einem sich verengenden Einlauf und einem anschließenden zylindrischen Halsteil.

### 2.3.4 Venturirohr

Venturirohre bestehen aus einem sich verengenden Einlauf, einem anschließenden zylindrischen Halsteil und einem sich konisch erweiternden Auslauf, der „Diffusor“ genannt wird.

Das Gerät wird „Venturidüse“ genannt, wenn das sich verengende Einlaufteil eine ISA 1932-Düse ist. Ist das sich verengende Einlaufteil konisch, so wird das Gerät „Klassisches Venturirohr“ genannt.

### 2.3.5 Durchmesser Verhältnis eines Drosselgerätes in einer Rohrleitung

Verhältnis des Durchmessers der Drosselöffnung zum Innendurchmesser der Rohrleitung im Einlauf zum Drosselgerät<sup>8)</sup>.

Hat das Drosselgerät einen Einlaufzylinder, dessen Durchmesser dem Rohrdurchmesser äquivalent ist (wie beim Klassischen Venturirohr), dann ist das Durchmesser Verhältnis der Quotient aus dem Durchmesser der Drosselöffnung zum Durchmesser des Einlaufzylinders in der Ebene der Plusdruckentnahme.

## 2.4 Strömung: Definitionen

### 2.4.1 Durchfluß

Masse oder Volumen eines Fluids, das ein Drosselgerät in der Zeiteinheit durchströmt. In allen Fällen muß angegeben werden, ob es sich um den Massendurchfluß (Masse pro Zeiteinheit) oder um den Volumendurchfluß (Volumen pro Zeiteinheit) handelt.

### 2.4.2 Reynoldszahl

Die Reynoldszahl wird entweder auf den Rohrdurchmesser stromaufwärts vom Drosselgerät

$$Re_D = \frac{U_1 D}{\nu_1}$$

oder auf die Drosselöffnung

$$Re_d = Re_D \beta^{-1}$$

bezogen.

### 2.4.3 Isentropenexponent

Der Isentropenexponent  $\kappa$  erscheint in den verschiedenen Gleichungen für die Expansionszahl  $\epsilon$  entweder explizit oder implizit im Verhältnis  $X$ . Der Isentropenexponent hängt von der Art des Gases, dessen Temperatur und Druck ab.

Für viele Gase und Dämpfe sind bis jetzt noch keine  $\kappa$ -Werte veröffentlicht worden. In diesen Fällen kann statt des Isentropenexponenten das Verhältnis der spezifischen Wärmen idealer Gase zur Berechnung des Durchflusses benutzt werden.

<sup>8)</sup> In den früheren Auflagen von DIN 1952 und in der Literatur wird das Quadrat des Durchmesser Verhältnisses  $m = \beta^2$ , Öffnungsverhältnis genannt, benutzt.

#### 2.4.4 Akustisches Verhältnis

Verhältnis des relativen Wirkdruckes zum Isentropenexponenten (für kompressible Fluide)<sup>9)</sup>.

#### 2.4.5 Vorgeswindigkeitsfaktor

$$E = (1 - \beta^4)^{-1/2} = \frac{D^2}{\sqrt{D^4 - d^4}}$$

#### 2.4.6 Durchflußzahl und Durchflußkoeffizient

Kalibrierungen von genormten Drosselgeräten mit praktisch inkompressiblen Fluiden (Flüssigkeiten) zeigen, daß die dimensionslose Durchflußzahl

$$\alpha = \frac{q_m}{\frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2 \Delta p \rho_1}}$$

für ein bestimmtes Drosselgerät bei bestimmten Einbauverhältnissen nur von der Reynoldszahl abhängt.

Die Durchflußzahl  $\alpha$  hat in verschiedenen Meßanordnungen den gleichen Zahlenwert, wenn diese geometrisch ähnlich sind, und die Strömungen die gleiche Reynoldszahl aufweisen.

Das Verhältnis

$$C = \alpha/E$$

wird Durchflußkoeffizient genannt. Die Gleichungen für die Durchflußzahl  $\alpha$  und den Durchflußkoeffizient  $C$ , die in dieser Norm angegeben werden, beruhen auf experimentell ermittelten Werten.

#### 2.4.7 Expansionszahl

Die Kalibrierung von Drosselgeräten mit kompressiblen Fluiden (Gasen) zeigt, daß das Verhältnis

$$\frac{q_m}{\frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2 \Delta p \rho_1}}$$

sowohl von der Reynoldszahl als auch vom relativen Wirkdruck und dem Isentropenexponenten des Gases abhängt.

Die Abhängigkeit wird dadurch dargestellt, daß man die Durchflußzahl  $\alpha$  des betreffenden Drosselgerätes, wie sie sich bei der direkten Kalibrierung mit einer Flüssigkeit bei gleicher Reynoldszahl ergibt, mit einer „Expansionszahl“ multipliziert, die durch die Beziehung

$$\epsilon = \frac{q_m}{\alpha \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2 \Delta p \rho_1}}$$

definiert ist.

Die Expansionszahl ist gleich eins, wenn das Fluid inkompressibel ist, und kleiner als eins, wenn es kompressibel ist.

<sup>9)</sup> Der relative Wirkdruck ist der Quotient aus dem Wirkdruck und dem Absolutdruck an der Druckentnahme im Einlauf.

Die Gültigkeit des Verfahrens ist durch Versuche bestätigt. Diese zeigen, daß die Expansionszahl  $\epsilon$  praktisch von der Reynoldszahl unabhängig ist und für ein gegebenes Durchmesser- und Drosselgerätnur vom relativen Wirkdruck und vom Isentropenexponenten abhängt.

Die Werte, die in dieser Norm für  $\epsilon$  angegeben werden, sind experimentell ermittelt worden.

#### 2.4.8 Rauheitsmaß

Als Rauheitsmaß für bearbeitete Teile wird in dieser Norm der arithmetische Mittenrauhwert  $R_a$  nach ISO R 468 benutzt<sup>10)</sup>. Er ist gleich dem Mittelwert der absoluten Beträge der Abweichungen des rauhen Profils von einer Mittellinie. Letztere ist so definiert, daß die Summe der Quadrate der Abstände der Oberfläche von der Mittellinie ein Minimum ist.  $R_a$  kann für bearbeitete Oberflächen mit Standardeinrichtungen gemessen, für rauhe Rohre aber nur geschätzt werden.

Für rauhe Rohre wird die äquivalente Rohrrauheit benutzt. Sie kann experimentell bestimmt oder aus Tabellen (siehe Abschnitt 7.3.1, Tabelle 6) entnommen werden.

### 3 Meßprinzip und Berechnungsverfahren

#### 3.1 Meßprinzip

Das Meßprinzip beruht darauf, daß ein Drosselgerät (z.B. eine Blende, eine Düse oder ein Venturirohr) in eine voll durchströmte Rohrleitung eingebaut wird. Der Einbau des Drosselgerätes erzeugt eine Differenz der statischen Drücke zwischen dem Einlauf und dem Drosselquerschnitt bzw. dem Auslauf. Der Durchfluß kann aus der gemessenen Druckdifferenz (dem Wirkdruck) und aus den Stoffwerten des Fluids und den Betriebsbedingungen berechnet werden, sofern die Meßanordnung einer direkt kalibrierten geometrisch ähnlich ist, d.h. sofern sie in Übereinstimmung mit dieser Norm ist.

Für die Beziehung zwischen dem Massendurchfluß und dem Wirkdruck gilt innerhalb der in dieser Norm angegebenen Unsicherheit die Gleichung:

$$q_m = \alpha \epsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2 \Delta p \rho_1} \quad (1)$$

bzw.

$$q_m = C E \epsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2 \Delta p \rho_1} \quad (2)$$

Entsprechend kann der Volumendurchfluß aus

$$q_v = \frac{q_m}{\rho} \quad (3)$$

berechnet werden. Hierin ist  $\rho$  die Dichte des Fluids bei der Temperatur und dem Druck, auf die das Volumen bezogen wird.

#### 3.2 Bestimmung des Durchmesser- und Drosselverhältnisses

Ist der Durchmesser eines Drosselgerätes zu bestimmen, das in eine gegebene Rohrleitung zur Druckmessung

<sup>10)</sup> Siehe auch DIN 4768 Teil 1

einzubauen ist, dann sind  $\alpha$  bzw.  $CE$ , die in die Grundgleichungen (1) bzw. (2) eingehen, im allgemeinen nicht bekannt. Es sind dann zunächst

- die Art des zu verwendenden Drosselgerätes und
- ein numerischer Wert für den Durchfluß und für den dazugehörigen Wirkdruck festzulegen.

Die zusammengehörigen Werte von  $q_m$  und  $\Delta p$  müssen dann in die Grundgleichung, die in der Form

$$\alpha \beta^2 = \frac{4 q_m}{\epsilon \pi D^2 \sqrt{2 \Delta p \rho_1}}$$

geschrieben werden kann, eingesetzt werden. Das Durchmesserverhältnis kann dann durch Iteration bestimmt werden.

### 3.3 Berechnung des Durchflusses

Der Durchfluß ist aus den Grundgleichungen (1) oder (2) zu bestimmen. Dazu ist folgendes zu beachten:

- a)  $\alpha$  kann von der Reynoldszahl abhängen, die wiederum eine Funktion von  $q_m$  ist. In diesem Falle wird der endgültige Wert von  $\alpha$  und damit von  $q_m$  durch Iteration ermittelt, wobei von einem frei gewählten Anfangswert für  $\alpha$  bzw.  $Re$  ausgegangen wird. Im allgemeinen ist es zweckmäßig, vom  $\alpha$ -Wert für eine Reynoldszahl von  $10^6$  auszugehen.
- b)  $\Delta p$  ist der Wirkdruck nach Abschnitt 2.2.3.
- c)  $d$  und  $D$  sind in den Gleichungen die Durchmesserwerte unter Betriebsbedingungen. Werden  $D$  und  $d$  unter Umgebungsbedingungen gemessen, so muß die Dehnung des Drosselgerätes und der Rohrleitung mit der Temperatur und dem Druck des Fluids berücksichtigt werden.
- d) Für die Messung muß die Dichte und Viskosität des Fluids bei Betriebsbedingungen bekannt sein.

### 3.4 Bestimmung der Dichte

Die Dichte des Fluids in der Ebene der Plus-Druckentnahme muß bekannt sein. Sie kann entweder direkt gemessen oder aus dem Druck, der Temperatur und den charakteristischen Eigenschaften des Fluids in dieser Ebene berechnet werden.

#### 3.4.1 Der statische Druck muß in der Ebene der Plus-

Druckentnahme entweder mit einer Einzelanbohrung in der Rohrwand (siehe Abschnitt 7.2.1) oder mit einer Druckentnahme in einem Fassungsring (siehe Abschnitt 7.2.4) gemessen werden.

**3.4.1.1** Die Entnahme des statischen Druckes soll vorzugsweise getrennt von der Plus-Druckentnahme des Wirkdruckes erfolgen, es sei denn der Plus- und Minusdruck werden getrennt gemessen.

Es dürfen jedoch an der Plus-Druckentnahme gleichzeitig ein Differenzdruckmeßgerät und ein Meßgerät für den statischen Druck angeschlossen werden, wenn dadurch mit Sicherheit keine Verfälschung des Wirkdruckes eintritt.

**3.4.1.2** Der statische Druck, der für die nachfolgenden Berechnungen benutzt wird, ist auf das Niveau der Mitte des stromaufwärts befindlichen Meßquerschnitts zu beziehen. Dieser Druck kann sich von dem an der Wand unterscheiden.

