

## 9.2 Volumenstrommessung in Anlagen der Raumluftechnik

D. Otto

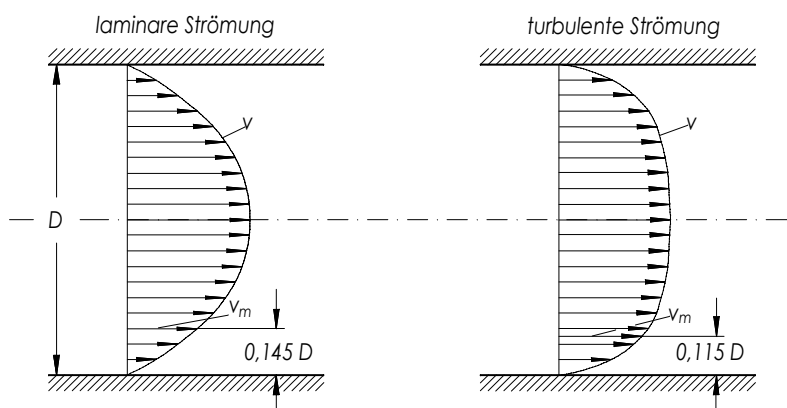
Die Volumenstrommessung ist für Leistungsmessungen und den hydraulischen Abgleich an RLT-Anlagen erforderlich. Das Meßproblem vereinfacht sich, wenn an symmetrischen Strömungsprofilen mit Methoden nach dem Wirkdruckprinzip gemessen werden kann. Für unsymmetrische Strömungsprofile kann der Meßaufwand durch die Wahl der Meßpunkte nach dem Schwerelinienverfahren eingegrenzt werden. Ein größeres Problem stellen die Volumenstrommessungen an Luftauslässen dar. Hier hilft oft nur ein integrales Meßverfahren mit großen Fehlerquellen. Eine Übersicht über die verfügbaren Feldmeßgeräte schließt dieses Kapitel ab.

### 9.2.1 Volumenstrommessung in Kanälen

Die Volumenstrommessung in RLT-Anlagen erfolgt im wesentlichen durch die Messung der Geschwindigkeit. In symmetrischen Strömungsprofilen werden hierzu vorteilhaft Verfahren nach dem Wirkdruckprinzip eingesetzt. In Unsymmetrischen Strömungsprofilen wird das Strömungsprofil ermittelt und aus punktuellen Messungen der Strömungsgeschwindigkeit eine mittlere Geschwindigkeit berechnet.

#### 9.2.1.1 Volumenstrommessung mit Staudrucksonden

Eine einfache Meßaufgabe liegt vor, wenn es sich z. B. um eine voll ausgebildete rotationssymmetrische Rohrströmung handelt. Hier reicht eine einzige Messung an einem Punkt mit dem Radius  $r_m$  in der Strömung, der die mittlere Geschwindigkeit  $v_m$  repräsentiert, Bild 9.2-1.



**Bild 9.2-1:** Messung der mittleren Geschwindigkeit bei laminarer und turbulenter Strömung

Die Kanäle von Klimaanlage mit den verschiedenen Einbauten sind jedoch in der Regel kurz, so daß nicht von einer ungestörten und voll ausgebildeten Strömung ausgegangen werden kann. In diesen Fällen wird die Meßfläche in Teilflächen unterteilt und im Schwerpunkt der Teilflächen die Geschwindigkeit ermittelt. Diese Geschwindigkeiten liefern einen entsprechend der Größe der Teilfläche gewichteten Beitrag zur mittleren Geschwindigkeit  $v_m$ . Die Empfehlungen der VDI/VDE-Richtlinie 2640, Blatt 1 und 3[1,2], sehen für die Auswahl der Meßorte bei Kreis- und Rechteckquerschnitten das Schwerlinien-Verfahren vor. In der VDI-Richtlinie 2080[5] (Meßverfahren und Meßgeräte für Raumluftechnische Anlagen) wird für Rechteckquerschnitte ein vereinfachtes Verfahren angegeben. Diese Richtlinie führt auch das Log-Linear-Verfahren an, das ein turbulentes Profil der Grenzschicht voraussetzt.

