

**VELANI - Feinanalyse**

Verfahren

**VORBEREITUNG UND DURCHFLUSSMESSUNGEN AN EINEM  
VENTILATOR**

**ZUSAMMENFASSUNG**

|  |                                    |
|--|------------------------------------|
| 1. Einleitende Bemerkungen .....   | 3                                  |
| 2. Vorbereitung der Messungen .....  | 3                                  |
| 3. Typ der Messsonde .....   | 4                                  |
| 3.1 Pitotrohr .....  | 4                                  |
| 3.2 Hitzdraht-Anemometer .....   | 5                                  |
| 3.3 Propeller-Anemometer .....   | 5                                  |
| 4. Auswahl der Position der Durchflussmessstrecke .....                      | 6                                  |
| 5. Wahl der Anzahl der Messpunkte .....                                      | 6                                  |
| 6. Berechnung der Geschwindigkeit .....                                      | 7                                  |
| 7. Messgenauigkeit .....   | 8                                  |
| 8. Installationsschema des Geräts und Messungen mit Pitotrohr .....          | 9                                  |
| 8.1 Messprinzip mit identischer Saug- und Druckstrecke .....                 | 9                                  |
| 8.2 Messprinzip bei unterschiedlichen Ansaug- und Ausblasquerschnitten ..... | 9                                  |
| 9. Abhilfe schaffende Parameter .....  | <b>Erreur ! Signet non défini.</b> |
| 9.1 Korrektur der Geschwindigkeitsmessung je nach Art des Staurohrs .....    | 11                                 |
| 10. Einige häufige Schwierigkeiten und Fehler .....                          | 11                                 |
| Anhang 1: Druckdifferenztheorie .....  | 12                                 |
| Anlage 2: Druckkorrektur an den Kennlinien .....                             | 13                                 |
| Anlage 3: Geschwindigkeitsmessung in der Nähe einer Kurve .....              | 15                                 |

## 1. Einleitende Bemerkungen

Das hier vorgestellte Verfahren ist ein Hilfsmittel zur Durchführung von Strömungsmessungen an einem Ventilator mit einem Pitotrohr.

Andererseits :

***Dieses Dokument ist keine vollständige Beschreibung der verschiedenen Techniken zur Durchflussmessung an einem Ventilator.***

## 2. Vorbereitung der Messungen

Die Vorbereitung einer Messkampagne beginnt mit einer eingehenden Untersuchung und Analyse des Systems oder der Anlage, in die der zu messende elektrische Antrieb integriert ist (Systemansatz). Sobald der Umfang genau definiert und der Ventilator identifiziert ist, muss folgendes noch festgelegt werden:

| Themen   | Aufgaben   |
|--|--|
| Umfang der Analyse, System und theoretische Vorbereitung | Definieren Sie den Messzeitraum (Beginn und Dauer, Häufigkeit der Probenahme), um alle Situationen abzudecken.   |
| Praktische Vorbereitung (verantwortlich für Messungen)   | Legen Sie die Positionen der Entnahmestellen für die Druckentnahmen fest<br>Bestimmen Sie, ob das System abgeschaltet werden soll. (z. B. bei Pumpen, wenn kein Ventil am Manometer vorhanden ist und keine Pumpenredundanz besteht)<br><br>Vorbereitung der Synchronisierung der Uhren der Verschiedene Messgeräte .) |
| Praktische Vorbereitung (Operator)                       | Vorbereitung und Anpassung der Installationen für den Einbau der verschiedenen Sensoren (Manometeranschluss oder Entlüftung für Pumpen, Bohrungen und Nippel für Ventilatoren).  |

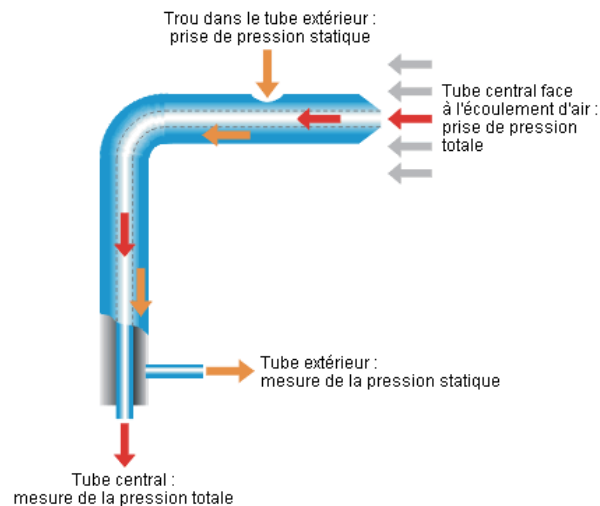
**Tab. 1:** Vorbereitung der Durchflussmessungen.