**3.4.2** Obwohl die Dichte und Viskosität auf die Temperatur des Fluids in der Ebene der Plus-Druckentnahme zu beziehen sind, soll die Temperatur möglichst hinter dem Drosselgerät gemessen werden, wobei die Thermometertasche so dünn wie möglich sein muß. Der Abstand zwischen ihr und dem Drosselgerät muß mindestens  $5 D$  betragen, wenn sie stromabwärts angeordnet ist. Der Abstand muß mit den Werten der letzten beiden Zeilen von Tabelle 3 übereinstimmen, wenn die Thermometertasche stromaufwärts angeordnet ist.

Ist das zu messende Fluid ein Gas, so kann seine Temperatur aus dem stromabwärts gemessenen Wert unter Annahme einer isentropen Expansion durch das Drosselgerät bestimmt werden.

**3.4.3** Jede Methode zur Bestimmung der Dichte, des statischen Druckes und der Temperatur des Fluids ist anwendbar, sofern sie zuverlässige Werte für den Druck, die Temperatur, die Viskosität und die Dichte des Fluids in der Ebene der Plus-Druckentnahme liefert, ohne die Durchflußmessung in irgendeiner Weise zu stören.

**3.4.4** Die Temperatur des Drosselgerätes und die des Fluids im Einlauf zum Drosselgerät können als gleich angesehen werden (siehe Abschnitt 6.1.9).

#### 4 Auswahl des Drosselgerätes

Tabelle 2 gibt einige Hinweise zur Auswahl des Drosselgerätes.

Tabelle 2. Gesichtspunkte zur Auswahl des Drosselgerätes

| Gesichtspunkte                                            | Erwägungen zur Auswahl                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rohrdurchmesser<br>Durchmesser Verhältnis<br>Reynoldszahl | Für jede Art von Drosselgerät gibt es Grenzwerte für den inneren Rohrdurchmesser, das Durchmesser Verhältnis und die Reynoldszahl. Falls die gewählten Werte für den Durchfluß und den Wirkdruck bei Blenden ein Durchmesser Verhältnis ergeben, das den zulässigen Grenzwert überschreitet, dann kann unter Umständen eine Düse angewendet werden, da diese unter gleichen Bedingungen ein kleineres Durchmesser Verhältnis ergibt. |
| Druckverlust                                              | Bei gleichem Wirkdruck ist der Druckverlust des klassischen Venturirohres und der Venturidüse nur 1/4 bis 1/6 des Druckverlustes der Blende und Düse.                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Gerade Ein- und Auslaufstrecken                           | Klassische Venturirohre ermöglichen kürzere gerade Rohrstrecken als Blenden, Düsen und Venturidüsen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Baulänge                                                  | Der erforderliche Abstand zwischen den Anschlußflanschen zum Einbau des Drosselgerätes ist bei klassischen Venturirohren und Venturidüsen wesentlich größer als bei anderen Drosselgeräten.                                                                                                                                                                                                                                          |
| Art des Fluids                                            | Bei verschleißenden und korrodierenden Fluiden können sich die Durchflußzahlen der Blenden mit der Zeit stetig ändern, da sich die scharfe Kante abrundet. Bei Düsen und Venturirohren haben Schmutzablagerungen anfänglich einen merklichen Einfluß auf die Durchflußzahl, der sich jedoch mit zunehmender Betriebszeit stabilisiert.                                                                                               |
| Genauigkeit                                               | Die Unsicherheit der Beiwerte ist verschieden und wird für jede Art von Drosselgerät gesondert angegeben.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Kosten und Herstellung                                    | Blenden sind billiger und einfacher herzustellen als alle anderen Arten von Drosselgeräten.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

#### 5 Allgemeine Anforderungen an die Messung

Alle nachstehenden Anforderungen, von denen einige näher erläutert sind, müssen während der Messung eingehalten werden.

##### 5.1 Drosselgerät

**5.1.1** Das Drosselgerät muß entsprechend dieser Norm hergestellt, eingebaut und angewendet werden.

Werden die Grenzen der Gültigkeit der Norm überschritten, dann ist eine Kalibrierung unter den tatsächlichen Betriebsbedingungen erforderlich.

**5.1.2** Die Beschaffenheit des Drosselgerätes soll nach jeder Messung oder nach jeder Serie von Messungen oder in hinreichend kurzen Zeitintervallen überprüft werden, um eine Übereinstimmung mit dieser Norm sicherzustellen.

Zu beachten ist, daß auch anscheinend neutrale Fluide Ablagerungen oder Verkrustungen auf dem Drosselgerät hervorrufen können. Die dadurch verursachten Änderungen der Durchflußzahl können mit der Zeit größer werden als die in der Norm angegebenen Unsicherheiten.

**5.1.3** Das Drosselgerät soll aus einem Werkstoff bestehen, dessen Ausdehnungskoeffizient bekannt ist, es sei denn, daß Änderungen der Abmessungen durch Temperaturänderungen des zu messenden Fluids vernachlässigbar sind.

##### 5.2 Art des Fluids

**5.2.1** Das Fluid kann entweder kompressibel sein (Gas) oder als inkompressibel angesehen werden (Flüssigkeit).

**5.2.2** Das Fluid soll physikalisch und thermisch homogen und einphasig sein. Kolloidale Lösungen mit einem hohen Dispersionsgrad (z.B. Milch) können als einphasiges Fluid angesehen werden.

**5.2.3** Die Dichte und Viskosität des Fluids im Betriebszustand müssen bekannt sein (siehe Abschnitt 3.3 d).

##### 5.3 Strömungszustand

**5.3.1** Der Durchfluß soll konstant sein oder sich nur sehr langsam mit der Zeit ändern. In dieser Norm wird die Messung pulsierender Strömungen nicht behandelt<sup>11)</sup>.

<sup>11)</sup> Siehe Technical Report 3313 „Measurement of pulsating fluid flow by means of orifice plates, nozzles or venturi tubes, in particular in the case of sinusoidal or square wave intermittent periodic type fluctuation“; Hub ferner Richtlinie VDI/VDE 2040 Entwurf Blatt 1

**5.3.2** Die Strömung des Fluids durch das Drosselgerät darf keine Änderung der Phase hervorrufen. Zur Bestimmung, ob eine Phasenänderung eintritt, soll bei Gasen eine isentrope, bei Flüssigkeiten eine isotherme Expansion angenommen werden.

**5.3.3** Bei Gasen muß das Druckverhältnis (vgl. Abschnitt 2.2.4) gleich oder größer als 0,75 sein.

## 6 Anforderungen an den Einbau

### 6.1 Allgemeines

**6.1.1** Das Meßverfahren ist nur auf Fluide anwendbar, die durch eine Rohrleitung mit Kreisquerschnitt strömen.

**6.1.2** Die Rohrleitung muß im Bereich der Meßstrecke voll durchströmt werden.

**6.1.3** Das Drosselgerät muß an einer Stelle der Rohrleitung eingebaut sein, an der die Strömung im Einlauf ein hinreichend voll entwickeltes Geschwindigkeitsprofil aufweist und frei von Drall ist (vgl. Abschnitt 6.4). Diese Strömungsverhältnisse liegen vor, wenn der Einbau den Anforderungen von Abschnitt 6 entspricht.

**6.1.4** Das Drosselgerät muß zwischen zwei geraden zylindrischen Rohrstrecken eingebaut sein, in denen sich keine Hindernisse oder Rohrabzweigungen (einerlei, ob diese Abzweigungen während der Messung durchströmt werden oder nicht) — außer den in dieser Norm spezifizierten — befinden.

Die Rohrstrecken gelten als gerade, wenn dies durch bloßen Augenschein festgestellt wird. Die erforderlichen geraden Rohrstrecken hängen von der Art der Einbaustörung, von der Art des Drosselgerätes und vom Durchmesserverhältnis ab. Sie sind in den Tabellen 3 und 4 angegeben.

**6.1.5** Der Durchmesser  $D$  der Rohrleitung, der bei der Berechnung des Durchmesserverhältnisses verwendet werden muß, ist der Mittelwert des lichten Durchmessers auf einer Länge von  $0,5 D$  vor der Plus-Druckentnahme. Dieser mittlere lichte Durchmesser ist das arithmetische Mittel von mindestens je vier Durchmesserwerten in mindestens drei Querschnitten. Die drei Querschnitte sind auf der Länge von  $0,5 D$  so zu verteilen, daß sich einer  $0 D$  und einer  $0,5 D$  vor der Plus-Druckentnahme befindet. Wenn Fassungsringe (vgl. Bild 4 a) verwendet werden, ist das Maß  $0,5 D$  vom Anfang des Fassungsringes aus zu messen.

**6.1.6** Der Querschnitt des Rohres muß längs der erforderlichen geraden Rohrstrecke kreisrund sein. Der Quer-

schnitt gilt als kreisrund, wenn dies durch bloßen Augenschein festgestellt wird. Hierzu genügt die Beurteilung der Rundheit der Außenseite des Rohres, abgesehen vom Bereich in unmittelbarer Nähe des Drosselgerätes, in dem — je nach Art des Drosselgerätes — besondere Anforderungen gelten (siehe Abschnitte 6.5.1 und 6.6.1).

**6.1.7** Der lichte Durchmesser  $D$  der Rohrstrecke muß innerhalb der für die betreffende Drosselgeräteart angegebenen Grenzwerte liegen.

**6.1.8** Die Innenwand der Rohrstrecke muß auf eine Länge von  $10 D$  vor und  $4 D$  hinter dem Drosselgerät sauber, frei von Narben, Ablagerungen oder Verkrustungen sein.

**6.1.9** Die Rohrleitung und die Flansche sollen wenigstens über die gesamte erforderliche gerade Rohrstrecke thermisch isoliert sein. Eine Isolierung ist nicht erforderlich, wenn die Temperaturdifferenz des Fluids über dieser Rohrstrecke einen durch die geforderte Genauigkeit festgelegten Grenzwert nicht überschreitet.

### 6.2 Erforderliche störungsfreie gerade Rohrstrecken im Ein- und Auslauf zwischen verschiedenen Einbaustörungen und dem Drosselgerät

**6.2.1** Die erforderlichen geraden Rohrstrecken sind in den Tabellen 3 und 4 angegeben.

Anmerkung: Die relativ großen Unterschiede der erforderlichen geraden Rohrstrecken der Tabellen 3 und 4 sind zum Teil dadurch begründet, daß in den Unsicherheiten des Durchflußkoeffizienten  $C$ , auch bei den nicht eingeklammerten Werten, noch geringe, jedoch unterschiedliche Anteile durch Einbaustörungen enthalten sind.

Bei den klassischen Venturirohren sind diese Anteile vermutlich größer als bei Blenden, Düsen und Venturidüsen. Soll eine Reduzierung der Unsicherheit des Durchflußkoeffizienten  $C$  bei klassischen Venturirohren erreicht werden, so ist eine Kalibrierung mit den tatsächlich vorhandenen Ein- und Auslaufstrecken bei gleichen Reynoldszahlen durchzuführen.

**6.2.2** Die geraden Rohrstrecken nach den Tabellen 3 und 4 sind Mindestwerte. Die Verwendung größerer Längen ist immer empfehlenswert. Besonders bei Forschungsarbeiten wird empfohlen, die Werte der Tabellen 3 und 4 für „0 %-Zusatz-Unsicherheit“ wenigstens zu verdoppeln.

**6.2.3** Wenn die geraden Rohrstrecken den Anforderungen der Tabelle 3 oder 4 entsprechen, d.h. wenn sie größer oder gleich den für „0 %-Zusatz-Unsicherheit“<sup>12)</sup> angegebenen Werten sind, dann gelten für diese Einbauverhältnisse die Unsicherheiten der Durchflußkoeffizienten (oder der Durchflußzahlen) ohne Zuschläge.