### *Kreisquerschnitte*

Schwerlinien-Verfahren:

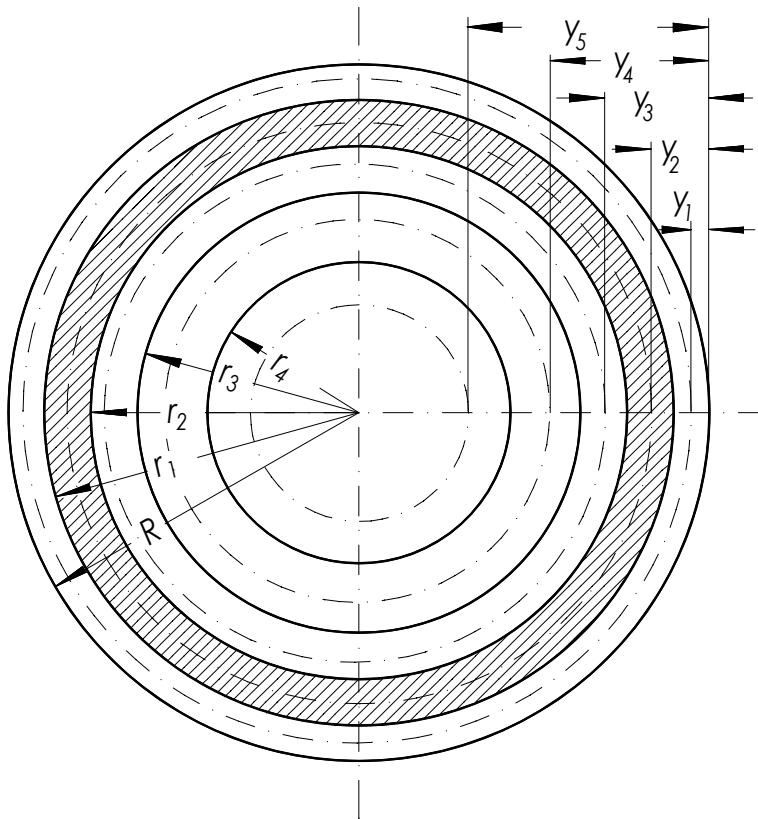
Bei diesem Verfahren wird der Kreisquerschnitt bevorzugt in  $n$  flächengleiche Teilflächen mit der Fläche  $A_i$  aufgeteilt. So ergeben sich  $(n-1)$  Kreistränge und ein Kreis in der Mitte. Die auf den Außenradius bezogenen Radien der Kreistränge lassen sich nach Gleichung 9.2-1 berechnen

$$\frac{r_i}{R} = \sqrt{1 - \frac{i}{n}} \quad (9.2-1)$$

Hierin bedeuten:

- R - Radius des Außenkreises,
- $r_i$  - Radius eines Innenkreises,
- $i$  - Ordnungszahl der Innenkreise, von außen beginnend,
- $n$  - Anzahl der flächengleichen Teilflächen.

Der Meßort in einer Kreisringfläche und auf dem inneren Kreis liegt auf der Schwerlinie der jeweiligen Teilfläche. Die Schwerlinie ist hierbei der Kreis, der die Teilfläche halbiert, Bild 9.2-2. Die Anordnung der Meßpunkte auf dem Meßkreis setzt ein parabolisches Strömungsprofil voraus, das sich bei laminarer Strömung einstellt. Der Meßfehler, wenn nach diesem Verfahren in einer ausgebildeten turbulenten Strömung gemessen wird, ist jedoch  $<1\%$  [1].



**Bild 9.2-2:** Anordnung der Meßpunkte nach dem Schwerlinienverfahren für  $n=5$  Teilflächen

Der bezogene Radius für den  $i$ -ten Kreisring folgt aus Gleichung 9.2-2

$$\frac{r_i}{R} = \sqrt{1 - \frac{2i-1}{2n}} \quad (9.2-2)$$

Für die Sondenposition interessieren die Abstände  $y_i$  von der Außenwand, die sich nach Gleichung 9.2-3 als auf den Außendurchmesser  $D$  bezogene Wandabstände berechnen lassen

$$\frac{y_i}{D} = \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2i-1}{2n}} \right) \quad (9.2-3)$$

Der Volumenstrom wird mit dem arithmetischen Mittel der auf den Schwerlinien gemessenen Geschwindigkeiten berechnet, Gleichung 9.2-4

$$\dot{V} = A \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n v_i \quad (9.2-4)$$

Bei unregelmäßigen Geschwindigkeitsprofilen ist es empfehlenswert, die Abstände der Meßpunkte im Bereich großer Geschwindigkeitsunterschiede kleiner zu wählen. Die Meßwerte der Geschwindigkeiten sind dann entsprechend dem Anteil der Teilflächen  $A_i$  an der Gesamtfläche  $A$  zu wichten. Mit der Einführung eines Wichtungsfaktors  $g_i$

$$g_i = \frac{A_i}{A} \quad (9.2-5)$$

ergibt sich die mittlere Geschwindigkeit  $v_m$  nach Gleichung 9.2-6

$$v_m = \sum_{i=1}^n v_i \cdot g_i \quad (9.2-6)$$

Log-Linear-Verfahren:

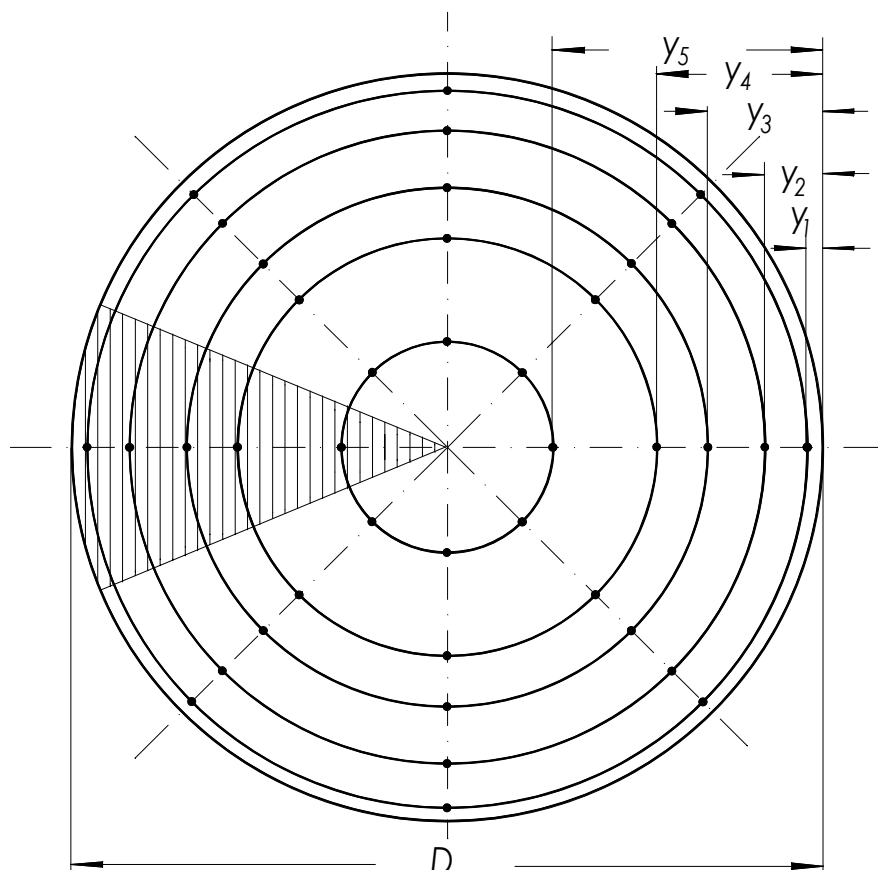
Dieses Verfahren geht von einem turbulenten Geschwindigkeitsprofil aus, das näherungsweise durch eine logarithmisch-lineare Funktion beschrieben werden kann

$$v_{\frac{r_i}{R}} = A + B \cdot \left(1 - \frac{r_i}{R}\right) + D \cdot \lg\left(1 - \frac{r_i}{R}\right) \quad (9.2-7)$$

Die Anordnung der Meßpunkte erfolgt so, daß der arithmetische Mittelwert der einzelnen Meßwerte der mittleren Geschwindigkeit im Meßquerschnitt entspricht. Da die Strömungsprofile aufgrund kurzer Meßstrecken nicht voll ausgebildet, bzw. nicht rotationssymmetrisch sind, muß auf zwei oder mehreren Meßgeraden gemessen werden. Alle Meßwerte  $v_i$  werden in die arithmetische Mittelung mit einbezogen.

Für drei Meßgeraden mit sechs Meßpunkten auf jeder Meßgeraden werden z.B. 18 Meßwerte nach Gleichung 9.2-8 gemittelt, Bild 9.2-3.

$$v_m = \frac{1}{18} \sum_{i=1}^{18} v_i \quad (9.2-8)$$



**Bild 9.2-3:** Anwendung der Log-Linear-Methode mit fünf Meßradien

Die bezogenen Wandabstände werden nach Tabelle 9.2-1 gewählt.

**Tabelle 9.2-1:** Bezogene Wandabstände für Meßpunkte nach der Log-Linear-Methode [1]

Anzahl der Meßkreise	$\frac{y_1}{D}$	$\frac{y_2}{D}$	$\frac{y_3}{D}$	$\frac{y_4}{D}$	$\frac{y_5}{D}$	$\frac{y_6}{D}$
3	0,0321	0,1349	0,3208	-	-	-
4	0,0209	0,1172	0,1838	0,3448	-	-
5	0,0189	0,0765	0,1526	0,2169	0,3614	-
6	0,0138	0,0749	0,1137	0,1825	0,2414	0,3737

Bei der Wahl dieser Wandabstände entfällt eine Wichtung von Teilflächen.

