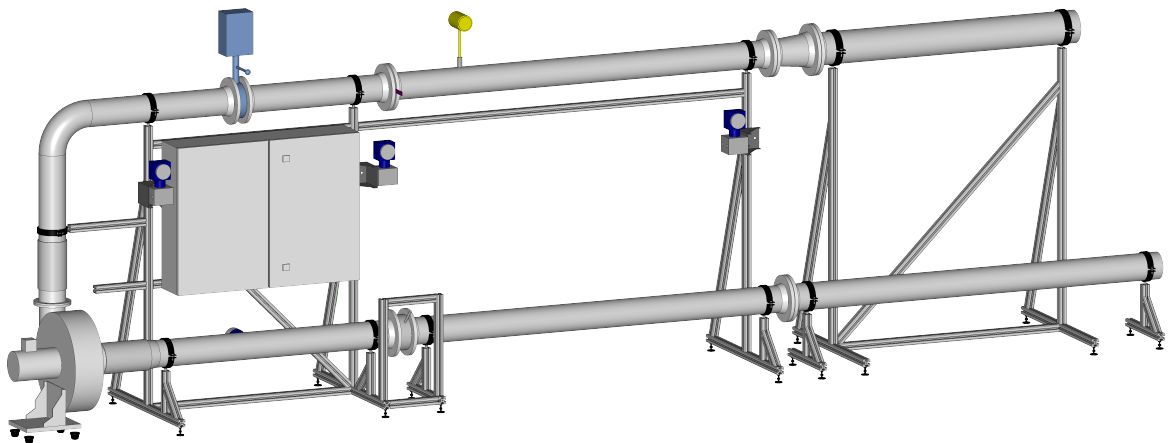


Labor Kraft- und Arbeitsmaschinen

Versuchsbeschreibung Radialventilator

Jens Glembin, Peter Treffinger



Symbole

Lateinische Buchstaben

A	Querschnittsfläche	m^2
C	Durchflusskoeffizient	-
c	Strömungsgeschwindigkeit	$m\,s^{-1}$
D	Durchmesser	m
f	Thermokoeffizient	$V\,K^{-1}$
h_V	Druckverlustterm	$m^2\,s^{-2}$
k	Rohrrauigkeit	m
l	Rohrlänge	m
$\dot{m}$	Massenstrom	$kg\,s^{-1}$
n	Drehzahl	s^{-1}
P	Leistung	W
p	Druck	Pa
r	Radius	m
Re	Reynoldszahl	-
T	Temperatur	K
U	Spannung	V
u	Umfangsgeschwindigkeit	$m\,s^{-1}$
$\dot{V}$	Volumenstrom	$m^3\,s^{-1}$

Griechische Buchstaben

β	Durchmesserverhältnis	
ϵ	Relative Rauigkeit	
ϵ_N	Expansionszahl	
γ	Klappenstellung	
λ	Rohrreibungsbeiwert	
ψ	Druckzahl	
ρ	Dichte	$kg\,m^{-3}$
ν	Kinematische Viskosität	$m^2\,s^{-1}$
φ	Volumenzahl	
ζ	Druckverlustbeiwert	

Indizes

A	Austritt
D	Dynamisch
E	Eintritt
FU	Frequenzumrichter
G	Gesamt
Hyd	Hydraulisch
I	Innen
La	Laufgrad
S	Statisch
V	Verlust

Inhalt

Symbole	i
1 Versuchsziel	1
2 Theoretische Grundlagen	1
2.1 Arbeitsmaschine Ventilator	1
2.2 Anlagenkennlinie	3
2.3 Messmethoden	4
2.3.1 Temperaturmessung mit Thermoelementen	4
2.3.2 Differenzdruckmessung mit Prozessmembranen	5
2.3.3 Durchflussmessung mit Normdüsen	6
2.3.4 Thermische Massedurchflussmessung	7
2.3.5 Norm- und Betriebsvolumenstrom von Gasen	8
3 Versuchsaufbau	9
4 Versuchsdurchführung	10
4.1 Versuchsvorbereitung	10
4.2 Versuchsdurchführung	10
4.3 Versuchsauswertung	12
Literaturverzeichnis	14
5 Anhang	15
5.1 Radialventilator Details	15
5.2 Rohrrauigkeiten	16
5.3 Rohrreibungsbeiwerte	17
5.4 Druckverlustbeiwert Bogen	19
5.5 Diagramme	20

1 Versuchsziel

Der Versuchsstand stellt exemplarisch einen Teil einer Lüftungsanlage mit einem Radialventilator dar. Im Versuch werden Kennlinien des Ventilators bei unterschiedlichen Drehzahlen sowie Anlagenkennlinien bei verschiedenen Stellungen einer Drosselklappe aufgenommen (siehe Abbildung 2.2). Mithilfe der Messergebnisse können die grundlegenden Zusammenhänge von Ventilator- und Anlagenkennlinien diskutiert werden. Daraus können Rückschlüsse gewonnen werden, wie der Betriebspunkt einer Anlage beeinflusst werden kann und auf welcher Grundlage in der Anlagenplanung ein Ventilator ausgewählt wird. Darüber hinaus ermöglicht der Versuchsstand, Sensoren zur Messung von Druck, Temperatur und Volumenstrom sowie die komplette Messkette von Messwertaufnehmer über Messdatenerfassung bis zur Messwertverarbeitung und -darstellung kennen zu lernen.