<sup>12)</sup> nicht eingeklammerte Werte in den Tabellen 3 und 4

Tabelle 3. Erforderliche störungsfreie gerade Rohrstrecken für Blenden, Düsen und Venturidüsen

Mindestwerte für die geraden Rohrstrecken, die bei verschiedenen Einbaustörungen im Einlauf und Auslauf zwischen der Störung und dem Drosselgerät vorzusehen sind<sup>13)</sup>. Die Werte ohne Klammern gelten für „0 % Zusatz-Unsicherheit“ (siehe Abschnitt 6.2.3). Die eingeklammerten Werte gelten für „0,5 % Zusatz-Unsicherheit“ (siehe Abschnitt 6.2.4). Alle geraden Rohrstrecken sind in Vielfachen des Rohrdurchmessers  $D$  angegeben. Sie sind von der Anströmseite des Drosselgerätes aus zu messen.

| Durchmesser Verhältnis $\beta$ | Einlaufseite des Drosselgerätes                                   |                                                  |                                                    |                                                                          |                                                                     |                       |                         | Auslaufseite                                  |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------------------------------|
|                                | Einfacher 90°-Krümmer oder T-Stück (Strömung nur von einer Seite) | Zwei oder mehr 90°-Krümmer in der gleichen Ebene | Zwei oder mehr 90°-Krümmer in verschiedenen Ebenen | Reduzierstück (von 2 $D$ auf $D$ über eine Länge von 1,5 $D$ bis 3 $D$ ) | Diffusor (von 0,5 $D$ auf $D$ über eine Länge von 1 $D$ bis 2 $D$ ) | Ventil, voll geöffnet | Schieber, voll geöffnet | Alle in dieser Tabelle aufgeführten Armaturen |
| 0,20                           | 10 (6)                                                            | 14 (7)                                           | 34 (17)                                            | 5                                                                        | 16 (8)                                                              | 18 (9)                | 12 (6)                  | 4 (2)                                         |
| 0,25                           | 10 (6)                                                            | 14 (7)                                           | 34 (17)                                            | 5                                                                        | 16 (8)                                                              | 18 (9)                | 12 (6)                  | 4 (2)                                         |
| 0,30                           | 10 (6)                                                            | 16 (8)                                           | 34 (17)                                            | 5                                                                        | 16 (8)                                                              | 18 (9)                | 12 (6)                  | 5 (2,5)                                       |
| 0,35                           | 12 (6)                                                            | 16 (8)                                           | 36 (18)                                            | 5                                                                        | 16 (8)                                                              | 18 (9)                | 12 (6)                  | 5 (2,5)                                       |
| 0,40                           | 14 (7)                                                            | 18 (9)                                           | 36 (18)                                            | 5                                                                        | 16 (8)                                                              | 20 (10)               | 12 (6)                  | 6 (3)                                         |
| 0,45                           | 14 (7)                                                            | 18 (9)                                           | 38 (19)                                            | 5                                                                        | 17 (9)                                                              | 20 (10)               | 12 (6)                  | 6 (3)                                         |
| 0,50                           | 14 (7)                                                            | 20 (10)                                          | 40 (20)                                            | 6 (5)                                                                    | 18 (9)                                                              | 22 (11)               | 12 (6)                  | 6 (3)                                         |
| 0,55                           | 16 (8)                                                            | 22 (11)                                          | 44 (22)                                            | 8 (5)                                                                    | 20 (10)                                                             | 24 (12)               | 14 (7)                  | 6 (3)                                         |
| 0,60                           | 18 (9)                                                            | 26 (13)                                          | 48 (24)                                            | 9 (5)                                                                    | 22 (11)                                                             | 26 (13)               | 14 (7)                  | 7 (3,5)                                       |
| 0,65                           | 22 (11)                                                           | 32 (16)                                          | 54 (27)                                            | 11 (6)                                                                   | 25 (13)                                                             | 28 (14)               | 16 (8)                  | 7 (3,5)                                       |
| 0,70                           | 28 (14)                                                           | 36 (18)                                          | 62 (31)                                            | 14 (7)                                                                   | 30 (15)                                                             | 32 (16)               | 20 (10)                 | 7 (3,5)                                       |
| 0,75                           | 36 (18)                                                           | 42 (21)                                          | 70 (35)                                            | 22 (11)                                                                  | 38 (19)                                                             | 36 (18)               | 24 (12)                 | 8 (4)                                         |
| 0,80                           | 46 (23)                                                           | 50 (25)                                          | 80 (40)                                            | 30 (15)                                                                  | 54 (27)                                                             | 44 (22)               | 30 (15)                 | 8 (4)                                         |

| Für alle Durchmesser-Verhältnisse $\beta$ | Einbaustörungen                                                                                                        | Erforderliche gerade Rohrstrecke im Einlauf |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
|                                           | Abrupte symmetrische Durchmesser-Verengung mit einem Durchmesser-Verhältnis $\geq 0,5$                                 | 30 (15)                                     |
|                                           | Thermometertasche mit einem Durchmesser $\leq 0,03 D$<br>Thermometertasche mit einem Durchmesser von 0,03 bis 0,13 $D$ | 5 (3)<br>20 (10)                            |

6.2.4 Sind die geraden Rohrstrecken im Ein- oder Auslauf kürzer als die angegebenen Werte für „0 % Zusatz-Unsicherheit“<sup>12)</sup>, jedoch gleich oder größer als die angegebenen Werte für „0,5 % Zusatz-Unsicherheit“<sup>14)</sup>, so ist eine Zusatz-Unsicherheit im Betrag von 0,5 % arith-

metisch zur Unsicherheit des Durchflußkoeffizienten (oder der Durchflußzahl) zu addieren.

6.2.5 Gerade Rohrstrecken, die kürzer sind, als die für „0,5 % Zusatz-Unsicherheit“, werden in dieser Norm nicht behandelt. Dies gilt auch für den Fall, daß die geraden Rohrstrecken im Einlauf und Auslauf kürzer als die für „0 % Zusatz-Unsicherheit“ sind.

6.2.6 Die in den Tabellen 3 und 4 erwähnten Absperrarmaturen müssen voll geöffnet sein. Die Durchflußbeeinflussung ist möglichst hinter dem Drosselgerät einzubauen.

12) nicht eingeklammerte Werte in den Tabellen 3 und 4

13) Ergänzend hierzu werden in VDI/VDE 2040 Entwurf Blatt 1 Gleichungen für die Berechnung der geraden Einlaufstrecken gegeben (in Vorbereitung).

14) eingeklammerte Werte in den Tabellen 3 und 4

Tabelle 4. Erforderliche störungsfreie gerade Rohrstrecken für Klassische Venturirohre

Mindestwerte für die geraden Rohrstrecken, die bei verschiedenen Einbaustörungen im Einlauf zwischen Störung und Klassischem Venturirohr vorzusehen sind<sup>13)</sup>. Die Werte ohne Klammern gelten für „0 % Zusatz-Unsicherheit“. Die eingeklammerten Werte gelten für „0,5 % Zusatz-Unsicherheit“. Alle geraden Rohrstrecken sind in Vielfachen des Rohrdurchmessers  $D$  angegeben. Sie sind von der Plus-Druckentnahme des Klassischen Venturirohres aus zu messen. Die Rohrrauheit darf zumindest im Bereich der Rohrstrecken von Tabelle 4 nicht die eines handelsüblich glatten Rohres überschreiten (ungefähr  $k/D \leq 10^{-3}$ ).

Auslauflängen: Einbaustörungen (wie in Tabelle 4 angegeben) in einem Abstand von mindestens dem Vierfachen des Durchmessers der Drosselöffnung hinter der Minus-Druckentnahme beeinflussen die Genauigkeit der Messung nicht.

| Durchmesser Verhältnis $\beta$ | Einfacher 90°-Krümmer <sup>1)</sup> | Zwei oder mehr 90°-Krümmer in der gleichen Ebene <sup>1)</sup> | Zwei oder mehr 90°-Krümmer in verschiedenen Ebenen <sup>1) 2)</sup> | Reduzierstück von 3 $D$ auf $D$ über eine Länge von 3,5 $D$ | Diffusor von 0,75 $D$ auf $D$ über eine Länge von $D$ | Schieber voll geöffnet |
|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------|
| 0,30                           | 0,5 <sup>3)</sup>                   | 1,5 (0,5)                                                      | (0,5)                                                               | 0,5 <sup>3)</sup>                                           | 1,5 (0,5)                                             | 1,5 (0,5)              |
| 0,35                           | 0,5 <sup>3)</sup>                   | 1,5 (0,5)                                                      | (0,5)                                                               | 1,5 (0,5)                                                   | 1,5 (0,5)                                             | 2,5 (0,5)              |
| 0,40                           | 0,5 <sup>3)</sup>                   | 1,5 (0,5)                                                      | (0,5)                                                               | 2,5 (0,5)                                                   | 1,5 (0,5)                                             | 2,5 (1,5)              |
| 0,45                           | 1,0 (0,5)                           | 1,5 (0,5)                                                      | (0,5)                                                               | 4,5 (0,5)                                                   | 2,5 (1,0)                                             | 3,5 (1,5)              |
| 0,50                           | 1,5 (0,5)                           | 2,5 (1,5)                                                      | (8,5)                                                               | 5,5 (0,5)                                                   | 2,5 (1,5)                                             | 3,5 (1,5)              |
| 0,55                           | 2,5 (0,5)                           | 2,5 (1,5)                                                      | (12,5)                                                              | 6,5 (0,5)                                                   | 3,5 (1,5)                                             | 4,5 (2,5)              |
| 0,60                           | 3,0 (1,0)                           | 3,5 (2,5)                                                      | (17,5)                                                              | 8,5 (0,5)                                                   | 3,5 (1,5)                                             | 4,5 (2,5)              |
| 0,65                           | 4,0 (1,5)                           | 4,5 (2,5)                                                      | (23,5)                                                              | 9,5 (1,5)                                                   | 4,5 (2,5)                                             | 4,5 (2,5)              |
| 0,70                           | 4,0 (2,0)                           | 4,5 (2,5)                                                      | (27,5)                                                              | 10,5 (2,5)                                                  | 5,5 (3,5)                                             | 5,5 (3,5)              |
| 0,75                           | 4,5 (3,0)                           | 4,5 (3,5)                                                      | (29,5)                                                              | 11,5 (3,5)                                                  | 6,5 (4,5)                                             | 5,5 (3,5)              |

1) Der Radius des Krümmers (Mittelachse) muß gleich oder größer als der Rohrdurchmesser sein.

2) Da der Einfluß solcher Störungen auch nach 40  $D$  noch wirksam sein kann, können in der Tabelle nur eingeklammerte Werte angegeben werden.

3) Da keine Armatur in einem geringeren Abstand als 0,5  $D$  vor der Plus-Druckentnahme angeordnet werden kann, ist hier nur die „0 %-Zusatz-Unsicherheit“ möglich.

Anmerkung: Die Gründe, weshalb die erforderlichen geraden Rohrstrecken beim Klassischen Venturirohr kürzer sind, als die in Tabelle 3 für Blenden, Düsen und Venturidüsen, liegen unter anderem darin, daß

- sie aus verschiedenen Versuchen nach unterschiedlichen Auswertekriterien ermittelt worden sind, siehe auch Anmerkung in Abschnitt 6.2.1
- der sich verengende Teil des Klassischen Venturirohres in der Drosselöffnung des Drosselgerätes ein gleichmäßigeres Geschwindigkeitsprofil erzeugt.

Absperrarmaturen vor dem Drosselgerät sollen möglichst Schieber sein.

**6.2.7** Hinter einer einfachen Strömungsumlenkung (Krümmer, T-Stück) sollen Einzel-Druckentnahmen möglichst senkrecht zur Krümmerebene bzw. zur Ebene des T-Stückes angeordnet sein.

