

Durchflussmessungen an einem Ventilator



Inhaltsverzeichnis

1. Einleitende Bemerkungen	2
2. Vorbereiten der Messungen	3
3. Typ der Messsonde	4
4. Positionierung der Durchflussmessstrecke	6
5. Anzahl der Messpunkte	7
6. Berechnung der Geschwindigkeit	8
7. Messgenauigkeit	9
8. Installationsschema des Geräts und Messungen mit Prandtlrohr	10
9. Korrekturen	13
10. Häufige Schwierigkeiten und Fehler	13
Anhang 1 – Druckdifferenztheorie	14
Anhang 2 – Druckkorrektur an den Kennlinien	15
Anhang 3 – Geschwindigkeitsmessung in der Nähe einer Kurve	17

1. Einleitende Bemerkungen

Das hier vorgestellte Vorgehen versteht sich als Hilfestellung für die Durchführung von Strömungsmessungen an einem Ventilator mit einem Prandtlrohr.

Dieses Dokument beinhaltet keine vollständige Beschreibung der verschiedenen Methoden zur Durchflussmessung an einem Ventilator.

2. Vorbereiten der Messungen

Beginnen Sie 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 festgelegt werden:

Thema	Aufgaben
Umfang der Analyse, System und theoretische Vorbereitung	– Definieren Sie den Messzeitraum (Beginn und Dauer, Häufigkeit der Abtastfrequenz), um alle Situationen abzudecken.
Praktische Vorbereitung (Messverantwortliche/r)	– Legen Sie die Positionen der Entnahmestellen für die Druckmessungen fest – Bestimmen Sie, ob das System abgeschaltet werden soll (z. B. wenn die Lufttemperatur erhöht und für die messende Person gefährlich ist – beachten Sie, dass dieses Vorgehen nicht geeignet ist für Messungen giftiger oder explosiver Gase). – Falls nötig: Bereiten Sie die verschiedenen Messgeräte (eigene und jene des Betreibers) für die Synchronisation der Uhren und der Abtastfrequenz vor.
Praktische Vorbereitung (Betreiber)	– Anlagen für den Einbau der verschiedenen Sensoren (Manometeranschluss oder Entlüftung für Pumpen, Bohrungen und Nippel für Ventilatoren) vorbereiten und anpassen

3. Typ der Messsonde

Es können verschiedene Arten von Sonden verwendet werden. Die folgende Aufzählung ist nicht abschliessend.

3.1 Prandtlrohr

Das Prandtl- oder Staurohr ist hier schematisch abgebildet:

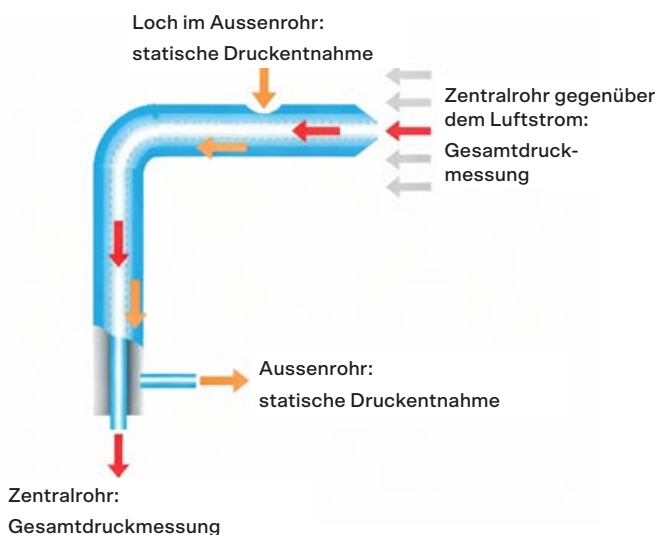


Abb. 1: Schematische Darstellung eines Staurohrs vom Typ L

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

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

Am Prandtlrohr werden der Gesamtdruck und der statische Druck der Flüssigkeit gemessen. Diese beiden Grössen ermöglichen die Berechnung des dynamischen Drucks nach der folgenden Gleichung:

$$P_T = P_d + P_s$$

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

3.2 Hitzdrahtanemometer

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



Abb. 2: Hitzdrahtanemometer und Detailaufnahme der Sonde.

