

1. ALLGEMEINES

Hersteller:

- Dr. Ing. Karel Jaroš (Brno, CZ)

Messverfahren:

- lokale, hochauflösende Druckerfassung (nicht-integral)
- Berechnung Geschwindigkeitsvektoren aus dynamischem Druckanteil

Einsatzgebiet:

- 4-Takt-Motoren
- 2-Takt-Motoren

2. BILDER VOM STRÖMUNGSPRÜFSTAND

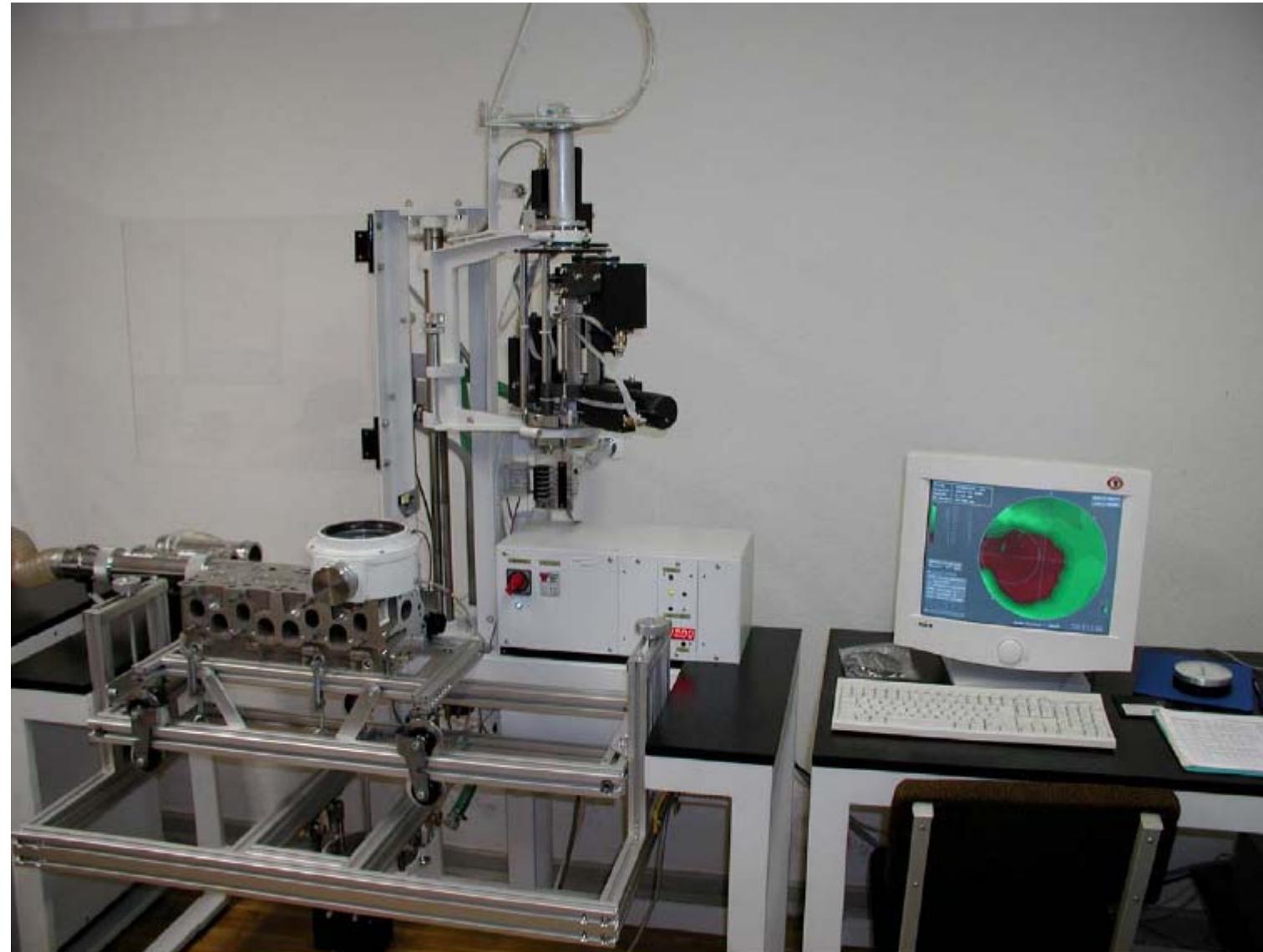


Abb. 2.1:

Strömungsprüfstand
(Übersicht)

2. BILDER VOM STRÖMUNGSPRÜFSTAND

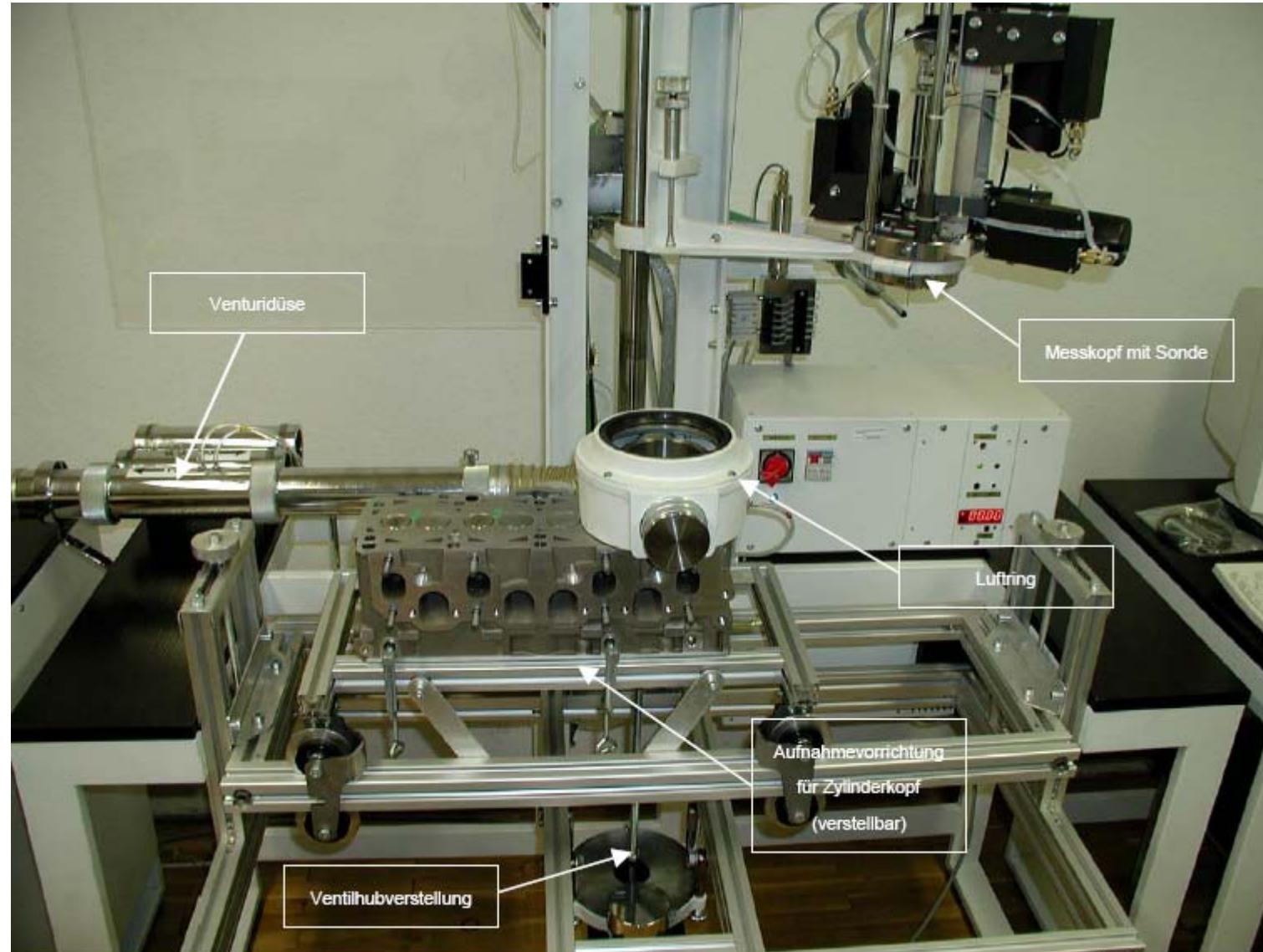


Abb. 2.2:

Strömungsprüfstand

(Details)

2. BILDER VOM STRÖMUNGSPRÜFSTAND



Abb. 2.3:

Luftring mit Hülse

2. BILDER VOM STRÖMUNGSPRÜFSTAND

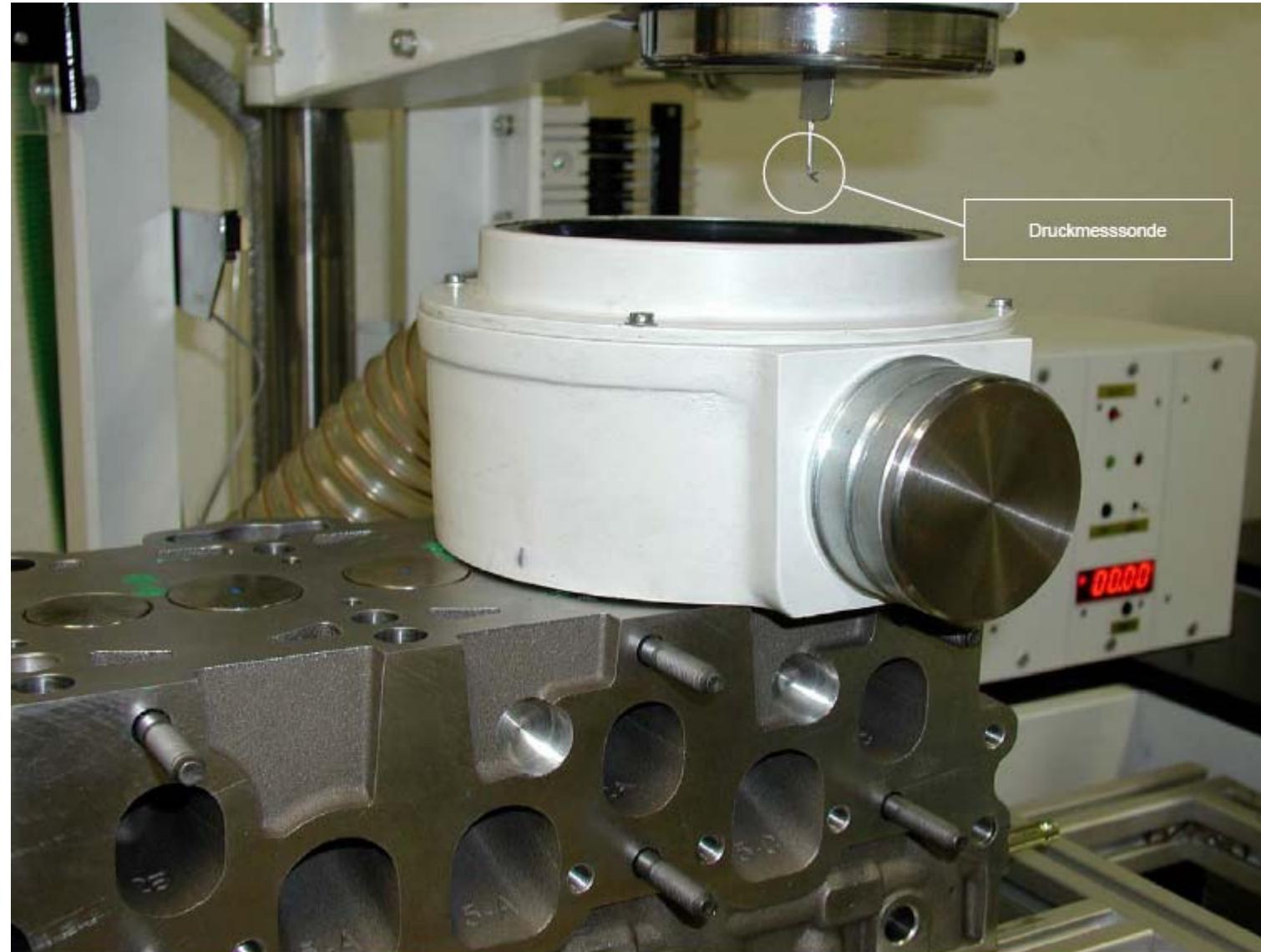


Abb. 2.4:

Messkopf mit
Druckmesssonde

3. MESSPRINZIP

Durchflussmenge:

Durch die Pumpe wird eine konstante Druckdifferenz zwischen Einlasskanal und Luftring erzeugt. Möglich sind Differenzdrücke bis zu 5000 Pa. Es fließt ein Volumenstrom über den Einlasskanal durch einen Luftring (Zylinder) zur Venturidüse. Sie ermöglicht die Bestimmung der Volumen- bzw. Massenströme. Abb. 3.1 zeigt den schematischen Aufbau der Venturidüse.

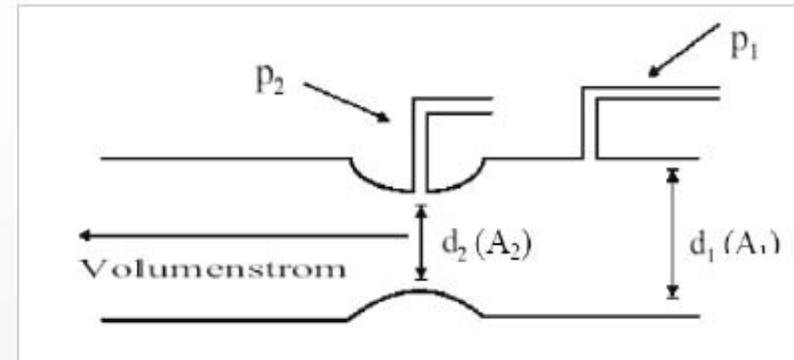


Abb 3.1: Schematischer Aufbau Venturidüse

Der statische Druck wird direkt vor (p_1) und im Strömungsquerschnitt (p_2) der Venturidüse gemessen und über die Druckdifferenz wird dann die Strömungsgeschwindigkeit berechnet.

$$v_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho} \cdot \frac{1}{1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}}}$$

Der Volumenstrom kann nun über die bekannte Venturiquerschnittsfläche wie folgt berechnet werden:

$$\dot{V} = v_2 \cdot A_2$$

3. MESSPRINZIP

Geschwindigkeitsvektoren:

Die Ermittlung des Geschwindigkeitsfeldes erfolgt durch Druckmessung an definierten Messpunkten im Zylinderraum. Dazu wird eine Sonde in den Zylinder eingebracht, die durch Schrittmotoren gesteuert, voreingestellte Koordinaten abfährt und den örtlich vorhandenen Druck misst. Mit dem Ergebnis dieser Druckmessung wird die Geschwindigkeit der Luftströmung berechnet. Aufgrund ihrer geringen Stärke wird die Strömung durch die Sonde selbst nicht beeinflusst. Es können mehrere Messebenen in unterschiedlichem Abstand zum Zylinderkopf mit einer bestimmten Messpunkteanzahl gewählt werden.

Die horizontale Messpunktebene wird durch konzentrische Kreise gebildet. Der jeweils ausgewählten Anzahl von Messpunkten ist eine bestimmte Anzahl von Kreisen sowie ein radialer Abstand der Kreise untereinander zugeordnet (**Abb. 3.2**). Der äußere Kreis, d. h., die äußere Messbahn der Messsonde ist begrenzt durch einen eingegebenen Sicherheitsabstand der Sonde zur Zylinderbohrungswand.