**6.2.8** Die in den Tabellen 3 und 4 angegebenen Werte wurden experimentell mit sehr langer gerader Rohrleitung vor der jeweiligen Einbaustörung ermittelt, so daß davor

ein genügend ausgebildetes drallfreies Geschwindigkeitsprofil angenommen werden durfte. Gewöhnlich gibt es solche Verhältnisse nicht. Die folgenden Bemerkungen können als Hinweis für den üblichen Einbau dienen.

- Ist das Drosselgerät in einer Leitung eingebaut, die aus einem Großraum entweder direkt oder über irgendeine Einbaustörung kommt, so darf die Gesamtlänge

13) Ergänzend hierzu werden in VDI/VDE 2240 Entwurf Blatt 1 Gleichungen für die Berechnung der geraden Einlaufstrecken gegeben (in Vorbereitung).

der Rohrleitung vom Großraum bis zum Drosselgerät nicht kürzer als  $30 D$  sein<sup>15)</sup>.

Wenn eine Einbaustörung vorhanden ist, so müssen außerdem zwischen ihr und dem Drosselgerät die geraden Rohrstrecken gemäß Tabelle 3 bzw. 4 eingehalten sein.

- b) Falls mehrere Einbaustörungen<sup>16)</sup> in Reihe vor dem Drosselgerät angeordnet sind, muß die folgende Regel angewendet werden: Zwischen der Einbaustörung (1), die dem Drosselgerät am nächsten ist, und dem Drosselgerät muß mindestens die gerade Rohrstrecke für das tatsächliche Durchmesser Verhältnis gemäß Tabelle 3 bzw. 4 vorhanden sein. Zusätzlich muß jedoch zwischen dieser Einbaustörung (1) und der nächsten vorangehenden Einbaustörung (2) eine gerade Rohrstrecke von mindestens der halben Länge vorhanden sein, die sich nach Tabelle 3 bzw. 4 für die Störung (2) bei einem Durchmesser Verhältnis  $\beta = 0,7$  ergibt und zwar unabhängig vom tatsächlichen Durchmesser Verhältnis<sup>16)</sup>. Diese Anforderung gilt nicht, wenn die Störung (2) eine abrupte symmetrische Durchmesser Verringerung ist. Dieser Fall ist durch den Abschnitt a) abgedeckt.

Falls eine der geraden Rohrstrecken einem eingeklammerten Wert entspricht (siehe Abschnitt 6.2.4), so muß eine „0,5 % Zusatz-Unsicherheit“ zur Unsicherheit des Durchflußkoeffizienten addiert werden.

### 6.3 Strömungsgleichrichter

Der Einsatz von Strömungsgleichrichtern in den Bauarten nach Abschnitt 6.3.2 und Bild 1 wird empfohlen, um Drosselgeräte hinter Störungen einbauen zu können, die nicht in Tabelle 3 oder 4 angegeben sind. Bei großen Öffnungsverhältnissen ermöglicht der Einsatz eines Gleichrichters unter Umständen eine Verkürzung der geraden Rohrstrecke vor dem Drosselgerät gemäß Tabelle 3.

Die Verwendung eines Strömungsgleichrichters nach Abschnitt 6.3.1 bedingt keine zusätzliche Unsicherheit für den Durchflußkoeffizienten.

#### 6.3.1 Einbau

Strömungsgleichrichter müssen auf der Einlaufseite in der geraden Rohrstrecke zwischen dem Drosselgerät und der dem Drosselgerät am nächsten liegenden Störung eingebaut werden. Die gerade Rohrstrecke zwischen Störung und Gleichrichter muß mindestens  $20 D$ , die zwischen Gleichrichter und Drosselgerät mindestens  $22 D$  lang sein, es sei denn, die Bedingungen des ersten Satzes von Abschnitt 6.4 sind erfüllt.

<sup>15)</sup> Da es für das Klassische Venturirohr keine Versuchsergebnisse gibt, werden hierfür die Anforderungen für Blenden und Düsen übernommen.

<sup>16)</sup> Im Fall mehrerer 90°-Krümmer muß die Tabelle 3 oder 4 angewendet werden, wenn die gerade Rohrstrecke zwischen den Krümmern kürzer ist, als unter b) gefordert.

Gleichrichter sind nur dann voll wirksam, wenn sie so eingebaut werden, daß nur noch kleinste Spalte am Umfang der „Widerstandselemente“ vorhanden sind. Eine Nebenströmung würde die Wirksamkeit beeinträchtigen.

#### 6.3.2 Bauarten von Gleichrichtern

Die drei genormten Bauarten A, B und C von Gleichrichtern sind im Bild 1 dargestellt. Diese Gleichrichter erzeugen einen Druckverlust und zwar

bei der Bauart A ungefähr  $5 (U^2 p/2)$ ,

bei der Bauart B ungefähr  $15 (U^2 p/2)$ ,

bei der Bauart C ungefähr  $5 (U^2 p/2)$ .

##### 6.3.2.1 Bauart A: Zanker-Gleichrichter

Dieser Gleichrichter besteht aus einer Lochplatte mit Bohrungen bestimmter Größe und anschließenden Kanälen (einem pro Bohrung) aus sich kreuzenden Platten. Die Hauptabmessungen sind in Bild 1 angegeben.

Die Platten müssen ausreichende Festigkeit aufweisen, sie sollen jedoch nicht unnötig dick sein.

##### 6.3.2.2 Bauart B: Sprenkle-Gleichrichter

Dieser Gleichrichter besteht aus drei Lochplatten, die in Abständen von je einem Rohrdurchmesser hintereinander angeordnet sind. Die Bohrungen werden zweckmäßigerweise auf der Anströmseite abgeschrägt. Die Gesamtfläche der Bohrungen jeder Platte soll größer als 40 % des Rohrquerschnittes sein. Das Verhältnis von Plattendicke zum Bohrungsdurchmesser  $d'$  muß mindestens 1 sein. Der Durchmesser der Bohrungen muß kleiner als  $1/20$  des Rohrdurchmessers sein.

Die drei Lochplatten sollen an ihrem Rand durch Stäbe miteinander verbunden sein. Diese müssen die erforderliche Festigkeit aufweisen, sollen jedoch im Querschnitt so klein wie möglich gehalten sein.

##### 6.3.2.3 Bauart C: Rohrbündel-Gleichrichter

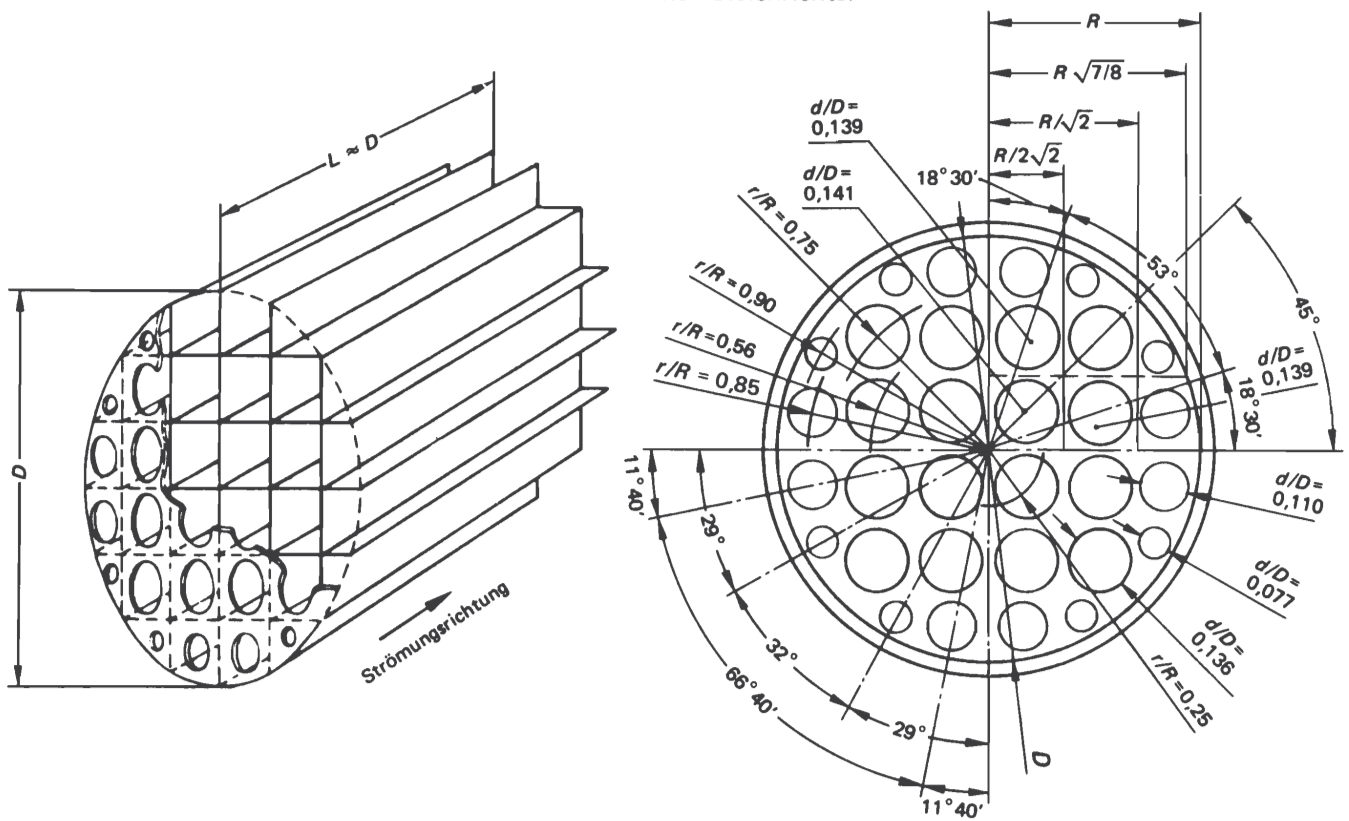
Diese Gleichrichterbauart besteht aus mindestens 19 parallelen Einzelrohren mit einer Mindestlänge von  $20 d''$ , die untereinander und mit der Rohrleitung fest verbunden sind. Hierbei ist es wichtig, daß die Rohre untereinander und zur Rohrachse parallel sind. Falls dies nicht erfüllt ist, kann der Gleichrichter selbst eine Einbaustörung darstellen.

### 6.4 Allgemeine Anforderungen an die Strömungsverhältnisse am Drosselgerät

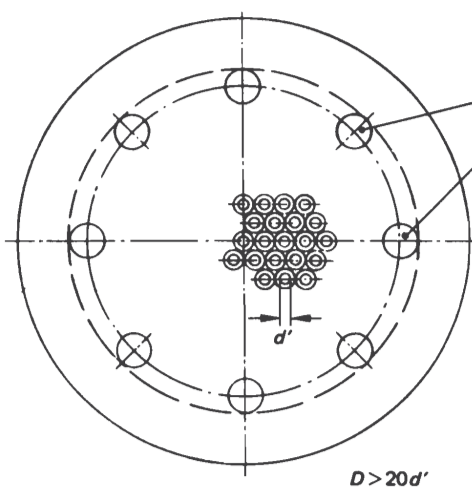
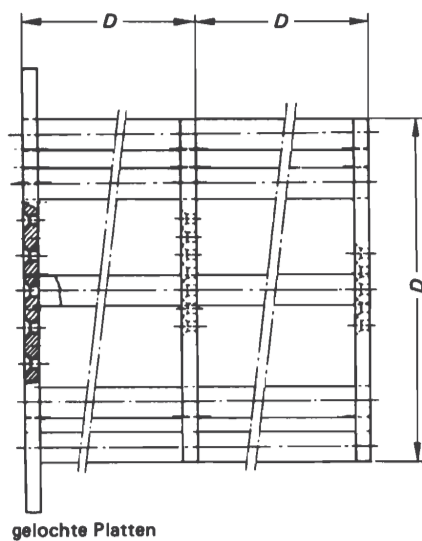
Falls die vorgeschriebenen Einbaubedingungen nach Tabelle 3 oder 4 oder nach Abschnitt 6.3 nicht erfüllt sind, ist diese Norm auch dann anwendbar, wenn die Strömungsverhältnisse unmittelbar vor dem Drosselgerät den Angaben des Abschnittes 6.1.3 entsprechen.