### 3. Typ der Messsonde

Es können verschiedene Arten von Sonden verwendet werden. Im Folgenden wird eine nicht vollständige Liste aufgeführt.

#### 3.1 Pitotrohr

Die schematische Darstellung eines Staurohrs ist unten abgebildet:



**Abb. 1: Schematische Darstellung eines Staurohrs vom Typ L**

Die Staurohr- (oder Prandtl-) Luftstrommessung besteht in der Bestimmung des dynamischen Drucks am Rohr und der Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit nach der Formel :

$$P_d = \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \quad \text{Oder} \quad v = s \times \sqrt{\frac{2 \times P_d}{\rho}}$$

Die am Pitotrohr gemessenen Größen sind der Gesamtdruck und der statische Druck der Flüssigkeit. Diese beiden Größen ermöglichen die Berechnung des dynamischen Drucks nach der folgenden Beziehung:

$$P_T = P_d + P_s$$

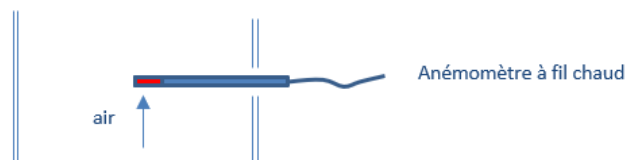
Das Pitotrohr ist das genaueste System für Luftgeschwindigkeiten über 3 m/s.

### 3.2 Hitzdraht-Anemometer

Das Hitzdrahtanemometer berechnet die Luftgeschwindigkeit aus der Temperaturdifferenz des Drahtes (Widerstand), der durch den Luftstrom gekühlt wird. Es kann sehr niedrige Geschwindigkeiten messen (zwischen 0,2 und 3 m/s).



**Abb. 2:** Hitzdrahtanemometer und Sonde im Detail.



**Abb. 3:** Schematische Darstellung eines Hitzdrahtanemometers.

### 3.3 Propeller-Anemometer

Das Propelleranemometer ist in verschiedenen Formen erhältlich (Propeller mit oder ohne Messgerät, mit Kegel, mit Stab für Fernmessungen) und wird für Luftgeschwindigkeiten über 1 m/s verwendet.



**Abb. 4:** Propelleranemometer

#### 4. Auswahl der Position der Durchflussmessstrecke

Der gewählte Messabschnitt muss sich in einer geraden Linie befinden, die senkrecht zur Rohrachse verläuft. Dieser Abschnitt muss sich in einem Bereich befinden, in dem die gemessenen Geschwindigkeiten innerhalb des normalen Betriebsbereichs der verwendeten Geräte liegen.

Die Messstrecke sollte weit genug von jeder Asymmetrie, Rotation oder Turbulenz entfernt sein. Wenn möglich, sollte dieser Messbereich mit einer stromaufwärtigen Länge des Messfühlers von mehr als 10 Durchmessern und einer stromabwärtigen Länge von mehr als 5 Durchmessern gemessen werden. Wenn die gerade Länge nicht ausreicht, positionieren Sie die Messstrecke zwischen 80 und 90 % dieser verfügbaren Länge.

#### 5. Wahl der Anzahl der Messpunkte

Die Anzahl der Messpunkte sollte ausreichen, um die Verteilung der Geschwindigkeiten in zufriedenstellender Weise zu ermitteln.