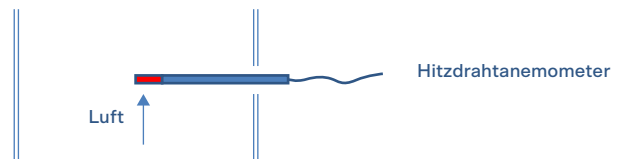


Abb. 3: Schematische Darstellung eines Hitzdrahtanemometers.

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. Positionierung der Durchflussmessstrecke

Der gewählte Messabschnitt muss auf einer geraden Linie, senkrecht zur Rohrachse liegen. Im Messabschnitt müssen 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 Abstand stromaufwärts mehr als 10 und stromabwärts mehr als 5 Rohrdurchmesser betragen. Ist dies nicht möglich, versuchen Sie 80–90 % dieser Abstände einzuhalten.

5. Anzahl der Messpunkte

Die Anzahl der Messpunkte sollte ausreichen, um die Verteilung der Geschwindigkeiten zufriedenstellend zu ermitteln.

Runde Querschnitte:

Es sind mindestens 6 Messpunkte nötig. Sie müssen symmetrisch entlang des Durchmessers der Messstrecke, d. h. in nur einer Messrichtung, verteilt sein (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 Anhang 3). In diesem Fall sind die gleichen

Messungen in mindestens 4 Richtungen für denselben Messabschnitt zu wiederholen. Der Winkel zwischen den einzelnen Messrichtungen muss gleich sein und mindestens zwei Richtungen müssen senkrecht zueinander stehen.

Rechteckige Querschnitte:

Es sind mindestens 26 Messpunkte nötig. Ihre Lage wird durch die Schnittpunkte von mindestens fünf Geraden bestimmt, die parallel zu jeder Rohrwand verlaufen (Abb. 5).

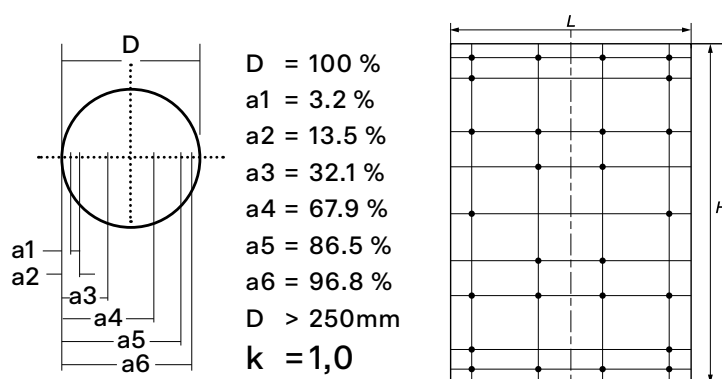


Abb. 5: Positionierung der Punkte: kreisförmige Profil (links) und rechteckiges Profil (rechts).

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 Gewichtungsfaktoren (k_i) für rechteckige Querschnitte.

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 Prandtlrohrs an den verschiedenen Messpunkten gemessen werden. Darüber hinaus ist die Dichte der Flüssigkeit unter den Messbedingungen zu bestimmen.

$$\rho = \rho_0 \times \frac{273,15}{273,15 + T} \times \frac{P + P_{atm}}{P_{atm}}$$

Wobei:

P: Gesamtdruck (statisch + dynamisch)

P_{atm}: Atmosphärischer Druck

T: Temperatur (°C)

ρ₀ = 1,293 kg/m³ (Dichte von Luft bei T=0°C und P_{atm}=1bar)

Die lokale Fließgeschwindigkeit kann dann an jedem Messpunkt mit der folgenden Formel berechnet werden:

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

Die durchschnittliche Fließgeschwindigkeit wird je nach Profil des Abschnitts arithmetisch berechnet:

- Runder Querschnitt: Die durchschnittliche Fließgeschwindigkeit ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel der lokalen Geschwindigkeiten.
- Rechteckiger Querschnitt: Die Strömungsgeschwindigkeit ergibt sich aus:

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

Wobei:

U: mittlere Fließgeschwindigkeit

v_i: an der Position i gemessene Geschwindigkeit

k_i: Gewichtungsfaktor für Position i

Σ k_i = 96

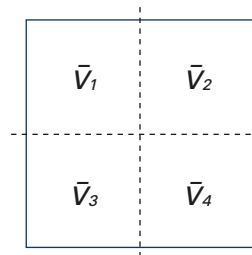
Der Volumendurchfluss (in m³/s) ist das Produkt der Querschnittsfläche (in m²) und der mittleren Fließgeschwindigkeit (m/s).