Die Strömung gilt als drallfrei, wenn der Drallwinkel im ganzen Rohrquerschnitt kleiner als  $2^\circ$  ist.

Bauart A: Zanker-Gleichrichter



Bauart B: Sprengle-Gleichrichter



Anmerkung: Um den Druckverlust zu verringern, können die Löcher an der Eintrittskante mit einem Winkel von 45° abgeschrägt sein.

Bauart C: Rohrbündel-Gleichrichter

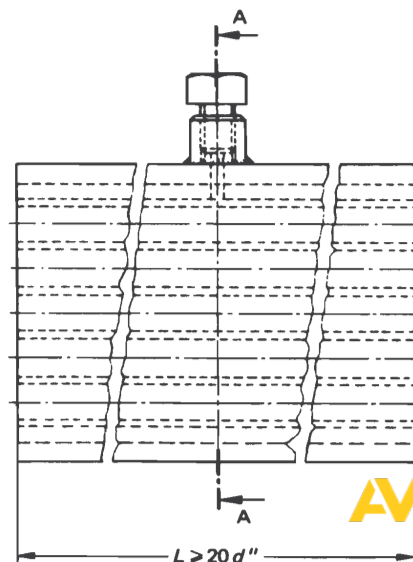
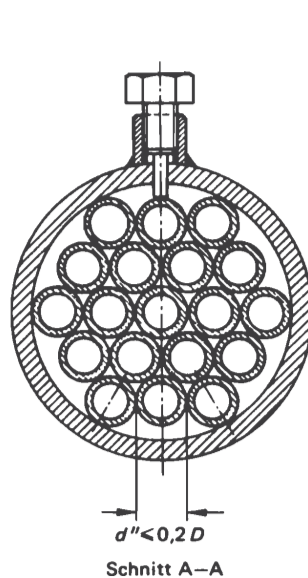


Bild 1. Gleichrichter

Das Geschwindigkeitsprofil gilt als ungestört, wenn für jeden Punkt des Rohrquerschnittes das Verhältnis der örtlichen zur maximalen Axial-Geschwindigkeit innerhalb von  $\pm 5\%$  mit dem Verhältnis übereinstimmt, das sich bei drallfreier Strömung am Ende einer sehr langen (über  $100 D$ ), geraden, vergleichbaren Rohrstrecke ergibt.

## 6.5 Zusätzliche Anforderungen an den Einbau von Blenden, Düsen und Venturidüsen

### 6.5.1 Rundheit des Rohres

In unmittelbarer Nähe des Drosselgerätes müssen folgende Anforderungen eingehalten sein:

**6.5.1.1** Die unmittelbar vor dem Drosselgerät (oder dem Fassungsring, falls vorhanden) liegende Rohrstrecke muß auf eine Länge von  $2 D$  zylindrisch sein. Das Rohr gilt als zylindrisch, wenn kein Durchmesser in beliebiger Ebene um mehr als  $0,3\%$  vom Wert  $D$  abweicht, der als Mittelwert der Messungen nach Abschnitt 6.1.5 bestimmt ist.

**6.5.1.2** Die Rohrstrecke im Bereich von mehr als  $2 D$  vor dem Drosselgerät bis zur nächsten Einbaustörung kann aus einem oder mehreren Rohrstücken bestehen.

Falls ein Durchmessersprung<sup>17)</sup> zwischen zwei Rohrstücken auftritt, der die Anforderungen bezüglich der Zylindrizität von  $0,3\%$  nach Abschnitt 6.5.1.1 nicht überschreitet, ist keine zusätzliche Unsicherheit des Durchflußkoeffizienten zu berücksichtigen.

**6.5.1.3** Falls der Durchmessersprung  $h$  zwischen zwei Rohrstücken größer ist, als im Abschnitt 6.5.1.2 angegeben, jedoch die Bedingungen

$$h/D \leq 0,002 \frac{s/D + 0,4}{0,1 + 2,3 \beta^4}$$

und

$$h/D \leq 0,05$$

erfüllt sind, dann muß eine Zusatz-Unsicherheit im Betrag von  $0,2\%$  arithmetisch zur Unsicherheit der Durchflußzahl addiert werden. Hierbei ist  $s$  der Abstand zwischen Durchmessersprung und Plusdruckentnahme bzw. Fassungsring<sup>18)</sup>.

**6.5.1.4** Überschreitet der Durchmessersprung die im Abschnitt 6.5.1.3 genannten Grenzwerte, so entsprechen die Einbauverhältnisse nicht dieser Norm<sup>19)</sup>.

17) Eine Durchmesseränderung mit einem konischen Übergang bei einem halben Kegelwinkel  $\leq 10^\circ$  gilt nicht als Sprung.

18) Dieser Abschnitt gilt nur für Durchmessersprünge, die innerhalb der nach Tabelle 3 erforderlichen geraden Rohrstrecken liegen.

19) Für Durchmessersprünge, die die Grenzwerte von Abschnitt 6.5.1.3 überschreiten, siehe Richtlinie VDI/VDE 2040 Entwurf Blatt 1.

**6.5.1.5** Kein Durchmesser der geraden Rohrstrecke im Auslauf innerhalb der Länge von  $2 D$ , von der Einströmseite des Drosselgerätes an gerechnet, darf um mehr als  $\pm 3\%$  vom mittleren Durchmesser  $D$  des Einlaufrohres abweichen. Es genügt, einen einzelnen Durchmesser der geraden Auslaufstrecke zu überprüfen.

### 6.5.2 Kondensat- und Entgasungsbohrungen

Die Rohrleitung darf mit Kondensat- oder Entgasungsbohrungen zur Beseitigung von festen, flüssigen oder gasförmigen Fremdstoffen versehen sein. Während der Messung dürfen diese Bohrungen nicht durchströmt werden.

Die Kondensat- und Entgasungsbohrungen sollen nicht zu nahe am Drosselgerät angeordnet sein. Falls dies unvermeidlich ist, muß der Durchmesser der Bohrungen kleiner als  $0,08 D$  sein. Außerdem muß der geradlinige Abstand zu den Druckentnahmen auf der gleichen Seite des Drosselgerätes immer größer als  $0,5 D$  sein. Kondensat- oder Entgasungsbohrungen dürfen nicht in der gleichen Axialebene des Rohres wie die Druckentnahmebohrungen angeordnet sein.

### 6.5.3 Anordnung von Drosselgerät und Fassungsringen

**6.5.3.1** Das Drosselgerät muß so in die Rohrleitung eingebaut sein, daß die Strömung von der Einlauf- zur Auslaufseite erfolgt (siehe Pfeil für die Strömungsrichtung in den Bildern).

**6.5.3.2** Das Drosselgerät muß innerhalb einer maximalen Abweichung von  $1^\circ$  senkrecht zur Rohrachse angeordnet sein.

**6.5.3.3** Das Drosselgerät muß in der Rohrleitung bzw. in den Fassungsringen zentriert sein. Für die Exzentrizität  $e_x$  zwischen der Achse des Drosselgerätes und den Achsen des Einlauf- und Auslaufrohres gilt die Bedingung:

$$e_x \leq \frac{0,0005 D}{0,1 + 2,3 \beta^4}$$

Für den Fall

$$\frac{0,0005 D}{0,1 + 2,3 \beta^4} < e_x \leq \frac{0,005 D}{0,1 + 2,3 \beta^4}$$

muß eine Zusatzunsicherheit im Betrag von  $0,3\%$  zur Unsicherheit der Durchflußzahl arithmetisch addiert werden.

Für den Fall

$$e_x > \frac{0,005 D}{0,1 + 2,3 \beta^4}$$

macht diese Norm keine Aussage über die Größe der weiteren zusätzlich zu berücksichtigenden Unsicherheit.

**6.5.3.4** Fassungsringe müssen so zentriert sein, daß sie an keiner Stelle in das Rohr hineinragen.

### 6.5.4 Halterungen und Dichtungen

**6.5.4.1** Die Halterungen und Dichtungen müssen so geführt sein, daß die normgerechte Einbaulage im Betrieb erhalten bleibt.

Beim Einbau eines Drosselgerätes zwischen Flanschen muß gegebenenfalls für eine freie thermische Ausdehnung gesorgt sein, um ein Verwerfen oder Verziehen des Drosselgerätes zu vermeiden.

**6.5.4.2** Dichtungen müssen so hergestellt und montiert werden, daß sie nirgends in das Rohrinne hineinragen oder Druckentnahme-Bohrungen bzw. -Schlitze (bei Eck-Druckentnahme) verdecken. Sie sollen so dünn wie möglich und auf keinen Fall dicker als  $0,03 D$  sein.

**6.5.4.3** Dichtungen zwischen Drosselgerät und Ringkammer dürfen nicht in diese hineinragen.

## 6.6 Zusätzliche Anforderungen an den Einbau von Klassischen Venturirohren

### 6.6.1 Rundheit des Rohres

In der unmittelbaren Nähe des Klassischen Venturirohres müssen die folgenden Anforderungen eingehalten sein:

**6.6.1.1** Die Rohrstrecke vor dem Einlaufzylinder des Klassischen Venturirohres muß auf einer Länge von mindestens  $2 D$  zylindrisch sein <sup>20)</sup>.

**6.6.1.2** Der mittlere Durchmesser  $D$  dieser vorgeschalteten Rohrstrecke muß innerhalb einer maximalen Abweichung von 1 % mit dem Durchmesser des Einlaufzylinders A des Klassischen Venturirohres übereinstimmen. Kein Einzeldurchmesser dieser  $2 D$  langen Rohrstrecke darf um mehr als  $\pm 2 \%$  vom Mittelwert der gemessenen Durchmesser abweichen.

**6.6.1.3** Der Durchmesser der Rohrleitung unmittelbar hinter dem Klassischen Venturirohr braucht nicht gemessen zu werden, er muß aber mindestens 90 % des Diffusordurchmessers am Ende des Venturirohres haben. Meist sind die Nenndurchmesser von Rohrleitung und Venturirohr gleich.

### 6.6.2 Rauheit der Rohrstrecke im Einlauf

Das Einlaufrohr darf auf eine Länge von  $2 D$  vor dem Klassischen Venturirohr nur eine Rauheit von  $k/D \leq 10^{-3}$  aufweisen <sup>20)</sup>.

### 6.6.3 Ausrichtung des Klassischen Venturirohres

Die Exzentrizität zwischen der Rohrstrecke im Einlauf und dem Einlaufzylinder A (siehe Abschnitt 9.1.2) des Venturirohres muß kleiner als  $0,005 D$  sein. Die Achsen der geraden Rohrstrecke im Einlauf und des Venturirohres müssen innerhalb einer maximalen Abweichung von  $1^\circ$  zueinander fluchten. Außerdem muß die Summe von Exzentrizität und halber Durchmesserdiffferenz (siehe Abschnitt 6.1.5) kleiner als  $0,0075 D$  sein.

## 6.6.4 Kondensat- und Entgasungsbohrungen

Die Rohrleitung darf mit Kondensat- oder Entgasungsbohrungen zur Beseitigung von festen, flüssigen oder gasförmigen Fremdstoffen versehen sein. Während der Messung dürfen diese Bohrungen nicht durchströmt werden.