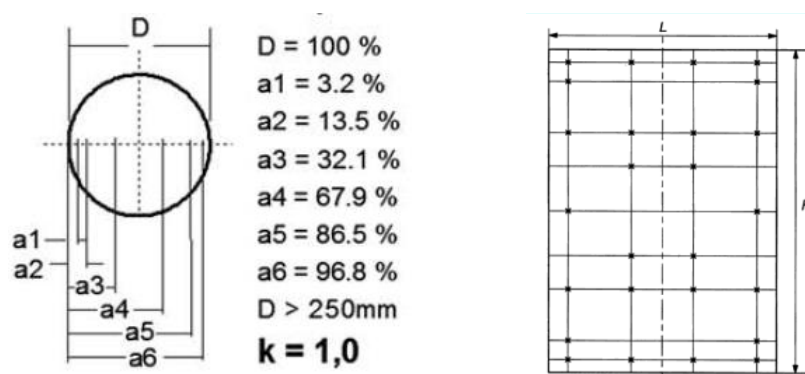
##### Kreisförmige Querschnitte :

Es sollte mindestens 6 Punkte gemessen werden, die symmetrisch entlang des Durchmessers der Messstrecke, d. h. in nur einer Messrichtung, verteilt sind (Abb. 5). Darüber hinaus ist eine Messung in der Mitte des Rohrs wünschenswert, um die Form des Geschwindigkeitsprofils zu überprüfen.

Im Falle einer Messung in der Nähe einer Störung reicht eine einzige Messrichtung nicht aus (siehe Anlage 3). In diesem Fall sind die gleichen Messungen in mindestens 4 Richtungen für denselben Messabschnitt zu wiederholen. Der Winkel zwischen den einzelnen Richtungen muss gleich sein und es müssen mindestens 2 Richtungen senkrecht zueinander stehen.

##### Rechteckige Querschnitte :

Die Anzahl der Messpunkte muss mindestens 26 betragen. Ihre Lage wird durch die Schnittpunkte von mindestens fünf Geraden bestimmt, die parallel zu jeder Rohrwand verlaufen (Abb. 5).



**Abb. 5:** Positionierung der Punkte: kreisförmiger Schnitt (links) und rechteckiger Schnitt (rechts)

| Y/H    | x/L=0,092 | x/L=0,3675 | x/L=0,6325 | x/L=0,908 |
|--------|-----------|------------|------------|-----------|
| 0.034  | 2         | 3          | 3          | 2         |
| 0.092  | 2         |            |            | 2         |
| 0.250  | 5         | 3          | 3          | 5         |
| 0.3675 |           | 6          | 6          |           |
| 0.5    | 6         |            |            | 6         |
| 0.632  |           | 6          | 6          |           |
| 0.750  | 5         | 3          | 3          | 5         |
| 0.908  | 2         |            |            | 2         |
| 0.966  | 2         | 3          | 3          | 2         |

**Tab. 2:** Lage der Messpunkte und Wichtungsfaktoren ( $k_i$ ) für rechteckige Querschnittsdurchflüsse.

## 6. Berechnung der Geschwindigkeit

Während der gesamten Messung muss die Geschwindigkeitsverteilung in der Messstrecke stabil bleiben und darf während der gesamten Messung keinen Strömungsschwankungen unterworfen sein.

Für die Berechnung der Geschwindigkeit muss der Differenzdruck zwischen dem Gesamtdruck und dem statischen Druck des Pitotrohrs an den verschiedenen Messpunkten gemessen werden. Darüber hinaus muss die Dichte der Flüssigkeit unter den Messbedingungen bestimmt werden.

$$\rho = \rho_0 \times \frac{273.15}{273.15 + T} \times \frac{P + P_{atm}}{P_{atm}}$$

Mit

P: Gesamtdruck (statisch + dynamisch)

$P_{atm}$ : Atmosphärischer Druck

T: Temperatur (°C)

$\rho_0 = 1.293 \text{ kg/m}^3$  (Dichte von Luft bei  $T=0^\circ\text{C}$  und  $P_{atm}=1\text{bar}$ )

Es ist dann möglich, die lokale Fließgeschwindigkeit an jedem Messpunkt nach der folgenden Gleichung zu berechnen:

$$V = \alpha * \sqrt{\frac{2 * P_{dynamique}}{\rho}}$$

Die durchschnittliche Fließgeschwindigkeit wird nach einer arithmetischen Methode und je nach Art des Abschnitts berechnet:

- Kreisquerschnitt: Die durchschnittliche Fließgeschwindigkeit ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel der lokalen Geschwindigkeiten.
- Rechteckiger Querschnitt: Die Strömungsgeschwindigkeit ist gegeben durch :

$$U = \frac{\sum k_i \times v_i}{\sum k_i}$$

Mit :

U: mittlere Fließgeschwindigkeit

$v_i$ : an der Position i gemessene Geschwindigkeit

$k_i$ : Gewichtungsfaktor für Position i

$\sum k_i = 96$

Der Volumendurchfluss (in  $\text{m}^3/\text{s}$ ) schließlich ist gleich dem Produkt aus der Querschnittsfläche (in  $\text{m}^2$ ) und der mittleren Fließgeschwindigkeit (m/s).