7. Messgenauigkeit

Die Genauigkeit der Messung hängt hauptsächlich von der Dimension der Messstrecke, der Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit, der Form des Geschwindigkeitsprofils und der Anzahl der Messpunkte ab. 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 Geschwindigkeiten in den Vierteln der Gesamtstrecke berechnet, d.h.:

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



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

8. Installationsschema des Geräts und Messungen mit Prandtlrohr

Die Durchflussmessung mit Prandtlrohr ermöglicht auch die Bestimmung des Ventilatorsdrucks. So kann der Ventilator vollständig beschrieben und seine Luftleistung bestimmt werden.

Bringen Sie das Staurohr vorzugsweise auf der Saugseite des Ventilators an, da hier der Flüssigkeitsstrom normalerweise weniger gestört ist als auf der Druckseite.

Verschiedene Einrichtungsarten für diese Durchfluss- und Druckbestimmung sind unten dargestellt.

8.1 Messen bei identischer Ein- und Auslassstrecke

Die nachstehende Darstellung zeigt die Verwendung eines Prandtlrohrs und eines Druckabgriffs, um die Eigenschaften eines Ventilators mit identischem Ein- und Auslassquerschnitt vollständig zu beschreiben.

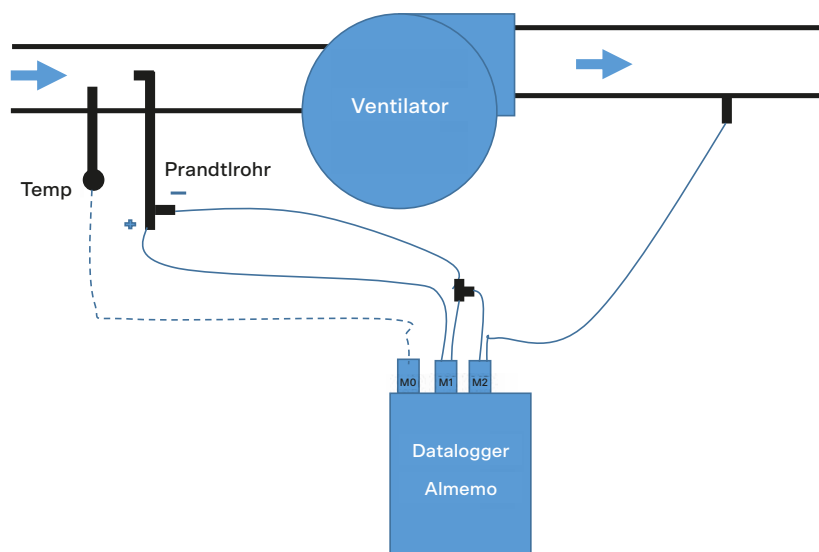


Abb. 6: Verwendung des Staurohrs (Durchfluss und Druckdifferenz) bei identischen Querschnitten – am Beispiel eines Almemo-Dataloggers.

Die Terme des dynamischen Drucks sind identisch und heben sich in der Formel für die Gesamtdruckdifferenz auf (siehe Anhang 1). Übrig bleiben nur die Terme für den statischen Druck. Mit der obigen Anordnung werden die statischen Drücke am Einlass (über einen der Prandtlrohr-Auslässe) und am Auslass