Die Studierenden können das Kennfeld des Ventilators im Vergleich zur Eulerschen Gerade analysieren und Ähnlichkeitsgesetze zur Umrechnung von Kennlinien zwischen unterschiedlichen Drehzahlen anwenden.

2 Theoretische Grundlagen

Als wesentliche theoretische Grundlagen für den Versuch werden die wichtigsten Eigenschaften von Ventilatoren zusammengefasst und die Schritte zur Berechnung einer Anlagenkennlinie erläutert. Zudem werden die Messmethoden beschrieben, die in dem Versuch zur Anwendung kommen.

2.1 Arbeitsmaschine Ventilator

Ventilatoren sind Strömungsmaschinen zur Förderung von gasförmigen Medien wie Luft. Die Druckerhöhung von Ventilatoren liegt bei maximal 0,3 bar, d. h. bei einem Druckverhältnis von 1,3 (siehe [1]). Bis zu dieser Grenze können, z. B. in der Auslegungsberechnung, Gase häufig als inkompressibel angenommen werden. Bei größeren Druckerhöhungen spricht man von Verdichtern und die Kompressibilität von Gasen kann nicht mehr vernachlässigt werden. Anwendungsschwerpunkte von Ventilatoren sind beispielsweise die Klimatisierung technischer Anlagen, Lager- oder Wohngebäuden oder die Absaugung schadstoffhaltiger Luft, wie zum Beispiel in Lackieranlagen. Die wichtigsten Bauformen sind Radial- (Zentrifugal-) und Axialventilatoren, deren Bezeichnung jeweils der Richtung der Durchströmung im Laufrad entspricht. Die Auswahl eines Ventilators und dessen Leistungsbereich benötigt neben Kenntnissen über die Funktionsweise Wissen über die Ventilator Kennlinie und die zu beachtenden Anlagen-Randbedingungen, ausgedrückt in der Anlagenkennlinie.

Die Ventilator Kennlinie stellt die Abhängigkeit des geförderten Volumenstroms zur Druckerhöhung dar, analog zu einer Pumpenkennlinie bzw. der Kennlinien einer jeden Arbeitsmaschine. Eine solche Kennlinie ist maschinenspezifisch und gilt für eine Drehzahl. Ein Kennfeld besteht aus mehreren Kennlinien bei unterschiedlichen Drehzahlen. Mit einer Drehzahlregelung wird dieser Umstand genutzt, um den Betriebspunkt in einer Anlage zu variieren. Die Druckerhöhung im Ventilator entspricht der Gesamtdruckdifferenz Δp_G zwischen Eintritt (E) und Austritt (A) des Ventilators.

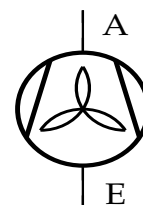


Abbildung 2.1: Definition Eintritt (E) und Austritt (A) am Ventilator

$$\Delta p_G = p_{G,A} - p_{G,E} \quad (2.1)$$

Der Gesamtdruck ist die Summe aus statischem Druck p_s und dynamischen Druck p_d .

$$p_G = p_s + p_d \quad (2.2)$$

Der dynamische Druck berechnet sich näherungsweise mit der Luftdichte ρ und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit c .

$$p_D = \frac{\rho}{2} \cdot c^2 \quad (2.3)$$

Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit bestimmt sich mit Volumenstrom $\dot{V}$ und Rohrquerschnitt A .

$$c = \frac{\dot{V}}{A} \quad (2.4)$$

Ist im stationären Fall der Rohrquerschnitt vor und hinter dem Ventilator identisch und kann die Dichte als konstant angenommen werden, ändern sich Volumenstrom und Strömungsgeschwindigkeit nicht und die Gesamtdruckdifferenz entspricht allein der Differenz der statische Drücke. Die Leistungsdaten und Kennlinien von Ventilatoren werden in Datenblättern angegeben und in der Regel von den Herstellern selbst ermittelt. Dies geschieht an Normprüfständen, deren Aufbau und Messtechnik in der DIN EN 5801 [2] festgelegt sind. Damit Ventilatoren untereinander hinsichtlich ihrer Eignung für bestimmte Einsatzfälle bewertet und verglichen werden können, werden dimensionslose Kennzahlen berechnet. Als Bezugsgröße wird die Umfangsgeschwindigkeit u am Laufradaußendurchmesser D_{La} verwendet, die sich mit der Drehzahl n ergibt:

$$u = \pi \cdot D_{La} \cdot n \quad (2.5)$$

Die Druckzahl ψ setzt die Gesamtdruckerhöhung des Ventilators in Beziehung zu einem fiktiven dynamischen Druck, der mit dieser Umfangsgeschwindigkeit gebildet wird.