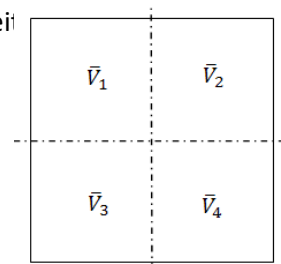
## 7. Messgenauigkeit

Die Genauigkeit der Messung wird hauptsächlich durch die Abmessungen der Messstrecke, die Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit, die Form des Geschwindigkeitsprofils und die Anzahl der Messpunkte beeinflusst. Der Grenzfehler dieser Methode ermöglicht eine **Messgenauigkeit von  $\pm 2\%$** .

Die Unregelmäßigkeit des Strömungsprofils wird durch die maximale Differenz zwischen der Geschwindigkeit aller Messpunkte und den mittleren Geschwindigkeit der Gesamtstrecke berechnet, d.h. :

$$U = \frac{\bar{V}_{\max} - \bar{V}_{\min}}{2 \times \bar{V}_{\text{tot}}} \times 100 [\%]$$

Mit



Um eine Unsicherheit von weniger als 10 % zu erreichen, sollte die Anzahl der Messpunkte mindestens der Unsicherheit entsprechen. Um eine Unsicherheit von weniger als 5% zu erreichen, verdoppeln Sie die Anzahl der Messpunkte.



## 8. Installationsschema des Geräts und Messungen mit Pitotrohr

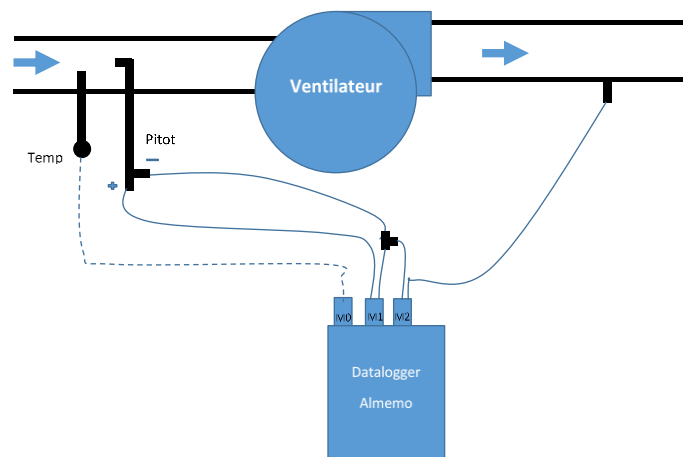
Die Durchflussmessung mit Pitotrohren ermöglicht auch die Bestimmung des Drucks des Ventilators. So kann der Ventilator vollständig charakterisiert und seine Luftleistung bestimmt werden.

Die verschiedenen Arten von Aufbauten für diese Durchfluss- und Druckcharakterisierung sind unten dargestellt.

**Hinweis:** Das Staurohr wird vorzugsweise auf der Saugseite des Ventilators angebracht (auf der Saugseite ist der Flüssigkeitsstrom normalerweise weniger gestört als auf der Druckseite).

### 8.1 Messprinzip mit identischer Saug- und Druckstrecke

Das nachstehende Diagramm zeigt, wie ein Pitotrohr und ein Druckabgriff verwendet werden können, um einen Ventilator mit identischem Ein- und Auslassquerschnitt vollständig zu charakterisieren.