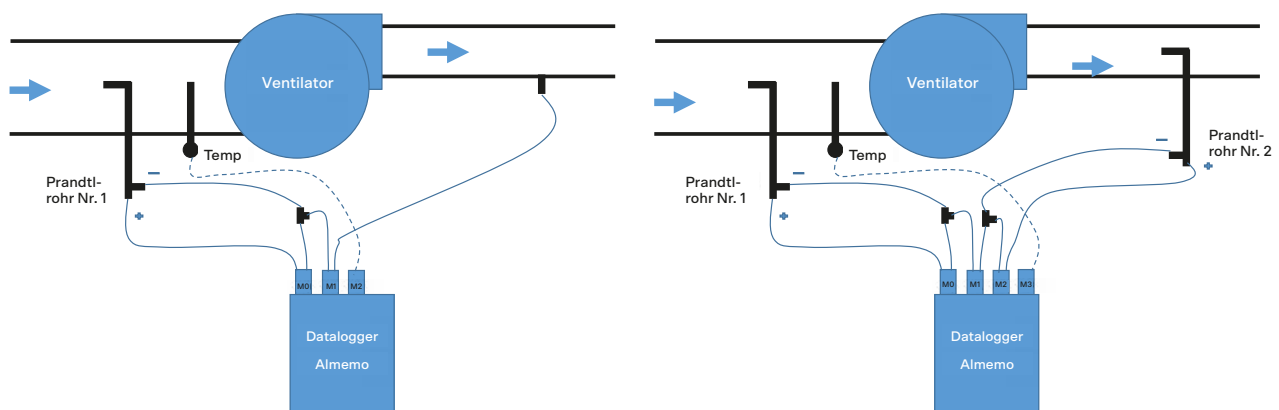
(über einen speziellen Druckaufnehmer) sowie die Luftgeschwindigkeit aufgezeichnet. Dabei wird das Rohr an jener Stelle platziert, an der die Geschwindigkeit dem Durchschnitt des Querschnittsgeschwindigkeitsprofils entspricht). Der Durchfluss ist dann das Produkt aus der Querschnittsfläche und der Geschwindigkeit.

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 Messen bei unterschiedlichen Ein- und Auslassstrecken

Bei unterschiedlichen Querschnitten für Ein- und Auslass heben sich die dynamischen Druckterme in der Formel für die Druckdifferenz nicht mehr auf (siehe Anhang 1). Sie müssen dann in der Berechnung beibehalten werden.



Messung mit einem Prandtlrohr

Messung mit zwei Prandtlrohren

Abb. 4 Staurohrmessung bei unterschiedlichen Querschnitten (s1, s2).

Es sind zwei Messmethoden möglich:

Messung mit einem Prandtlrohr:

Während der Messung sind folgende Größen verfügbar: Ansauggeschwindigkeit (v_1), dynamischer Ansaugdruck (p_{dyn1}), statische Druckdifferenz (Δp_{stat}) zwischen Ein- und Auslass.

Zu berechnende Variablen: dynamischer Druck am Austritt (p_{dyn2}), berechnet aus der Strömungsgeschwindigkeit am Eintritt

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

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 Prandtlrohren:

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

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

Werden die Druckwerte bei einer anderen Temperatur gemessen als jener, bei der die Ventilator Kennlinie erstellt wurde (20°C), müssen diese Werte korrigiert werden, um sie in die Kennlinie übertragen zu können (siehe Anhang 2).

9. Korrekturen

9.1 Korrektur der Geschwindigkeitsmessung je nach Art des Staurohrs

Zur Erinnerung:
$$V = \alpha \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_{\text{dynamisch}}}{\rho}}$$

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

α : Prandtlrohr-Faktor

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

10. Häufige Schwierigkeiten und Fehler

Nachfolgend sind einige Beispiele für typische Schwierigkeiten und Fehler aufgeführt, die bei der Durchflussmessung an einem Ventilator auftreten können.

Schwierigkeit oder Fehler	Vorausschauende Massnahmen oder Korrekturen
Falsche Geschwindigkeitswerte	Suchen Sie eine Stelle, die frei von Störungen ist (d.h. ohne plötzliche Querschnittsänderungen, Kurven usw.).
Unsymmetrisches Geschwindigkeitsprofil	Prüfen Sie den nächsten Punkt. Ansonsten: – Falls Sie ein Prandtlrohr verwenden, achten Sie darauf, dass es am Luftstrom ausgerichtet bleibt (maximal 10° Abweichung). – Bei einem Hitzdrahtanemometer ist darauf zu achten, dass der Draht senkrecht zur Luftströmung angebracht wird.
Verstopftes Prandtlrohr	Überprüfen Sie das Prandtlrohr vor der Verwendung und reinigen Sie es gegebenenfalls.
Untiefe Messstelle	Verwenden Sie ein Prandtlrohr und kein Hitzdrahtanemometer. Beachten Sie jedoch, dass eine Messung in der Nähe des Einführungslochs der Sonde keine genauen Resultate liefert.