Die Kondensat- und Entgasungsbohrungen sollen nicht zu nahe am Drosselgerät angeordnet sein. Falls dies unvermeidlich ist, muß der Durchmesser der Bohrungen kleiner als  $0,08 D$  sein. Außerdem muß der geradlinige Abstand zu den Druckentnahmen auf der gleichen Seite des Drosselgerätes immer größer als  $0,5 D$  sein. Kondensat- oder Entgasungsbohrungen dürfen nicht in der gleichen Axialebene des Rohres wie die Druckentnahmebohrungen angeordnet sein.

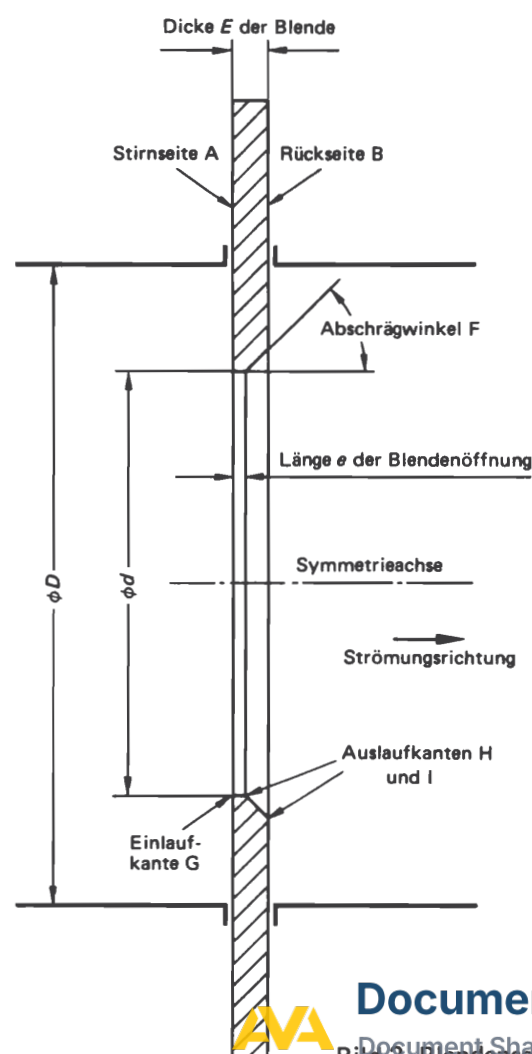
## 7 Blenden

Da die verschiedenen Arten der genormten Blenden untereinander ähnlich sind, genügt eine einzige Beschreibung. Die Lage der Druckentnahmen kennzeichnet die Art der Blende.

Blenden sind nur dann normgerecht, wenn sie mit der folgenden Beschreibung übereinstimmen.

### 7.1 Umrißlinien

Bild 2 zeigt eine Blendenscheibe im Schnitt. Die Buchstaben in Bild 2 gelten für den folgenden Text.



<sup>20)</sup> Sind kürzere Einlaufstrecken entsprechend Tabelle 4 vorhanden, so gilt die Forderung sinngemäß nur für diese kürzeren Strecken.

### 7.1.1 Allgemeines

**7.1.1.1** Der innerhalb des Rohres liegende Teil der Blende muß kreisförmig und konzentrisch zur Rohrachse sein. Die Stirn- und Rückseite der Blende müssen eben und parallel zueinander sein.

**7.1.1.2** Die folgende Beschreibung gilt, wenn nicht anders angegeben, nur für den im Rohr liegenden Teil der Blende.

**7.1.1.3** Bei der Auslegung der Blende muß darauf geachtet werden, daß elastische oder plastische Verformungen der Scheibe, hervorgerufen durch den Differenzdruck oder durch andere Beanspruchungen, die unten angegebenen Grenzen bezüglich der Ebenheit nicht überschreiten.

### 7.1.2 Stirnseite A

**7.1.2.1** Die Stirnseite A der Blende soll eben sein. Dies ist der Fall, wenn die Neigung einer geraden Linie durch zwei beliebige Punkte der Oberfläche, bezogen auf eine zur Symmetrieachse senkrechten Ebene kleiner als 1 % ist. Davon ausgenommen sind unvermeidliche schadhafte Stellen auf der Oberfläche, die mit dem bloßen Auge nicht erkennbar sind.

**7.1.2.2** Die Stirnseite der Blende muß einen Mittenrauhwert  $R_a \leq 10^{-4} d$  haben und zwar innerhalb eines zur Blendenöffnung konzentrischen Kreises, dessen Durchmesser mindestens  $1,5 d$  ist.

**7.1.2.3** Es ist zweckmäßig, eine deutliche, nach Einbau der Blende noch sichtbare Markierung anzubringen, die die richtige Einbaulage der Blende im Hinblick auf die Strömungsrichtung zeigt.

### 7.1.3 Rückseite B

**7.1.3.1** Die Rückseite B muß eben und parallel zur Stirnseite sein.

**7.1.3.2** Die Rückseite braucht nicht die Oberflächenqualität der Stirnseite aufzuweisen.

**7.1.3.3** Für die Beurteilung der Ebenheit und Oberflächenbeschaffenheit der Rückseite genügt der Augenschein.

### 7.1.4 Länge $e$ und Dicke $E$

**7.1.4.1** Die Länge  $e$  der zylindrischen Blendenöffnung muß zwischen  $0,005 D$  und  $0,02 D$  liegen.

**7.1.4.2** Werte von  $e$ , gemessen an beliebiger Stelle der Blendenöffnung, dürfen um nicht mehr als  $0,001 D$  voneinander abweichen.

**7.1.4.3** Die Dicke  $E$  der Blende muß zwischen  $e$  und  $0,05 D$  liegen.

**7.1.4.4** An verschiedenen Stellen gemessene Werte  $E$  der Blende dürfen sich um nicht mehr als  $0,001 D$  unterscheiden.

### 7.1.5 Abschrägwinkel $F$

**7.1.5.1** Überschreitet die Dicke  $E$  der Blendenscheibe die Länge  $e$  der Blendenöffnung, dann muß die Scheibe an der Rückseite abgeschrägt werden. Die Oberfläche der Abschrägung muß glatt sein.

**7.1.5.2** Der Abschrägwinkel  $F$  muß zwischen  $30^\circ$  und  $45^\circ$  liegen.

### 7.1.6 Kanten $G$ , $H$ und $I$

**7.1.6.1** Die Einlaufkante  $G$  und die Auslaufkanten  $H$  und  $I$  dürfen keinen Grat, keine Rundung oder mit dem bloßen Auge erkennbare schadhafte Stellen aufweisen.

**7.1.6.2** Die Einlaufkante  $G$  muß scharf sein. Dies ist der Fall, wenn der Kantenradius nicht größer als  $0,0004 d$  ist<sup>21)</sup>.

Für  $d \geq 125$  mm ist diese Bedingung im allgemeinen erfüllt, wenn mit dem bloßen Auge festgestellt wird, daß die Kante keinen Lichtstrahl reflektiert.

Für  $d < 125$  mm genügt diese Prüfung nicht, die Bedingung kann aber im allgemeinen als erfüllt angesehen werden, wenn bei der Herstellung der Stirnseite der Blendenscheibe im letzten Arbeitsgang ein sehr feiner Span von innen nach außen abgedreht wird (siehe Abschnitt 7.1.9.2).

Im Zweifelsfalle muß der Kantenradius ausgemessen werden.

### 7.1.7 Öffnungsdurchmesser $d$

**7.1.7.1** Der Durchmesser  $d$  muß stets  $\geq 12,5$  mm sein. Das Durchmesserverhältnis  $\beta = d/D$  muß je nach Art der Blende zwischen 0,20 bzw. 0,23 und 0,75 bzw. 0,80 liegen.

In diesen Grenzen ist  $\beta$ , das eine Kenngröße der Blende darstellt, auszuwählen.

**7.1.7.2** Der Durchmesser  $d$  der Blendenöffnung ist der Mittelwert aus mindestens vier Durchmessern, die in annähernd gleichen Winkelabständen zueinander gemessen sind.

**7.1.7.3** Die Blendenöffnung muß zylindrisch sein und zur Stirnseite senkrecht stehen.

Kein Durchmesser darf um mehr als 0,05 % vom Mittelwert nach Abschnitt 7.1.7.2 abweichen. Diese Vorschrift gilt als erfüllt, wenn keiner der gemessenen Einzeldurchmesser vom Mittelwert um mehr als 0,05 % abweicht.

### 7.1.8 Symmetrische Blende

**7.1.8.1** Wird die Blende für Durchflüsse mit wechselnder Strömungsrichtung verwendet, so gilt:

- die Blende darf nicht abgeschrägt sein
- beide Seiten müssen in Übereinstimmung mit der Beschreibung der Stirnseite nach Abschnitt 7.1.2 sein

<sup>21)</sup> Für größere Kantenradien siehe VDI/VDE 2040 Entwurf Blatt 1.

- die Dicke  $E$  der Blende muß gleich der Länge  $e$  der zylindrischen Blendenöffnung nach Abschnitt 7.1.4 sein
- beide Kanten der Blendenöffnung müssen mit der Beschreibung der Einlaufkante nach Abschnitt 7.1.6 übereinstimmen.

**7.1.8.2** Für Blenden mit  $D$ - und  $D/2$ -Druckentnahmen (siehe Abschnitt 7.2) müssen außerdem je zwei Bohrungen für die Plus- und die Minus-Druckentnahmen angebracht werden, die je nach Durchflußrichtung sinngemäß zu benutzen sind.

### 7.1.9 Material und Herstellung

Die Blende kann aus jedem Material und nach jedem beliebigen Fertigungsverfahren hergestellt werden, sofern sie während der Durchflußmessung mit der vorhergehenden Beschreibung in Übereinstimmung bleibt.

Insbesondere muß die Blende während der Messungen sauber sein.

## 7.2 Druckentnahmen

Jedes Drosselgerät muß wenigstens eine Plus- und eine Minus-Druckentnahme an einer der genormten Stellen haben.

Eine Blende kann mit verschiedenen genormten Druckentnahmen ausgerüstet sein; um jedoch eine gegenseitige Beeinflussung zu verhindern, dürfen die verschiedenen Entnahmen auf der gleichen Seite der Blende nicht in derselben axialen Ebene liegen.

### 7.2.1 Form und Durchmesser der Druckentnahmen außer Eck-Druckentnahme

(Eck-Druckentnahme siehe Abschnitt 7.2.4)

**7.2.1.1** Die Mittellinie der Druckentnahme muß die Rohrachse senkrecht schneiden.

**7.2.1.2** Die Druckentnahme muß an der Rohrwand rund sein. Die Kante muß gratfrei und so scharf wie möglich sein. Eine kleine Verrundung zur Beseitigung des Grates ist zulässig. Falls eine Messung möglich ist, soll der Kantenradius kleiner als  $1/10$  des Bohrungsdurchmessers sein.

Innerhalb der Entnahmebohrung, an der Bohrungskante und an der Rohrwand nahe der Bohrung dürfen keine Unregelmäßigkeiten vorhanden sein.

**7.2.1.3** Die Einhaltung der beiden zuvor genannten Anforderungen kann mit dem bloßen Auge festgestellt werden.

**7.2.1.4** Der Durchmesser der Entnahmebohrungen muß kleiner als  $0,08 D$  und vorzugsweise kleiner als 12 mm sein. Der Kleinstwert für den Durchmesser ist nur durch die Gefahr einer Verstopfung oder durch unzureichende

Dynamik der Übertragung bestimmt. Plus- und Minus-Druckentnahme müssen gleichen Durchmesser haben.