**Abb. 6:** Verwendung des Staurohrs (Durchfluss und Druckdifferenz), identische Querschnitte

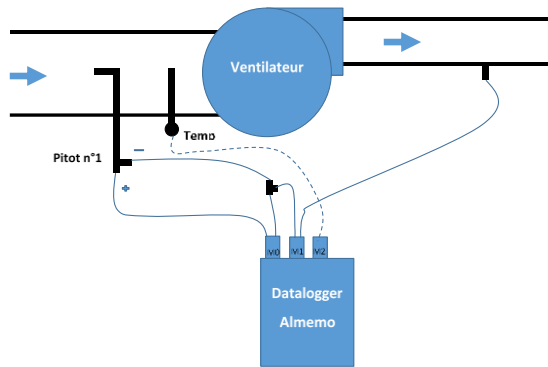
Die Terme des dynamischen Drucks sind identisch und heben sich in der Gesamtdruckdifferenzformel auf (siehe Anlage 1). Es bleiben nur die Terme für den statischen Druck übrig. Mit der obigen Konfiguration werden die statischen Drücke am Einlass (einer der Pitot-Auslässe) und am Auslass (spezieller Druckaufnehmer) sowie die Luftgeschwindigkeit aufgezeichnet (das Rohr wird an der Stelle platziert, an der die Geschwindigkeit dem Durchschnitt des Querschnittsgeschwindigkeitsprofils entspricht). Der Durchfluss ist dann das Produkt aus der Querschnittsfläche und der Geschwindigkeit.

Die Berechnung der Luftstromkapazität des Ventilators ist das Produkt aus der statischen Druckdifferenz des Ventilators und seiner Förderleistung:

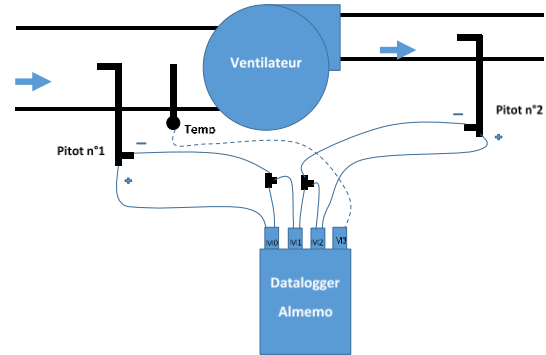
$$P_{\text{aer}} = \Delta p_{\text{st}} * Q_v$$

### 8.2 Messprinzip bei unterschiedlichen Ansaug- und Ausblasquerschnitten

Bei unterschiedlichen Ansaug- und Druckquerschnitten heben sich die dynamischen Druckterme in der Druckdifferenzformel nicht mehr auf (siehe Anlage 1). Sie müssen dann in der Berechnung beibehalten werden.



Messung mit einem Pitotrohr



mit zwei Pitotrohren

**Abb. 4** Staurohrmessung in verschiedenen Abschnitten ( $s_1, s_2$ ).

Es sind zwei Messmethoden möglich:

- Messung mit einem Pitot-Rohr :
  - Verfügbare Größen während der Messung: Ansauggeschwindigkeit ( $v_1$ ), dynamischer Ansaugdruck ( $p_{dyn1}$ ), statische Druckdifferenz ( $\Delta p_{stat}$ ) zwischen Ansaugung und Druck.
  - Zu berechnende Variablen: dynamischer Druck am Austritt ( $p_{dyn2}$ ), berechnet aus der Strömungsgeschwindigkeit am Eintritt

$$Q_v = Q_{v1} = Q_{v2} = s_1 v_1 = s_2 v_2 \rightarrow p_{dyn2} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot [(s_1/s_2) \cdot v_1]^2$$

Der Gesamtdruckunterschied kann dann wie folgt berechnet werden:

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_{stat} + \Delta p_{dyn} = \Delta p_{stat} + (p_{dyn2} - p_{dyn1})$$

- Messung mit zwei Staurohren: Die Differenz der Gesamtdruckverluste wird direkt aus den von den Staurohren gemessenen statischen und dynamischen Verlusten ermittelt.

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_{stat} + \Delta p_{dyn} = (p_{stat2} - p_{stat1}) + (p_{dyn2} - p_{dyn1})$$

Die Berechnung der Luftleistung des Ventilators ist das Produkt aus der Differenz zwischen den Gesamtverlusten des Ventilators und seiner Luftleistung:

$$P_{aer} = \Delta p_{tot} \cdot Q_v$$

Hinweis: Wenn die Druckwerte bei einer anderen Temperatur gemessen werden als der, für die die Ventilator Kennlinie erstellt wurde ( $20^\circ\text{C}$ ), müssen sie korrigiert werden (siehe Anhang 2), um diese Werte in die Kennlinie einzeichnen zu können.