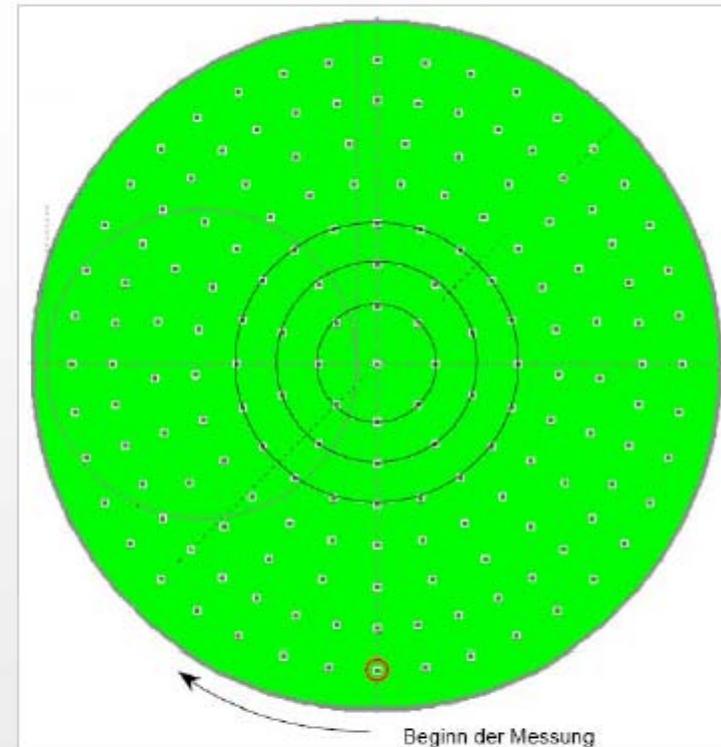


Abb. 3.2: Horizontale Messpunktebene (Beispiel: 169 Messpunkte, verteilt auf 7 Messbahnen)

3. MESSPRINZIP

Um das Messprinzip zu veranschaulichen, wird ein Quader mit der Kantenlänge a definiert. Im Schnittpunkt der Raumdiagonalen des Quaders befindet sich der Messpunkt, an dem die Druckmesssonde positioniert ist. Die Sonde besitzt zwei getrennte Öffnungen, die im Winkel von $70,5$ Grad (entspricht dem Winkel der Raumdiagonale) zueinander angeordnet sind.

Sie bestimmt am Messpunkt den in den Richtungen der vier Raumdiagonalen herrschenden Gesamtdruck innerhalb der Strömung (Abb. 3.3). Für einen Punkt sind acht Einzelmessungen notwendig, da in jeder Diagonalen zwei Messungen erfolgen.