*Rechteckquerschnitte*

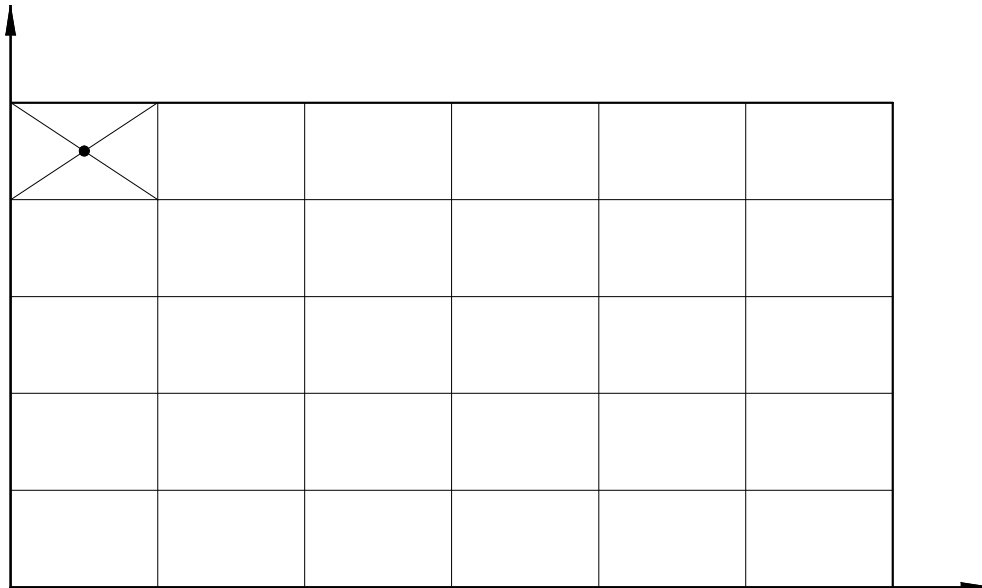
Die Anzahl der Meßpunkte  $z$  wird für eine ausreichende Meßgenauigkeit nach Gleichung 9.2-9 gewählt.

$$24\sqrt[3]{A} < z < 36\sqrt[3]{A} \quad (9.2-9)$$

Der Meßquerschnitt wird in flächengleiche Teilflächen aufgeteilt und die Meßpunkte nach dem *Trivialverfahren* oder nach dem *Schwerlinienverfahren* festgelegt.

Trivialverfahren:

Beim Trivialverfahren werden keine Annahmen über die Form des Geschwindigkeitsprofils gemacht. Die Meßfläche wird unter Berücksichtigung von Gleichung 9.2-9 in flächengleiche Teilflächen  $A_{ij}$  aufgeteilt. Der Meßort liegt im Schwerpunkt der Teilfläche, Bild 9.2-4.



**Bild 9.2-4:** Aufteilung eines Rechteckquerschnitts in flächengleiche Meßflächen

Die auf die Außenmaße der Rechteckfläche bezogenen Meßabstände berechnen sich für die Höhe und Breite der Meßfläche nach den Gleichungen 9.2-10 und 9.2-11.

$$\frac{x_i}{B} = \frac{2i-1}{2n} \quad (9.2-10)$$

$$\frac{y_j}{H} = \frac{2j-1}{2m} \quad (9.2-11)$$

Hierin bedeuten:

- $x_i; y_j$  Koordinaten der Meßpunkte
- $B$  Breite des Rechtecks
- $H$  Höhe des Rechtecks
- $i; j$  Ordnungszahl der Meßpunkte über Breite und Höhe
- $n; m$  Anzahl der Meßpunkte auf den Meßgeraden

Die mittlere Geschwindigkeit wird durch arithmetisches Mitteln der Einzelgeschwindigkeiten bestimmt, Gleichung 9.2-12.

$$v_m = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n v_{ij} \quad (9.2-12)$$

Werden im Bereich großer Geschwindigkeitsgradienten die Meßabstände und damit die Meßflächen kleiner gewählt, so sind die Geschwindigkeiten entsprechend der Größe der Meßflächen nach Gleichung 9.2-13 zu wichten.