## 9. Korrekturen

### 9.1 Korrektur der Geschwindigkeitsmessung je nach Art des Staurohrs

Zur Erinnerung,

$$V = \alpha * \sqrt{\frac{2 * P_{dynamique}}{\rho}}$$

$\rho$  : rho (hängt von der Temperatur und dem Druck der Flüssigkeit ab)

$\alpha$  Pitotrohr-Faktor

- L-förmiges Staurohr :  $\alpha = 1$
- Rechtes Pitotrohr :  $\alpha = 0,67$

## 10. Einige häufige Schwierigkeiten und Fehler

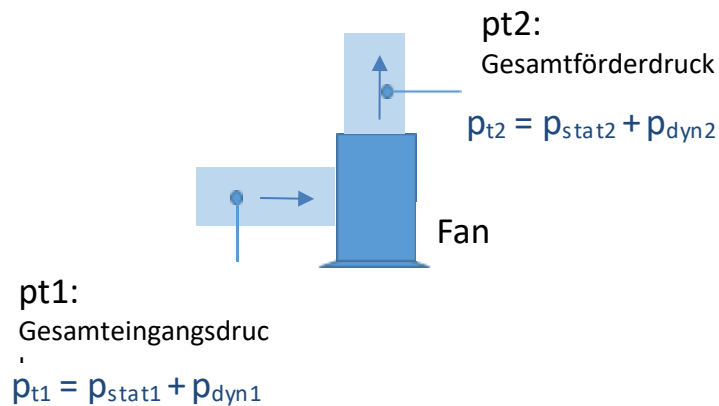
In diesem Abschnitt werden einige Beispiele für typische Schwierigkeiten und Fehler aufgeführt, die bei der Durchflussmessung an einem Ventilator auftreten können.

| Schwierigkeiten oder Fehler            | Vorausschauende oder korrigierende Maßnahmen  |
|--|---|
| Falsche Geschwindigkeitswerte          | Suchen Sie eine Stelle, die frei von Störungen ist (plötzliche Querschnittsänderungen, Kurven usw.).  |
| Unsymmetrisches Geschwindigkeitsprofil | Prüfen Sie den nachstehenden Punkt. Ansonsten : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Im Falle eines Pitotrohrs muss es mit dem Luftstrom ausgerichtet bleiben (maximal 10°).</li> <li>• Bei einem Hitzdrahtanemometer ist darauf zu achten, dass der Draht senkrecht zur Luftströmung angebracht wird.</li> </ul> |
| Verstopftes Pitotrohr                  | Überprüfen Sie das Pitotrohr vor der Verwendung und reinigen Sie es gegebenenfalls.   |
| Untiefe Messstelle                     | Bevorzugen Sie Pitotrohrmessungen (vermeiden Sie Hitzdraht-Anemometer). Eine Messung in der Nähe des Einführungslochs der Sonde ist jedoch nicht sehr genau.  |

**Tab. 3** Häufig auftretende Schwierigkeiten oder Fehler.

## Anhang 1: Druckdifferenztheorie

Ein Ventilator und die Drücke sind wie folgt definiert:



**Abb.1** Lüfterdiagramm

Ein Gebläse erzeugt eine Erhöhung des Gesamtdrucks. Diese Erhöhung wird wie folgt berechnet:

$$\Delta p_t = p_{t2} - p_{t1} = (p_{stat2} + p_{dyn2}) - (p_{stat1} + p_{dyn1}) = (p_{stat2} - p_{stat1}) + (p_{dyn2} - p_{dyn1}) = \Delta p_{stat} + \Delta p_{dyn}$$

Es gibt zwei mögliche Fälle:

a) Identischer Rohrquerschnitt an Saug- und Druckseite

Die Luftgeschwindigkeit bleibt unverändert. Der dynamische Druck bleibt unverändert: Die dynamische Druckdifferenz wird aufgehoben ( $p_{dyn2} = p_{dyn1}$ ).

Die Gesamtdruckdifferenz ist also die statische Druckdifferenz:

$$\Delta p_t = (p_{stat2} - p_{stat1})$$

Normalerweise mit einem negativen Wert für  $p_{stat1}$  und einem positiven Wert für  $p_{stat2}$  relativ zu einem Referenzdruck (z. B.  $p_{atm}$ ).