**7.2.1.5** Die Entnahmebohrungen müssen von der Rohrinneenseite ab über eine Länge von mindestens dem 2,5-fachen des Bohrungsdurchmessers zylindrisch sein.

### 7.2.2 Winkellage der Druckentnahmen, außer Eck-Druckentnahme

**7.2.2.1** Die Mittellinien der Druckentnahmen können in jeder beliebigen axialen Ebene des Rohres liegen, wobei jedoch die Angaben des Abschnittes 6.2.7 zu beachten sind.

**7.2.2.2** Die Achsen der Plus- und der Minus-Druckentnahmen dürfen unter Beachtung des Abschnittes 6.2.7 in verschiedenen axialen Ebenen liegen.

**7.2.2.3** Für den mit diesen Druckentnahmen gemessenen Wirkdruck gelten die Festlegungen im Abschnitt 2.2.3.

### 7.2.3 Lage der Druckentnahmen

**7.2.3.1** Der Abstand  $l$  der Druckentnahmen zählt von der Mittellinie der Entnahmebohrung bis zu einer für jede Blendenart festgelegten Blendenseite, dabei ist die Dicke möglicherweise vorhandener Dichtungen zu berücksichtigen.

**7.2.3.2** Die Lage der Druckentnahme kennzeichnet die Art der Blende.

**7.2.3.3** Die Eck-Druckentnahme wird im Abschnitt 7.2.4 behandelt.

**7.2.3.4** Blenden mit  $D$ - und  $D/2$ -Druckentnahmen (siehe Bild 3)

Der Nennabstand  $l_1$  der Plus-Druckentnahme ist gleich  $D$ , er darf aber zwischen  $0,9 D$  und  $1,1 D$  liegen, ohne Einfluß auf den Durchflußkoeffizienten.

Der Nennabstand  $l_2$  der Minus-Druckentnahme ist  $0,5 D$ , er darf aber zwischen folgenden Werten liegen ohne Einfluß auf den Durchflußkoeffizienten:

zwischen  $0,48 D$  und  $0,52 D$  für  $\beta \leq 0,6$

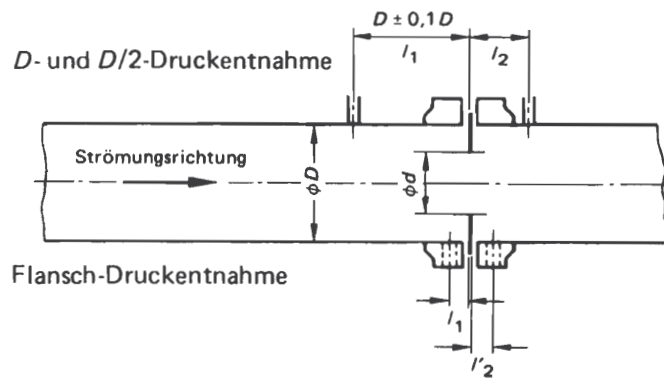
zwischen  $0,49 D$  und  $0,51 D$  für  $\beta > 0,6$

Beide Abstände  $l_1$  und  $l_2$  werden von der Stirnseite der Blende aus gemessen.

**7.2.3.5** Blenden mit Flansch-Druckentnahmen (siehe Bild 3)

Der Nennabstand der Plus-Druckentnahme  $l_1$  ist 25,4 mm, von der Stirnseite der Blende aus gemessen.

Der Nennabstand der Minus-Druckentnahme  $l_2'$  ist 25,4 mm, von der Rückseite der Blende aus gemessen.

Bild 3. Lage der Druckentnahmen für Blenden mit  $D$ - und  $D/2$ -Flansch-Druckentnahme

Die Abstände  $l_1$  und  $l_2$  können zwischen folgenden Werten liegen, ohne den Durchflußkoeffizienten zu beeinflussen:

$25,4 \pm 0,5$  mm für  $\beta > 0,6$  und gleichzeitig für  $58 \text{ mm} < D < 150 \text{ mm}$

$25,4 \pm 1$  mm in allen anderen Fällen, d.h.

für  $\beta \leq 0,6$

für  $\beta > 0,6$  und  $50 \text{ mm} \leq D \leq 58 \text{ mm}$

für  $\beta > 0,6$  und  $150 \text{ mm} \leq D \leq 760 \text{ mm}$

## 7.2.4 Eck-Druckentnahme

**7.2.4.1** Der Abstand der Mitte der Entnahmeöffnung von der zugehörigen Blendenseite muß gleich dem halben Bohrungsdurchmesser oder der halben Entnahmeweite sein, so daß die Entnahmeöffnung in der Rohrwand die zugehörige Blendenseite gerade berührt (siehe Abschnitt 7.2.4.5).

**7.2.4.2** Die Druckentnahmen können entweder Einzelanbohrungen oder ringförmige Schlitze sein (siehe Bild 4, auf das sich der folgende Text bezieht). Beide Entnahmeformen können entweder direkt im Rohr oder in Flanschen oder auch in Fassungsringen untergebracht werden.

**7.2.4.3** Der Durchmesser  $a$  der Einzelanbohrung oder die Schlitzweite  $a$  ist nachfolgend angegeben. Der Kleinstwert für den Durchmesser ist praktisch nur durch die Gefahr einer Verstopfung oder durch unzureichende Dynamik der Übertragung festgelegt.

für  $\beta \leq 0,65$ :  $0,005 D \leq a \leq 0,03 D$

für  $\beta > 0,65$ :  $0,01 D \leq a \leq 0,02 D$

und zusätzlich für alle  $\beta$ -Werte:

für saubere Fluide:  $1 \text{ mm} \leq a \leq 10 \text{ mm}$

für Dampf- mit Ringkammer:  $1 \text{ mm} \leq a \leq 10 \text{ mm}$

für Dampf und verflüssigte Gase mit Einzelanbohrung:  $4 \text{ mm} \leq a \leq 10 \text{ mm}$

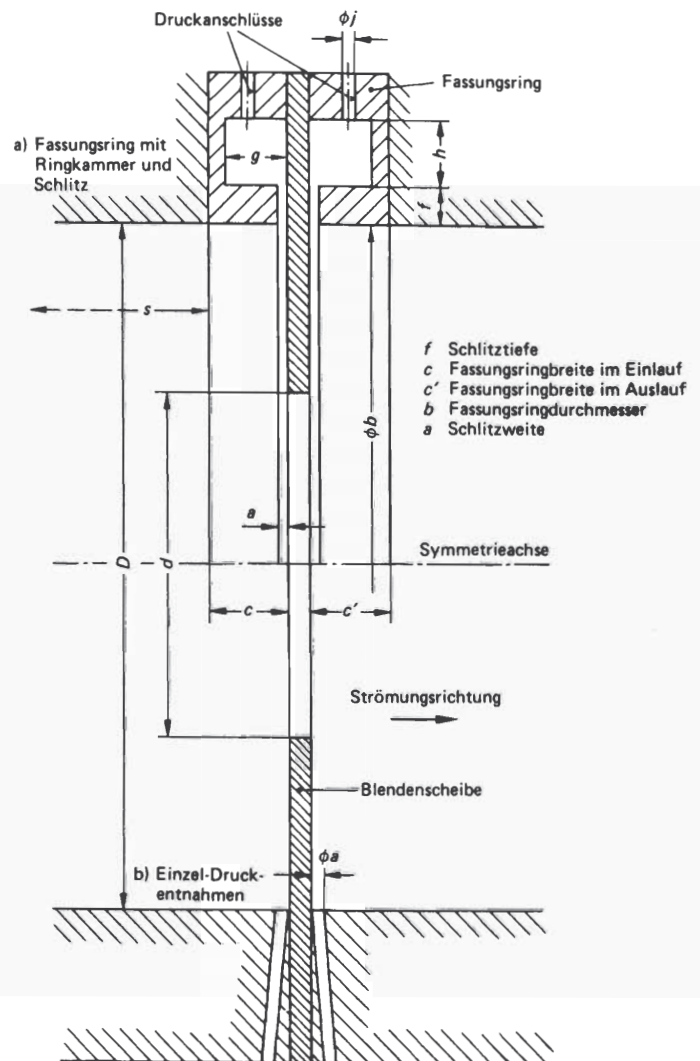


Bild 4. Eck-Druckentnahmen

**7.2.4.4** Der Ringspalt ist gewöhnlich über dem ganzen Umfang, also ohne Unterbrechung, mit dem Rohrrinnen verbunden. Andernfalls muß jede Ringkammer mit dem Rohrrinnen über mindestens vier Öffnungen verbunden sein, deren Achsen gleiche Winkel zueinander haben und deren Öffnungsfläche mindestens je  $12 \text{ mm}^2$  beträgt.

**7.2.4.5** Bei Einzelanbohrungen nach Bild 4 b soll die Bohrungsachse die Rohrachse möglichst unter einem rechten Winkel schneiden.

Sind mehrere Einzelanbohrungen auf der Plus- und Minusseite vorhanden, so müssen deren Bohrungsachsen gleiche Winkelabstände zueinander haben. Der Durchmesser der Einzelentnahmebohrung ist in Abschnitt 7.2.4.3, ihre zylindrische Länge im Abschnitt 7.2.1.5 angegeben.

**7.2.4.6** Der Innendurchmesser  $b$  der Fassungsringe muß gleich oder größer als der Rohrdurchmesser  $D$  sein, damit sie nicht ins Rohr hineinragen. Folgende Bedingungen müssen erfüllt sein:

$$\frac{b-D}{D} \frac{c}{D} 100 \leq \frac{0,1}{0,1 + 2,3\beta^4}$$

$$D \leq b \leq 1,04 D$$

Die Breiten  $c$  und  $c'$  der Fassungsringe auf der Einlauf- und Auslaufseite (siehe Bild 4) dürfen nicht größer als  $0,5 D$  sein.

Die Länge  $f$  muß gleich oder größer sein, als die doppelte Schlitzweite  $a$ . Der Ringkammerquerschnitt ( $g \cdot h$ ) muß gleich oder größer sein als die Hälfte der gesamten Fläche der Öffnungen, die das Rohrrinnere mit der Ringkammer verbinden.

**7.2.4.7** Die mit dem Fluid in Berührung kommenden Flächen des Fassungsringes müssen sorgfältig bearbeitet sein.

**7.2.4.8** Die Druckanschlüsse, die die Ringkammern mit den Sekundärgeräten verbinden, müssen rund sein und einen Durchmesser  $j$  zwischen 4 mm und 10 mm haben (siehe Abschnitt 7.2.1.2).

**7.2.4.9** Die Fassungsringe auf der Einlauf- und Auslaufseite müssen nicht symmetrisch zueinander sein, müssen aber beide obige Bedingungen erfüllen.

**7.2.4.10** Der Rohrdurchmesser zur Bestimmung des Durchmesser-Verhältnisses bzw. des Durchflusses ist nach Abschnitt 6.1.5 zu messen, wobei der Fassungsring als Teil des Drosselgerätes angesehen werden muß. Dies gilt auch für die im Abschnitt 6.5.1.3 erwähnte Länge  $s$ , die von der Anströmkannte des rückspringenden Fassungsringes aus zählt.