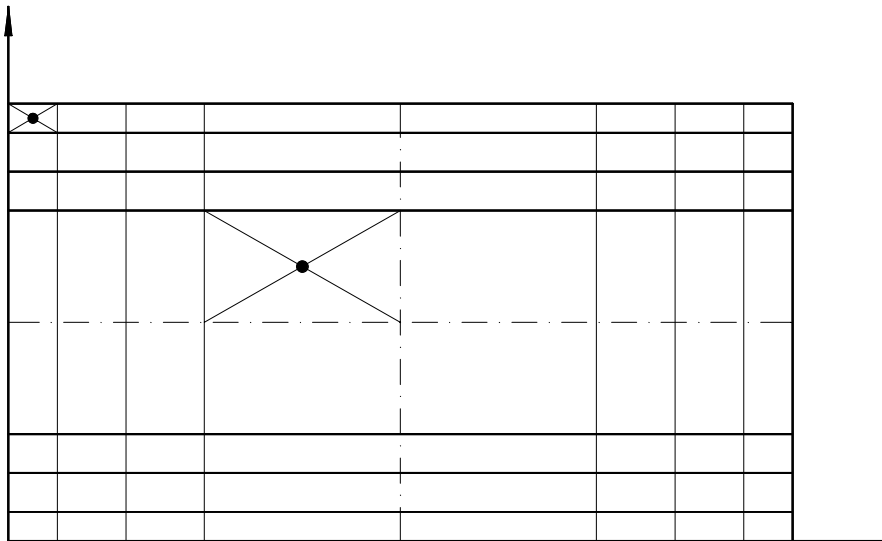
$$g_{ij} = \frac{A_{ij}}{A} \quad (9.2-13)$$

Mit den Wichtungsfaktoren  $g_{ij}$  berechnet sich die mittlere Geschwindigkeit nach Gleichung 9.2-14.

$$v_m = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n v_{ij} \cdot g_{ij} \quad (9.2-14)$$

Schwerlinienverfahren:

Beim Schwerlinienverfahren wird der Meßquerschnitt in flächengleiche Rechteckrahmen und ein innenliegendes Rechteck aufgeteilt, Bild 9.2-5.



**Bild 9.2-5:** Aufteilung der Meßfläche in Rechteckrahmen für  $n=4$

Die Größe der  $n-1$  Rechteckrahmen und inneren Rechtecks folgen aus Gleichung 9.2-15.

$$\frac{b_i}{B} = \frac{h_j}{H} = \sqrt{1 - \frac{i}{n}} \quad (9.2-15)$$

Die Abstände der Meßpunkte vom Koordinatenursprung bis zu den Mittellinien werden nach Gleichung 9.2-16 berechnet.

$$\frac{x_i}{B} = \frac{y_j}{H} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 - \frac{i-1}{n}} + \sqrt{1 - \frac{i}{n}} \right) \right] \quad (9.2-16)$$

Für die zweite Hälfte der Meßfläche ergeben sich die Koordinaten der gespiegelten Meßpunkte nach Gleichung 9.2-17.

$$\frac{x'_i}{B} = \frac{y'_j}{H} = 1 - \frac{x_i}{B} = 1 - \frac{y_j}{H} \quad (9.2-17)$$

Die gemessenen Geschwindigkeiten sind entsprechend den Teilflächen zu wichten und arithmetisch zu mitteln

$$v_m = \sum v_{ij} \cdot g_{ij} \quad (9.2-18)$$



## 9.2.2 Volumenstrommessung an Luftdurchlässen

Die Luftführung an Luftein- und -Auslässen ist entsprechend den vielfältigen vorhandenen Konstruktionen sehr verschieden. Es ist deshalb häufig schwierig, die mittlere Geschwindigkeit aus Punktmessungen zu ermitteln. In der Praxis haben sich deshalb integrale Meßverfahren bewährt. Im folgenden werden das Kompensationsverfahren [6] und das Airbag-Verfahren [6] beschrieben.

### 9.2.2.1 Kompensationsverfahren

Der Luftdurchlaß wird mit einer Meßkammer verschlossen. Dieser Meßkammer wird je nach Luftauslaß oder Lufteinlaß der Luftvolumenstrom zugeführt oder entnommen, der zu keinem Über- oder Unterdruck in der Meßkammer führt. Dieser Luftvolumenstrom kompensiert dann genau den Volumenstrom im Luftdurchlaß. Mit Meßblenden, Einlaufdüsen oder anderen Meßverfahren ist der Volumenstrom an der Meßkammer einfacher und genauer zu messen als am Luftdurchlaß selbst. Der Gleichdruck zwischen Meßkammer- und Umgebungsdruck muß mit einem empfindlichen Druckmeßgerät, z.B. einem Mikromanometer gemessen werden. Das Verfahren wird auch als Nullmethode bezeichnet, da zum Zeitpunkt der Messung der Druckunterschied zwischen Meßkammer und Umgebung Null ist.

Der Querschnitt der Meßkammer richtet sich nach der Größe des Luftdurchlasses und bei Luftauslässen zusätzlich nach der Strömungsrichtung [6].