Die gemessenen Werte der statischen Drücke können daher direkt für die Berechnung der Gesamtdruckdifferenz ( $\Delta p_t$ ) herangezogen werden, die dann für die Berechnung der Luftförderleistung verwendet wird.

b) Der Querschnitt der Rohre ist an der Ansaug- und an der Druckseite unterschiedlich, die Luftgeschwindigkeit ist unterschiedlich. Der dynamische Druck ist also nicht konstant, und es ist notwendig, mit dem Gesamtdruckunterschied zu arbeiten.

$$\Delta p_t = \Delta p_{stat} + \Delta p_{dyn} = (p_{stat2} - p_{stat1}) + (p_{dyn2} - p_{dyn1})$$

## Anlage 2: Druckkorrektur an den Kennlinien

Werden die Druckwerte bei einer anderen Temperatur gemessen als der, für die die Ventilator Kennlinie erstellt wurde (20°C), ist es notwendig, diese zu korrigieren, um sie in die Kennlinie übertragen zu können.

Es ist notwendig, die Luftdichten am Ein- und Austritt zu berechnen. Dazu müssen die Lufttemperatur an diesen beiden Stellen und der atmosphärische Druck bekannt sein.

Was die Temperatur anbelangt, so lässt sich der durch den Ventilator verursachte Temperaturanstieg grob abschätzen. Betrachtet man beispielsweise gemessene  $\Delta p_t$ -Werte von 3600 Pa und einen Ventilatorwirkungsgrad von etwa 50 %, so wird ein  $\Delta T$  von etwa 6 °C<sup>1</sup> erreicht, was nicht sehr wichtig ist.

Nach dem gleichen Beispiel ergeben sich für die Dichten von Luft die folgenden Ausdrücke:

$$\rho_1 = (p_{atm} - p_{stat1}) / R \cdot (273,15 + T_1)$$

$$\rho_2 = (p_{atm} + p_{stat2}) / R \cdot (273,15 + T_2)$$

Annahmen:

$$p_{atm} = 100'000 \text{ Pa}; R = 287 \text{ J/kg K}$$

Für eine Situation mit einer relativ hohen Prozesslufttemperatur (200°C) ergibt sich zum Beispiel :

$$T_1 = 210^\circ\text{C}, T_2 = 216^\circ\text{C} (\Delta T \text{ von } 6^\circ\text{C} \text{ vom Lüfter})$$

Wenn wir also das  $\Delta p_t$  direkt durch die Eingänge von  $p_{stat2}$  und  $p_{stat1}$  messen und einen Messwert des  $\Delta p_{tmes}$  von 3600 Pa erhalten, nehmen wir an, dass  $p_{stat1}$  -1800 Pa und  $p_{stat2}$  +1800 Pa ist. Wir haben dann die Dichtewerte am Einlass und am Auslass:

- Beim Ansaugen:  $\rho_1 = (100000 - 1800) / (287 \cdot (273,15 + 210)) = 0.708$
- Bei der Entlassung :  $\rho_2 = (100000 + 1800) / (287 \cdot (273,15 + 216)) = 0.725$

*Hinweis: Diese Werte sind Näherungswerte. Die Lieferanten weisen darauf hin, dass die Änderung der Dichte unterhalb eines  $\Delta p_t$  von 2500 Pa nicht signifikant ist.*

Auf dieser Grundlage werden die auf 20°C bezogenen Größen über das Verhältnis der Dichten bestimmt:

- Bei der Entladung würde  $p_{stat2}$  bei 20°C betragen:  

$$p_{stat2-20} = p_{stat2-mes} \cdot \rho_2 / \rho_1 = 1800 \cdot 0,725 / 0,708 = 1863 \text{ Pa}$$
- Bei der Aspiration würde  $p_{stat1}$  bei 20°C betragen:  

$$p_{stat1-20} = p_{stat1-mes} \cdot \rho_1 / \rho_2 = -1800 \cdot 0,708 / 0,725 = -1750 \text{ Pa}$$