### 7.3 Durchflußkoeffizienten von Blenden und zugehörige Unsicherheiten

#### 7.3.1 Anwendungsbereiche

Blenden nach dieser Norm dürfen nur in folgenden Bereichen angewendet werden:

|             | Eck-<br>Druckentnahme                                                                                                                                                                                                                     | Flansch-<br>Druckentnahme            | $D$ - und $D/2$ -<br>Druckentnahme |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| $d$ (in mm) | $\geq 12,5$                                                                                                                                                                                                                               | $\geq 12,5$                          |                                    |
| $D$ (in mm) | $50 \leq D \leq 1000$                                                                                                                                                                                                                     | $50 \leq D \leq 760$                 |                                    |
| $\beta$     | $0,23 \leq \beta \leq 0,80$                                                                                                                                                                                                               | $0,2 \leq \beta \leq 0,75$           |                                    |
| $Re_D$      | für<br>$0,23 \leq \beta \leq 0,45$<br>gilt:<br>$5000 \leq Re_D \leq 10^8$ ;<br>für<br>$0,45 < \beta \leq 0,77$<br>gilt:<br>$10\,000 \leq Re_D \leq 10^8$ ;<br>für<br>$0,77 \leq \beta \leq 0,8$<br>gilt:<br>$20\,000 \leq Re_D \leq 10^8$ | $1260 \beta^2 D \leq Re_D \leq 10^8$ |                                    |

Zusätzlich muß die äquivalente Rohrrauheit den Bedingungen der Tabelle 5 entsprechen 22).

Der Wert der äquivalenten, in Längeneinheiten angegebenen Rohrrauheit  $k$ , hängt von verschiedenen Faktoren ab wie Höhe, Verteilung und anderen geometrischen Kennzeichen der Rauheitserhebungen der Rohrwand.

Zur genauen Bestimmung von  $k$  ist eine Druckverlust-

22) Für größere relative Rohrrauheit siehe VDI/VDE 2040 Entwurf Blatt 1

Tabelle 5. Obere Grenzwerte der relativen Rohrrauheit im Einlauf vor Blenden

| $\beta$                                 |            | $\leq 0,3$ | 0,32 | 0,34 | 0,36 | 0,38 | 0,4 | 0,45 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 |
|-----------------------------------------|------------|------------|------|------|------|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| Eck-Druckentnahme                       | $10^4 k/D$ | 25         | 18,1 | 12,9 | 10,0 | 8,3  | 7,1 | 5,6  | 4,9 | 4,2 | 4,0 | 3,9 |
| Flansch- und $D-D/2$ -<br>Druckentnahme | $10^4 k/D$ | 25         | 18,1 | 12,9 | 10   | 10   | 10  | 10   | 10  | 10  | 10  | 10  |

Tabelle 6. Anhaltswerte der äquivalenten Rohrrauheit  $k$ 

| Werkstoff                                             | Beschaffenheit                          | $k$ in mm       |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------|
| Messing, Kupfer,<br>Aluminium,<br>Kunststoff,<br>Glas | glatt, ohne Ablagerung                  | $< 0,03$        |
| Stahl                                                 | neu, nahtlos, kalt gezogen              | $< 0,03$        |
|                                                       | neu, nahtlos, warm gezogen              | } 0,05 bis 0,10 |
|                                                       | neu, nahtlos, gewalzt                   |                 |
|                                                       | neu, längsgeschweißt                    | } 0,10          |
|                                                       | neu, spiralgeschweißt                   |                 |
|                                                       | leicht angerostet                       | 0,10 bis 0,20   |
|                                                       | verrostet                               | 0,20 bis 0,30   |
|                                                       | verkrustet                              | 0,50 bis 2,0    |
|                                                       | stark verkrustet                        | $> 2$           |
|                                                       | bitumiert, neu                          | 0,03 bis 0,05   |
|                                                       | bitumiert, normal                       | 0,10 bis 0,20   |
|                                                       | galvanisiert                            | 0,13            |
| Gußeisen                                              | neu                                     | 0,25            |
|                                                       | verrostet                               | 1,0 bis 1,5     |
|                                                       | verkrustet                              | $> 1,5$         |
|                                                       | bitumiert, neu                          | 0,03 bis 0,05   |
| Asbest-<br>Zement                                     | beschichtet oder nicht beschichtet, neu | $< 0,03$        |
|                                                       | nicht beschichtet, gebraucht            | 0,05            |

Messung an einem Probestück des jeweiligen Rohres vorzunehmen 23).

Näherungswerte für die verschiedenen Werkstoffe können aus der einschlägigen Literatur entnommen werden, Tabelle 6 enthält Werte für  $k$  verschiedener Werkstoffe, die aus der Colebrook-Gleichung abgeleitet wurden.

Die meisten Versuche, auf denen die Durchflußkoeffizienten  $C$  dieser Norm beruhen, wurden bei Blenden mit Eck-Druckentnahme in Rohren mit einer relativen Rauheit  $k/D \leq 3,8 \cdot 10^{-4}$ , bei Blenden mit  $D - D/2$ - und Flansch-Druckentnahmen in Rohren mit  $k/D \leq 10 \times 10^{-4}$  durchgeführt.

Rohre mit größerer Rauheit können verwendet werden, wenn die Rauheit innerhalb  $10 D$  im Einlauf die in Tabelle 5 angegebenen Grenzen einhält.

### 7.3.2 Koeffizienten

#### 7.3.2.1 Durchflußkoeffizient

Der Durchflußkoeffizient  $C$  ist durch die Stolz-Gleichung gegeben:

$$C = 0,5959 + 0,0312 \beta^{2,1} - 0,1840 \beta^8 \\ + 0,0029 \beta^{2,5} \left[ \frac{10^6}{Re_D} \right]^{0,75} \\ + 0,0900 L_1 \beta^4 (1 - \beta^4)^{-1} - 0,0337 L_2' \beta^3$$

$$\text{wenn } L_1 \geq \frac{0,0390}{0,0900} (= 0,4333),$$

ersetze  $0,0900 L_1$  durch  $0,0390$

Bemerkungen:

In dieser Gleichung sind:

|         |                                                                |
|---------|----------------------------------------------------------------|
| $C$     | der Durchflußkoeffizient $C = \alpha \cdot \sqrt{1 - \beta^4}$ |
| $\beta$ | das Durchmesser Verhältnis $\beta = d/D$                       |
| $Re_D$  | die Reynoldszahl bezogen auf den Rohrdurchmesser               |

23) Siehe Richtlinie VDI/VDE 2040 Entwurf Blatt 1

$L_1 = l_1/D$  das Verhältnis des Abstandes der Druckentnahme im Einlauf von der Blendenstirnseite zum Rohrdurchmesser

$L'_2 = l'_2/D$  das Verhältnis des Abstandes der Druckentnahme im Auslauf von der Blendenrückseite zum Rohrdurchmesser ( $L'_2$  deutet den Bezug auf die Blendenrückseite an,  $L_2$  würde sich auf die Blendenstirnseite beziehen).

Sind die Bedingungen der Abschnitte 7.2.3.4 bzw. 7.2.3.5 bzw. 7.2.4 erfüllt, dann sind folgende Werte für  $L_1$  und  $L'_2$  in die Gleichung einzusetzen:

Für Blenden mit Eck-Druckentnahme

$$L_1 = L'_2 = 0$$

Für Blenden mit  $D - D/2$ -Druckentnahme

$$L_1 = 1$$

$$L'_2 = 0,47$$

(da  $L_1$  stets größer ist als 0,4333 ist, muß 0,090  $L_1$  durch 0,0390 ersetzt werden)

Für Blenden mit Flansch-Druckentnahme

$$L_1 = L'_2 = 25,4/D \quad (D \text{ in mm})$$

(in Rohren  $D \leq 58,62$  mm wird  $L_1 \geq 0,4333$ , dann muß  $0,0900 \cdot L_1$  durch 0,0390 ersetzt werden)

Die Gleichung gilt nur für die Druckentnahmen, die in den Abschnitten 7.2.3.4 oder 7.2.3.5 oder 7.2.4 festgelegt sind. Andere Wertepaare für  $L_1$  und  $L'_2$ , die nicht den drei genormten Druckentnahmen entsprechen, dürfen nicht in die Gleichung eingesetzt werden.

Die Gleichung und die unten angegebenen Unsicherheiten sind nur gültig, wenn der Anwendungsbereich nach 7.3.1 und die Einbauanforderungen nach Abschnitt 6 eingehalten werden.

### 7.3.2.2 Expansionszahl

Die empirische Gleichung zur Berechnung der Expansionszahl von Blenden lautet für alle drei Arten der Druckentnahme:

$$\epsilon = 1 - (0,41 + 0,35 \beta^4) \frac{\Delta p}{\kappa p_1}$$

Diese Gleichung ist nur innerhalb der in Abschnitt 7.3.1 angegebenen Grenzen anwendbar.

Für die Bestimmung von  $\epsilon$  liegen Versuche mit Luft, Dampf und Erdgas vor. Es bestehen jedoch keine Bedenken, die Gleichung auf andere Gase und Dämpfe, mit bekanntem Isentropenexponenten anzuwenden.

Die Gleichung ist nur gültig für

$$\frac{p_2}{p_1} \geq 0,75$$

### 7.3.3 Unsicherheiten

#### 7.3.3.1 Unsicherheit des Durchflußkoeffizienten

Wenn  $\beta$ ,  $D$ ,  $Re_D$  als fehlerfrei angenommen werden können und unter der Voraussetzung, daß  $k/D$  innerhalb der

zulässigen Grenze liegt, beträgt die relative Unsicherheit des Durchflußkoeffizienten  $C$ :

|                            | Eck-Druckentnahme | Flansch-Druckentnahme | $D - D/2$ -Druckentnahme |
|----------------------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|
| $\beta \leq 0,6$           | $\pm 0,6 \%$      | $\pm 0,6 \%$          | $\pm 0,6 \%$             |
| $0,6 \leq \beta \leq 0,8$  | $\pm \beta \%$    | —                     | —                        |
| $0,6 \leq \beta \leq 0,75$ | —                 | $\pm \beta \%$        | $\pm \beta \%$           |

#### 7.3.3.2 Unsicherheit der Expansionszahl

Die relative Unsicherheit der Expansionszahl  $\epsilon$  beträgt:

$$\pm 4 \frac{\Delta p}{p_1} \% \text{ für } \beta \leq 0,75$$

$$\pm 8 \frac{\Delta p}{p_1} \% \text{ für } 0,75 < \beta \leq 0,8 \text{ (nur für Eck-Druckentnahme)}$$

**7.3.3.3** Für den praktischen Gebrauch sind in den Tabellen 10 bis 29 die  $C$ - und  $\alpha$ -Werte in Abhängigkeit von  $\beta$ ,  $Re_D$  und  $D$  angegeben. Für genaue Interpolationen sind die Tabellen nicht vorgesehen; Extrapolationen sind unzulässig.

### 7.4 Druckverlust $\Delta \bar{\omega}$

Der Druckverlust  $\Delta \bar{\omega}$ , den die in dieser Norm beschriebenen Blenden verursachen, kann näherungsweise aus dem Wirkdruck  $\Delta p$  berechnet werden:

$$\Delta \bar{\omega} \approx \frac{1 - \alpha \beta^2}{1 + \alpha \beta^2} \Delta p$$

Dieser Druckverlust ist die Differenz der statischen Drücke zwischen der Einlaufseite des Drosselgerätes an einer Stelle, an der der Einfluß des Staudruckes vernachlässigt werden darf (etwa  $1 D$  vor dem Drosselgerät), und der Auslaufseite an einer Stelle, an der der Rückgewinn des statischen Druckes durch Strahlausdehnung abgeschlossen ist (etwa  $6 D$  hinter dem Drosselgerät).

## 8 Düsen

Es gibt zwei Arten von genormten Düsen

- ISA 1932-Düsen
- Langradius-Düsen

Die Düsen sind unterschiedlich geformt und werden getrennt beschrieben.

### 8.1 ISA 1932-Düsen

Bild 5 zeigt Schnitte durch eine ISA 1932-Düse. Die im folgenden Text benutzten Buchstabenbezeichnungen entsprechen denen in Bild 5.