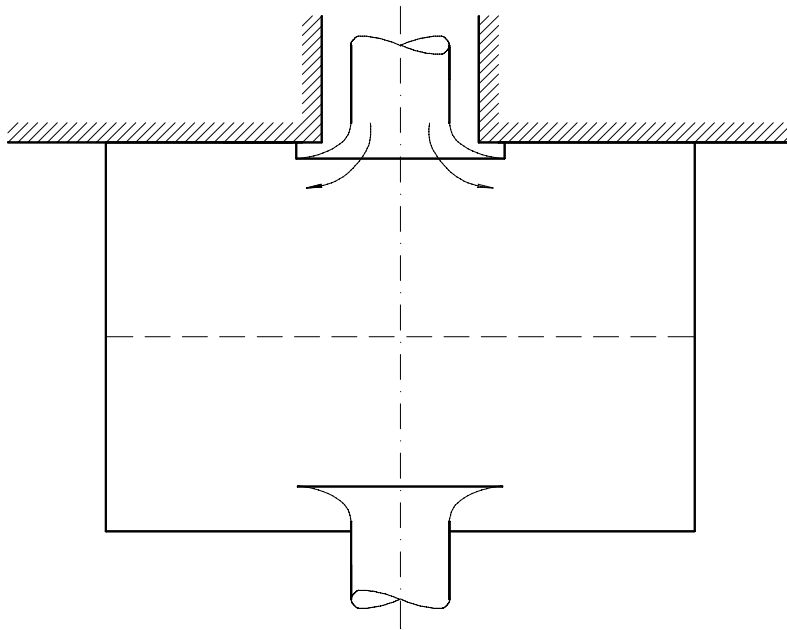
Luftdurchlaßart:

Luftaustritt	$AMK > AD$
mit Drallauslaß	$AMK \geq 10 \cdot AD$
Lufteintritt	$AMK \geq 10 \cdot AD$

hierin bedeuten:

AD	Durchlaßfläche
AMK	Querschnitt der Meßkammer

Das Bild 9.2-6 zeigt einen Meßaufbau für eine Volumenstrommessung an einem Wandauslaß.



**Bild 9.2-6:** Meßanordnung an einem Luftauslaß nach der Nullmethode[6]

### 9.2.2.2 Airbag-Verfahren

Das von Presser [6] beschriebene Verfahren besteht darin, einen zunächst zusammengefalteten Plastiksack (Airback) von bekanntem Volumen zu füllen. Aus Volumen  $V_{Airb.}$  und Füllzeit  $\tau$  für das Aufblasen läßt sich nach Gleichung 9.2-19 der Volumenstrom berechnen.

$$\dot{V} = \frac{V_{Airb.}}{\tau} \quad (9.2-19)$$

Die Messung ist beendet, wenn sich im Meßvolumen ein geringer Überdruck gegenüber dem Meßraum eingestellt hat. Dieser Überdruck sollte zwischen 3 Pa und 10 Pa gewählt werden.

### 9.2.2.3 Schlaufenmessung

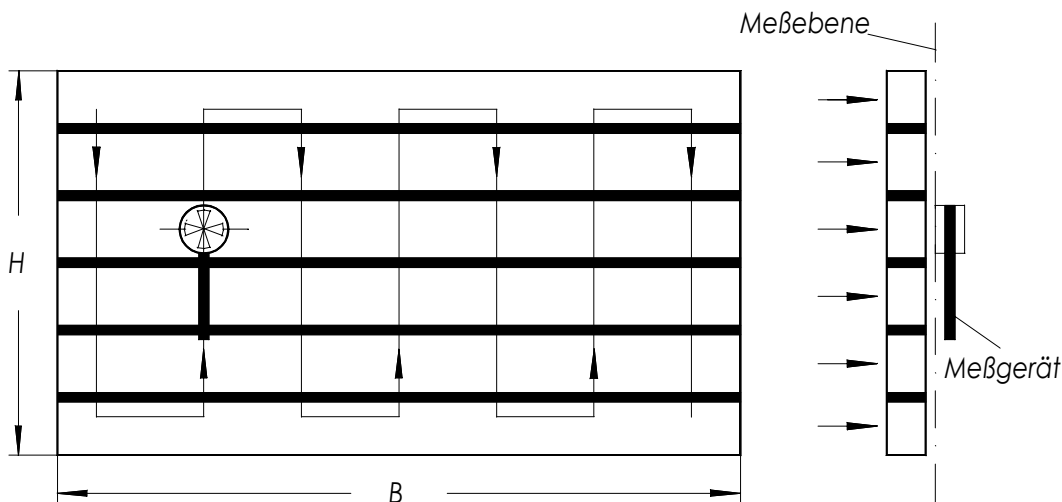
Ein sehr einfaches Meßverfahren ist die Schlaufenmessung mit einem Flügelradanemometer.