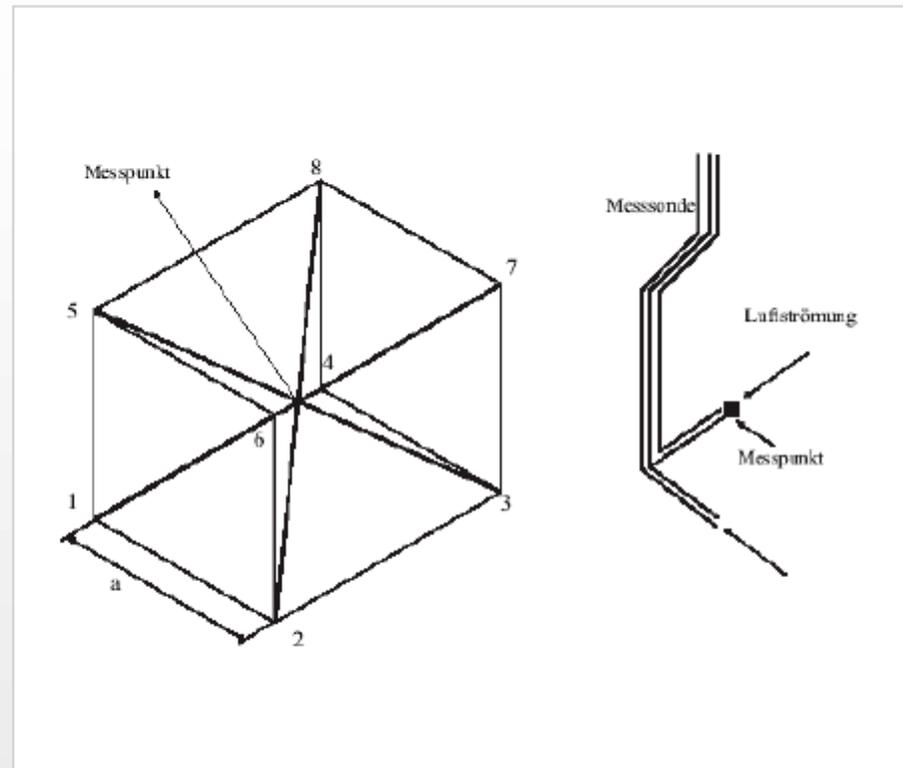


Abb. 3.3: Positionierung der Messsonde am Messpunkt

3. MESSPRINZIP

Am Beispiel einer Diagonale wird die Berechnung des Geschwindigkeitsvektors aus der Druckmessung erläutert. Für die Messung von Punkt 1 nach Punkt 7 gilt folgendes Druckgleichgewicht (Abb. 3.4):

$$p_{ges} = p_{st} + p_{dyn} = p_{st} + \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

Die Sonde wird um 180 Grad gedreht und angehoben, so dass Öffnung 2 aktiv ist. Dafür gilt:

$$p_{ges} = p_{st} + p_{dyn} = p_{st} - \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

Subtrahiert man die Gleichungen voneinander, so ergibt sich die Gesamtdruckdifferenz zwischen beiden Messrichtungen in Abhängigkeit des dynamischen Druckes:

$$\Delta p_{ges} = \rho \cdot v^2$$

Aus der Druckdifferenz lässt sich damit die Strömungsgeschwindigkeit in Richtung dieser Raumdiagonale bestimmen. In der gleicher Weise werden auch die Geschwindigkeiten in Richtung der anderen Raumdiagonalen berechnet. Man erhält vier Geschwindigkeitskomponenten, die anschließend geometrisch addiert werden und den gesuchten Geschwindigkeitsvektor im Messpunkt ergeben.

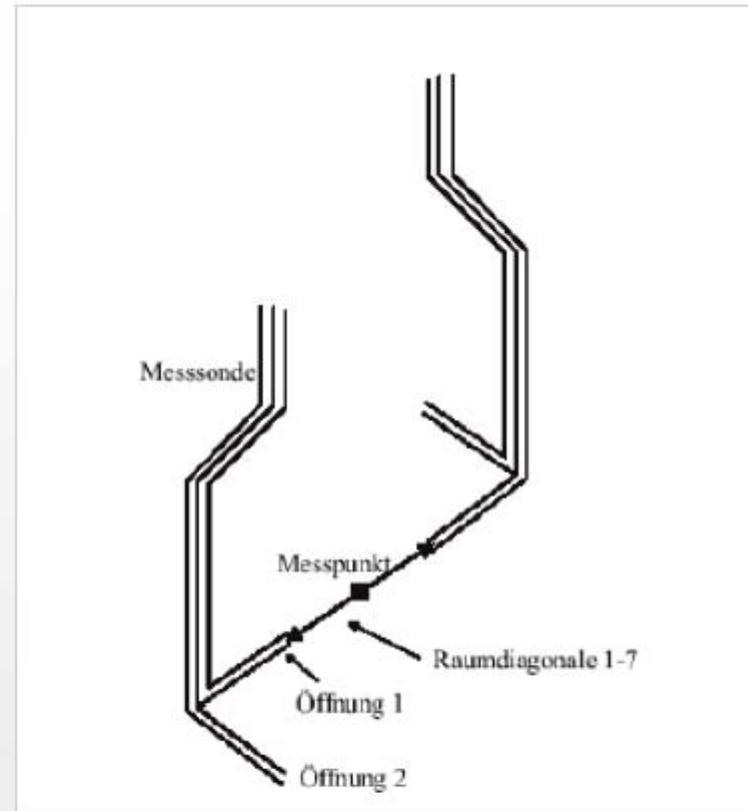


Abb. 3.4: Prinzip der Druckmessung in beiden Richtungen der Raumdiagonale

4. DARSTELLUNG STRÖMUNGSPROFILE

Höhenlinien: Axialgeschwindigkeit

Pfeile (Betrag / Richtung): Geschwindigkeitsvektoren in Messebene (x/y-Richtung)