Die Druckdifferenz bei 20°C würde also betragen:

$$\Delta p_{t-20} = 1863 - (-1750) = 3613 \text{ Pa}$$

Es wird deutlich, dass die Druckkorrektur in diesem Fall sehr wichtig ist (3613 Pa bei 20°C gegenüber 3600 Pa gemessen bei 200°C). Der Anteil des Temperaturunterschieds zwischen Einlass und Auslass bleibt dagegen sehr gering (2,5 %). In diesem Sinne ist bei einem Standardventilator (70 %

<sup>1</sup> Quelle: Abb. PB19, Handbuch Radialventilatoren Liste 17\_1, Reitz Gruppe

### Verfahren: Vorbereitung und Durchflussmessungen an einem Ventilator

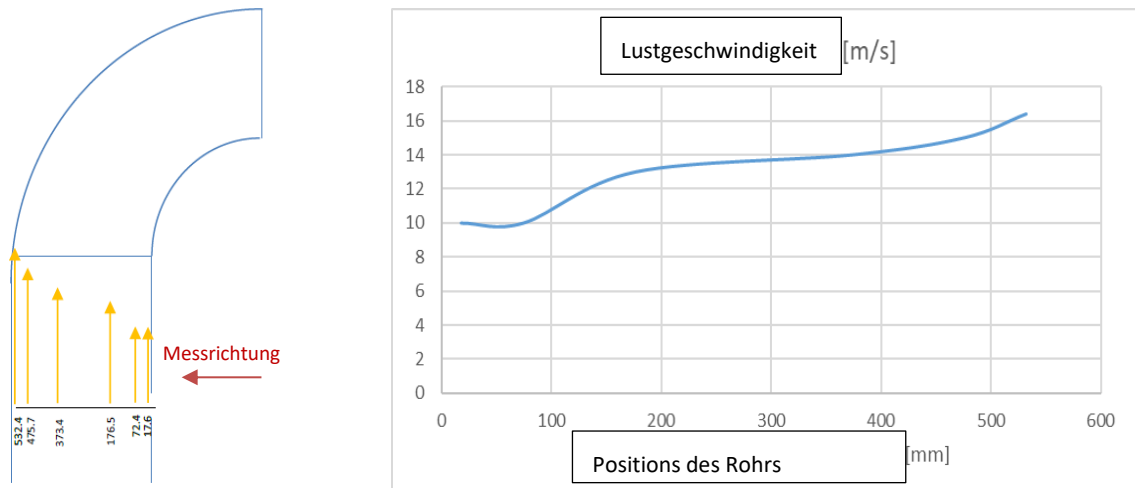
---

Wirkungsgrad) die durch den Ventilator verursachte Erwärmung erst ab einer Gesamtdruckdifferenz von etwa 3000 Pa sinnvoll.

Abschließend **muss für eine Übertragung auf die (für eine Temperatur von 20°C ermittelten) Kennlinien die tatsächliche Lufttemperatur berücksichtigt werden.**

**Anlage 3: Geschwindigkeitsmessung in der Nähe einer Kurve**

In diesem Anhang wird ein Beispielfall vorgestellt, bei dem das Geschwindigkeitsprofil in einem Rohr mit kreisförmigem Querschnitt in der Nähe eines Bogens gemessen werden musste. Die Mindestlänge von 5D (siehe Kapitel 4) stromabwärts des Messpunktes konnte nicht eingehalten werden, so dass die Störung (Biegung) in einem Abstand von etwa 1,5D liegt.



**Abb. 7:** Geschwindigkeitsprofil.

Wie in Abb. 7 sehen ist, ist die Luftgeschwindigkeit an der äußeren Ecke der Biegung (am weitesten entfernte Sondenposition) höher. Das Ergebnis ist ein asymmetrisches Geschwindigkeitsprofil, bei dem die Gewichtungsfaktoren ( $k_i = 1$ ) nicht unbedingt angemessen sind. Bei der Berechnung der durchschnittlichen Fließgeschwindigkeit kommt es daher zu einem kleinen Fehler.

In diesem Fall sollten die gleichen Messungen in mindestens 4 Richtungen für den gleichen Messabschnitt wiederholt werden. Der Winkel zwischen den beiden Richtungen muss gleich sein und es müssen mindestens 2 senkrechte Richtungen zwischen ihnen liegen.

Die Fließgeschwindigkeit ist das arithmetische Mittel aller Geschwindigkeiten an jeder Position, wodurch die Auswirkung der Störung auf den resultierenden Wert abgeschwächt werden kann.