Voraussetzung für die Durchführung einer Schlaufenmessung ist eine gerichtete Strömung im Meßquerschnitt. An die Genauigkeit dieses Verfahrens sind keine hohen Ansprüche zu stellen, es ist aber ein praktikables Verfahren für vergleichende Messungen an mehreren Luftdurchlässen. Die Meßfläche wird mit dem Anemometer auf einer Meßlinie der Länge  $L$  abgefahren. Durch die Bewegung des Meßgerätes quer zur Strömungsrichtung kommt es durch die schräge Anströmung zu einem Meßfehler. Je nach Herstellertyp liegt dieser

Fehler im Bereich von  $< 1\%$ , wenn der Winkel der Schräganströmung den Wert von  $\pm 10^\circ$  nicht überschreitet. Entsprechend sollte die Führungsgeschwindigkeit  $v_F$  für das Anemometer auch 20% der Strömungsgeschwindigkeit  $v$  nicht überschreiten und eher niedriger liegen.

Die Meßzeit  $t_M$  ergibt sich aus dem Meßweg  $L$  und der Führungsgeschwindigkeit  $v_F$ .

$$t_M = \frac{L}{v_F} \quad (9.2-20)$$



**Bild 9.2-7:** Schlaufenmessung mit einem Flügelradanemometer an einem Luftauslaß

Sind die oben genannten Voraussetzungen für das Meßverfahren nicht erfüllt, so lassen sich diese mitunter durch Aufsetzen eines Meßkanals erreichen, der in seinen Abmessungen den im Kapitel 9.2.2.1 beschriebenen Kompensationsverfahren entsprechen sollte.

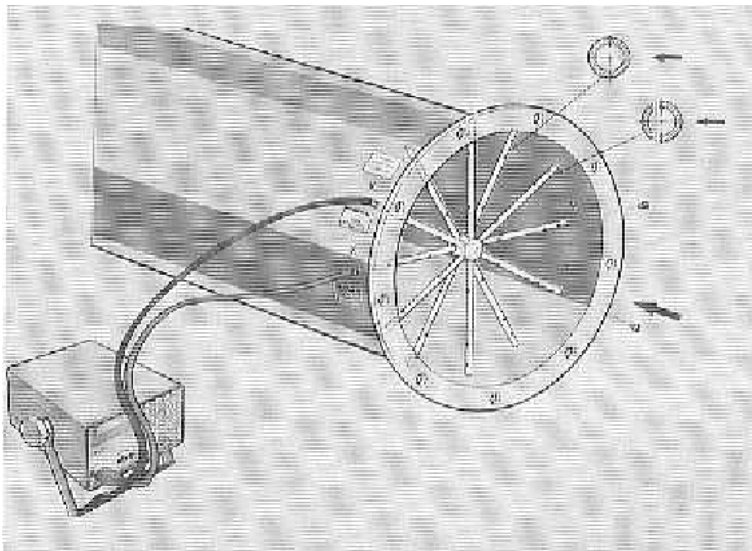
### 9.2.3 Meßgeräte

Der Luftvolumenstrom in Kanälen wird über die Messung der Geschwindigkeit ermittelt. Hierzu werden in der Praxis z.B. Staudrucksonden nach Prandtl und der Aerodynamischen Versuchsanstalt (AVA) Göttingen sowie Flügelradanemometer eingesetzt, wie sie im Kapitel Durchfluß- und Geschwindigkeitsmessungen beschrieben werden. Die Meßpunkte werden nach den zuvor beschriebenen Verfahren für Netzmessungen gewählt. In Kanälen mit großen Querschnitten werden die Meßpunkte mit einer Sonde hintereinander abgetastet. Dies setzt ein für die Meßdauer konstantes Geschwindigkeitsprofil voraus. Dies ist durch eine parallel an einem Referenzpunkt durchzuführende Messung zu kontrollieren. Die Meßdauer kann durch den Einsatz mehrerer Staudrucksonden erheblich verkürzt

werden. Diese werden entsprechend der Anordnung der Meßpunkte auf zwei oder drei Meßachsen auf einem Staurohrrechen oder Meßkreuz angeordnet.