Anhang 1

Druckdifferenztheorie

Ein Ventilator und die Drucke sind wie folgt definiert:

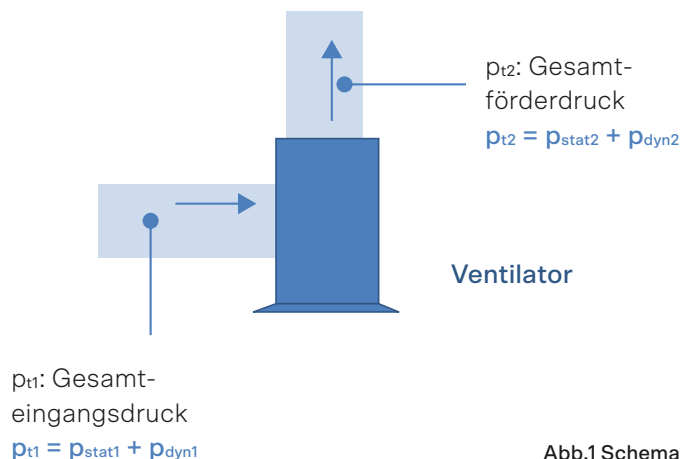


Abb.1 Schema eines Ventilators

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) Der Rohrquerschnitt ist bei Ein- und Auslass identisch

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

Die Gesamtdruckdifferenz entspricht also der statischen Druckdifferenz:

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

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

Die gemessenen Werte der statischen Drucke können daher direkt für die Berechnung der Gesamtdruckdifferenz (Δp_t), herangezogen werden. Diese wird dann für die Berechnung der Luftförderleistung verwendet.

b) Der Rohrquerschnitt ist bei Ein- und Auslass unterschiedlich

Die Luftgeschwindigkeit ist beim Einlass und beim Auslass unterschiedlich, der dynamische Druck somit nicht konstant. Es ist deshalb notwendig, mit dem Gesamtdruckunterschied zu arbeiten.

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

Anhang 2

Druckkorrektur an den Kennlinien

Werden die Druckwerte bei einer anderen Temperatur gemessen als jener, bei der die Ventilator Kennlinie erstellt wurde (20°C), müssen diese Werte korrigiert werden, um sie in die Kennlinie übertragen zu können.

Es ist notwendig, die Luftdichte am Ein- und Auslass 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. Beispielsweise wird bei gemessenen Δp_t -Werten von 3600 Pa und einem Ventilatorwirkungsgrad von etwa 50% ein ΔT von etwa 6°C¹ erreicht, was vernachlässigbar ist.

Nach dem gleichen Beispiel ergibt sich für die Luftdichte:

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

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

Annahmen:

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

Für eine Situation mit einer relativ hohen Prozesslufttemperatur (210°C) ergibt sich zum Beispiel:

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

Messen wir Δp_t direkt durch die Eingänge von p_{stat2} und p_{stat1} und erhalten einen Messwert Δp_{tmes} von 3600 Pa, und unter der Annahme, dass p_{stat1} -1800 Pa und p_{stat2} +1800 Pa betragen, haben wir folgende Dichtewerte am Einlass und am Auslass:

$$\text{Einlass: } \rho_1 = (100\,000 - 1800) / (287 \cdot (273,15 + 210)) = 0.708$$

$$\text{Auslass: } \rho_2 = (100\,000 + 1800) / (287 \cdot (273,15 + 216)) = 0.725$$

Diese Werte sind Näherungswerte. Die Lieferanten weisen darauf hin, dass die Änderung der Dichte unterhalb eines Δp_t von 2500 Pa nicht signifikant ist.

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

Am Auslass beträgt $p_{\text{stat}2}$ bei 20°C:

$$p_{\text{stat}2-20} = p_{\text{stat}2-\text{mes}} \cdot 1,205/0,725 = 1800 \cdot 1,205/0,725 = 2991 \text{ Pa}$$

Am Einlass beträgt $p_{\text{stat}1}$ bei 20°C:

$$p_{\text{stat}1-20} = p_{\text{stat}1-\text{mes}} \cdot 1,205/0,708 = -1800 \cdot 1,205/0,708 = -3063 \text{ Pa}$$

Die Druckdifferenz bei 20°C beträgt somit:

$$\Delta p_{t-20} = 2991 - (-3063) = 6054 \text{ Pa}$$

Es wird deutlich, dass die Druckkorrektur in diesem Fall sehr wichtig ist (6054 Pa bei 20°C gegenüber 3600 Pa gemessen bei 210°C). Der Temperaturunterschied zwischen Ein- und Auslass macht dagegen sehr wenig aus (2,5 %). Deshalb ist bei einem Standardventilator (mit einem Wirkungsgrad von 70%) die durch den Ventilator verursachte Erwärmung erst ab einer Gesamtdruckdifferenz von etwa 3000 Pa relevant.