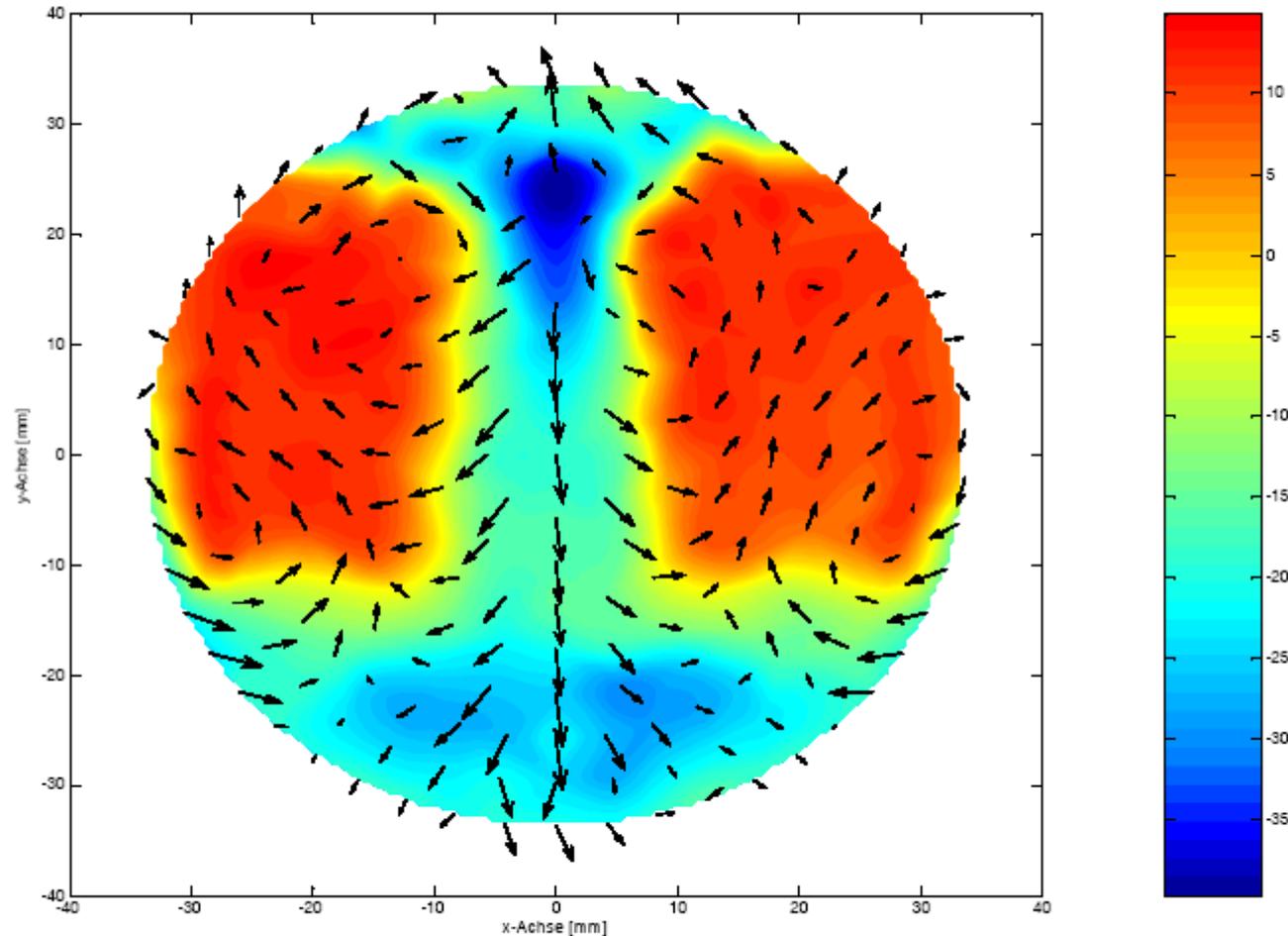


Abb. 4.1: Geschwindigkeitsprofil eines DI-Ottomotors / Messebene 15 mm / Tumbleklappe offen

5. BERECHNUNG LADUNGSBEWEGUNGSKENNGRÖSSEN

Drall:

Für die Berechnung der Drallzahl wird eine Drallströmung in der Messebene idealisiert als Kreiszyylinder betrachtet, der um seine Hochachse rotiert und dessen Durchmesser dem Zylinderdurchmesser entspricht. Die Höhe des Kreiszyinders ist mit 5 mm definiert. Die aus den tangentialen Geschwindigkeitskomponenten der Messpunkte berechnete kinetische Energie der Drallströmung wird der Rotationsenergie des Kreiszyinders gleichgesetzt. Für die Rotationsenergie dieses Körpers bei Drehung um die Hochachse gilt:

$$E_{kin} = E_{rot} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega_D^2$$

Mit der Winkelgeschwindigkeit der Ladungsbewegung

$$\omega_D = 2 \cdot \pi \cdot n_D$$

und dem Trägheitsmoment des Kreiszyinders

$$J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \frac{d^2}{4}$$

gilt für die Drehzahl der Drallströmung:

$$n_D = \frac{2}{d \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{E_{kin}}{V \cdot \rho}}$$

Die Drallzahl ist definiert als Quotient aus der äquivalenten Drallzahl n_D und der gedachten Bezugsdrehzahl des Motors n_M , die sich aus der mittleren Kolbengeschwindigkeit

$$c_m = 2 \cdot s \cdot \frac{n_M}{60}$$

berechnet.

5. BERECHNUNG LADUNGSBEWEGUNGSKENNGRÖSSEN

Das Ersetzen der mittlere Kolbengeschwindigkeit durch die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Zylinder

$$v_m = \frac{\dot{V}}{A_k}$$

ergibt für die Bezugsdrehzahl des Motors in Abhängigkeit vom Volumenstrom folgende Gleichung:

$$n_M = \frac{30 \cdot \dot{V}}{s \cdot A_k}$$

Für die Bestimmung der Drallzahl ergibt sich somit die Gleichung:

$$D = \frac{n_D}{n_M} = \frac{n_D}{30 \cdot \dot{V}} \cdot s \cdot A_k$$

Tumble:

Die Ableitung der Tumblezahl erfolgt in gleicher Weise wie die Drallzahl. Damit ergibt sich für die Tumblezahl folgende Gleichung:

$$T = \frac{n_T}{n_M} = \frac{n_T}{30 \cdot \dot{V}} \cdot s \cdot A_k$$

6. TECHNISCHE DATEN

Messsonde:

- maximaler axialer Weg: 82 mm über Zylinderkopf
- untere Begrenzung: maximaler Ventilhub + 5 mm (Sicherheit gegen Aufsetzen der Sonde auf das Ventil)
- Schrittweite radial: 0,25 mm
- Schrittweite axial (Messebenen): 0,25 mm
- minimaler Abstand der Sonde von der Zylinderwandung: 3,5mm

Anzahl der Messpunkte pro Messebene:

- minimal: 129
- maximal: 1219
- Inkrementierung (Klammerwerte: Anzahl der Radien): 129 (6), 169 (7), 219 (8), 269 (9), 319 (10), 369 (11), 419 (12), 519 (13), 619 (14), 819 (16), 919 (17), 1219 (20)
- Radialschrittweite (zwischen den Radien) äquidistant, nur eine Schrittweite pro Messung

Ventilhub:

- Schrittweite: 0,05 mm
- automatisierte Ventilhubverstellung für 1 oder 2 Einlassventile bei gleichem Ventilhub

6. TECHNISCHE DATEN

Druckdifferenz:

- maximal 5000 Pa
- Begrenzung durch maximalen Volumenstrom von 60 l/s

Maximaler Zylinderdurchmesser:

- 103 mm

Messdauer:

- ca. 0,5 min pro Messpunkt

Dokumentation:

- Durchflussmenge, Durchflussbeiwert
- Messprotokoll Strömungsgeschwindigkeiten in x,y,z-Richtung pro Messpunkt
- Drallzahl, Tumblezahl
- kinetische Drallenergie, kinetische Tumblenergie
- Momentenansatz um x,y,z-Achse (vergleichbar zum Tippelmann-Prüfstand)
- graphische Darstellung: Konturplot, Surfaceplot, Differenzenkennfelder der Strömungsgeschwindigkeiten, beliebiger Axialschnitt (Winkel)