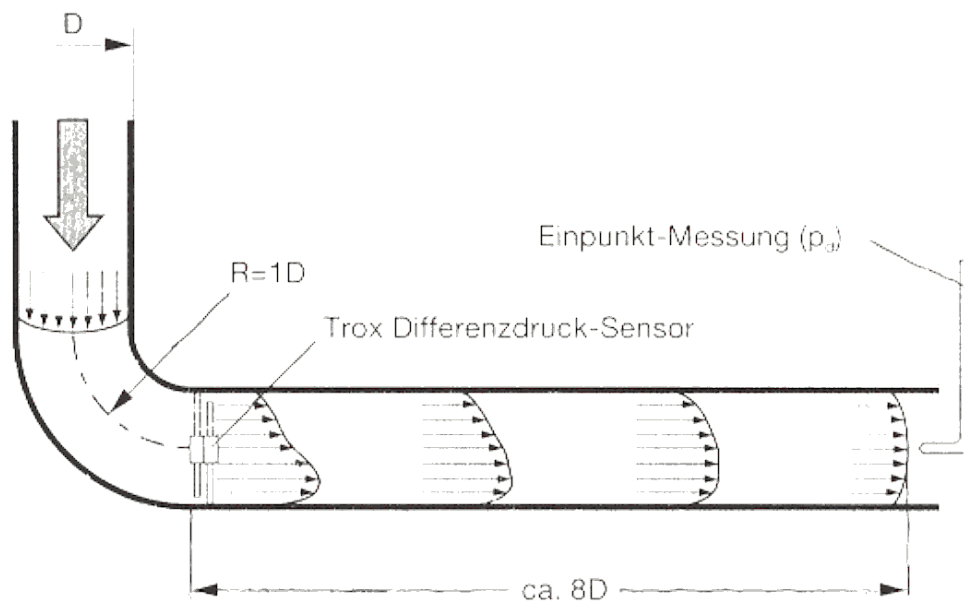
#### *Meßkreuze mit Staudrucksonden zur Messung der mittleren Geschwindigkeit*

Für stationäre Meßanordnungen, wie sie in Volumenstromregelanlagen eingesetzt werden, müssen der Druckverlust der Meßeinrichtung gering und die Beruhigungsstrecken kurz gehalten werden. Diese Meßaufgabe wird mit stabförmigen Meßsonden gelöst, die mehrere Meßbohrungen haben und so Unsymmetrien im Strömungsprofil ausmitteln. Die Stabsonden werden zu Meßkreuzen verbunden. Jede der diagonal angeordneten Stabsonden mißt entweder den mittleren Gesamtdruck auf der angeströmten Seite oder einen Unterdruck an den Meßstellen der Rückseite[7]. Der dynamische Druck wird durch diese Meßanordnung um einen Faktor von ca. 2 verstärkt und läßt so Messungen ab 1,5 m/s zu. Der Faktor muß durch eine Kalibrierung bestimmt werden. Für die Meßkreuze von der Fa. Airflow Lufttechnik wird ein Faktor von 2,2 angegeben, Bild 9.3-1.



**Bild 9.3-1:** Ausführung von Meßkreuzen der Fa. Airflow Lufttechnik GmbH[8]

In technischen Anwendungen ist aus Platzgründen die Anordnung von Meßkreuzen für Volumenstromregleinrichtungen auch unmittelbar nach Kanalbögen erforderlich, Bild 9.3-2.



**Bild 9.3-2:** Meßanordnung eines Meßkreuzes und Strömungsverlauf nach einem Kanalbogen, Fa. Gebrüder Trox GmbH[9]

### Literatur:

- [1] VDI/VDE 2640, Blatt 1: Netzmessungen in Strömungsquerschnitten. Allgemeine Richtlinien und mathematische Grundlagen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [2] VDI/VDE 2640, Blatt 3: Netzmessungen in Strömungsquerschnitten. Bestimmung des Gasstromes in Leitungen mit Kreis-, Kreisring- oder Rechteckquerschnitt. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [3] VDI 2079, Blatt 1: Abnahmeprüfung und Leistungsmessung an Raumluftechnischen Anlagen. Abnahmeprüfung. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [4] VDI 2079, Blatt 2: Abnahmeprüfung und Leistungsmessung an Raumluftechnischen Anlagen. Leistungsmessung. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

- 
- [5] VDI 2080: Meßverfahren und Meßgeräte für Raumluftechnische Anlagen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [6] Presser, K.H. :Meßverfahren und Meßgeräte für Raumluftechnische Anlagen. Beilage zu Handbuch der Klimatechnik, Band 2. Verlag C.F. Müller GmbH, Karlsruhe.
- [7] Fiedler, O.: Strömungs- und Durchflußmeßtechnik.R. Oldenbourg Verlag München 1992.
- [8] Technische Unterlagen der Fa. Airflow Lufttechnik GmbH, Rheinbach.
- [9] Technische Unterlagen der Fa. Gebrüder Trox GmbH Neukirchen-Vluyn.