Fazit: Für eine Übertragung auf die Kennlinien, die für eine Temperatur von 20°C ermittelt wurden, ist die tatsächliche Lufttemperatur zu berücksichtigen.

Anhang 3

Geschwindigkeitsmessung in der Nähe einer Kurve

In diesem Anhang wird ein Fall vorgestellt, bei dem das Geschwindigkeitsprofil in einem Rohr mit kreisförmigem Querschnitt in der Nähe einer Biegung gemessen werden musste. Die Störung (Biegung) liegt in einem Abstand von etwa $1,5D$ (das Anderthalbfache des Rohrdurchmessers). Somit konnte stromabwärts des Messpunktes der Mindestabstand von $5D$ (fünffacher Durchmesser – siehe Kapitel 4) nicht eingehalten werden.

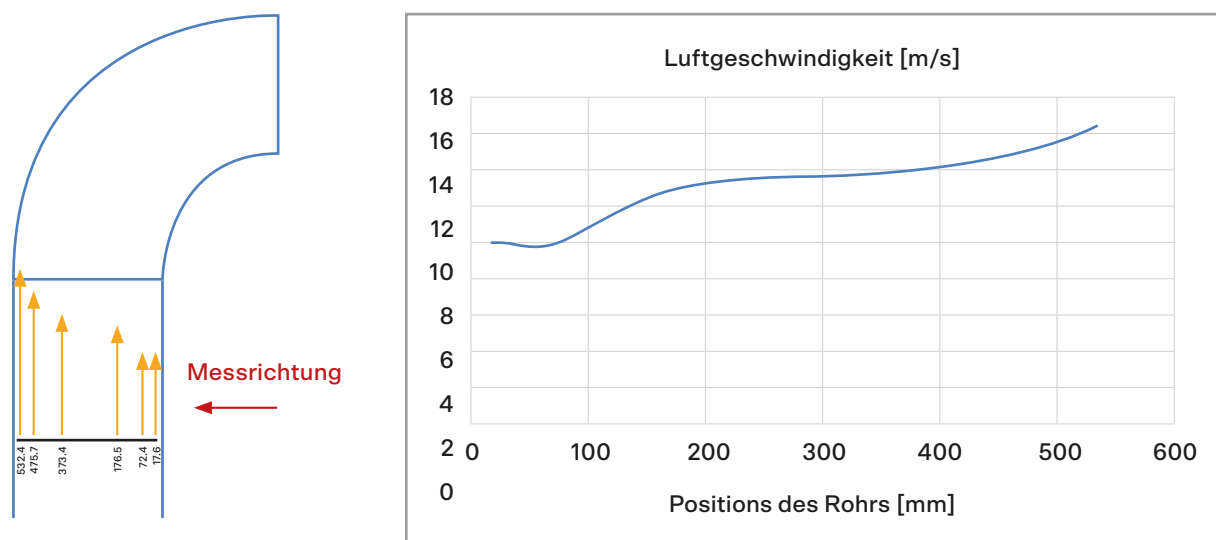


Abb. 7: Geschwindigkeitsprofil

Wie in Abb. 7 zu sehen, ist die Luftgeschwindigkeit an der Aussenseite der Biegung (bei der am weitesten entfernten Sondenposition) höher. Es ergibt sich ein asymmetrisches Geschwindigkeitsprofil, bei dem die Anwendung von Gewichtungsfaktoren ($k_i = 1$) nicht unbedingt angemessen ist. Bei der Berechnung der durchschnittlichen Fließgeschwindigkeit kommt es daher zu einem kleinen Fehler.

Die Fließgeschwindigkeit wird als arithmetisches Mittel aller Geschwindigkeiten an jeder Position berechnet. So kann die Auswirkung der Störung auf den resultierenden Wert abgeschwächt werden.

In diesem Fall sollten die Messungen in einem Messabschnitt in mindestens 4 Richtungen wiederholt werden. Der Winkel zwischen den einzelnen Messrichtungen muss gleich sein und mindestens zwei Richtungen müssen senkrecht zueinander stehen.