$$\psi = \frac{\Delta p_G}{\frac{\rho}{2} \cdot u^2} = \frac{\Delta p_G}{\frac{\rho}{2} \cdot (\pi \cdot D_{La} \cdot n)^2} \quad (2.6)$$

Die Volumenzahl φ , auch Durchfluss- oder Lieferzahl, setzt eine fiktive Meridiangeschwindigkeit mit der Umfangsgeschwindigkeit des Laufrades in Beziehung. Die fiktive Meridiangeschwindigkeit wird mit der Strömungsgeschwindigkeit im Einlass und einem kreisförmigen Querschnitt mit dem Durchmesser des Flügelrads berechnet.¹

$$\varphi = \frac{\frac{\dot{V}}{D_{La}^2 \cdot \frac{\pi}{4}}}{u} = \frac{\dot{V}}{\frac{\pi^2}{4} \cdot D_{La}^3 \cdot n} \quad (2.7)$$

Die Kennlinien von Arbeitsmaschinen werden bei einer bestimmten Drehzahl ermittelt. Ähnlichkeitsgesetze können verwendet werden, um die Kennlinien zwischen verschiedenen Drehzahlen umzurechnen. Direkt proportional zur Drehzahl verhalten sich die Umfangsgeschwindigkeit und damit der Volumenstrom.

$$\frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.8)$$

Die Druckerhöhung verändert sich mit dem Quadrat der Drehzahl.

$$\frac{\Delta p_2}{\Delta p_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \quad (2.9)$$

Die hydraulische Leistung P_{Hyd} steigt mit der dritten Potenz an.

$$\frac{P_{Hyd,2}}{P_{Hyd,1}} = \frac{\dot{V}_2 \cdot \Delta p_2}{\dot{V}_1 \cdot \Delta p_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \quad (2.10)$$

¹Es gibt unterschiedliche Konventionen zur Berechnung der (fiktiven) Meridiangeschwindigkeit.

2.2 Anlagenkennlinie

Bei der Strömung durch Leitungen und anderen Komponenten wie Bögen oder Ventile wirken Reibungskräfte. Dadurch sinkt der statische Druck, was als Druckverlust bezeichnet wird. Die Summe der Druckverluste in allen Komponenten des Systems sowie die Änderung des dynamischen Drucks entspricht dem Gesamtdruckverlust Δp_V . Der Gesamtdruckverlust muss durch die Arbeitsmaschine, z. B. den Ventilator, aufgebracht werden. Im Betriebspunkt der Anlage entspricht der Gesamtdruckverlust des Systems der Druckerhöhung, die von der Arbeitsmaschine erzeugt wird. Der Gesamtdruckverlust der Anlage kann gemessen oder berechnet werden und setzt sich aus den Druckverlusten der Rohrleitungen und den Druckverlusten durch Einbauten wie z. B. Bögen, Klappen und Ventile zusammen.

$$\Delta p_{V,G} = \sum_i \Delta p_{V,Pipe,i} + \sum_i \Delta p_{V,Comp,i} \quad (2.11)$$

In die Berechnung der Druckverluste in den Rohrleitungen fließt neben der Rohrlänge l , der Rohrinwenddurchmesser D_I , die sich aus dem Volumenstrom ergebenden Strömungsgeschwindigkeit sowie der Rohrreibungsbeiwert λ ein (Darcy-Weisbach Gleichung).

$$\Delta p_{V,Pipe} = \lambda \cdot \frac{l}{D_I} \cdot \rho \cdot \frac{c^2}{2} \quad (2.12)$$

Der Rohrreibungsbeiwert λ ist eine dimensionslose Kennzahl, für die es je nach Strömungsform (laminar, turbulent) und Rauigkeit der Rohroberfläche unterschiedliche Bestimmungsgleichungen gibt, die z. T. iterativ zu lösen sind, siehe beispielsweise [3]. Eine wichtige Kennzahl in den Berechnungsgleichungen von λ ist die Reynolds-Zahl Re . Mit der Reynoldszahl kann auch die Strömungsform bestimmt werden. Sie entspricht dem Verhältnis aus dem Produkt Strömungsgeschwindigkeit und einer charakteristische Länge (bei Rundrohren der Innendurchmesser) zur kinematischen Viskosität ν .

$$Re = \frac{c \cdot D_I}{\nu} \quad (2.13)$$

Zur Minimierung des Aufwandes in der Druckverlustberechnung wurden Tabellen und Diagramme entwickelt, aus denen sich die Rohrreibungsbeiwerte oder direkt der spezifische Druckverlust je Meter Rohrleitung ablesen lassen. Neben den Rohrleitungen tragen die Einbauteile zum Druckverlust einer Anlage bei und lassen sich mithilfe der Strömungsgeschwindigkeit und dem Druckverlustbeiwert ζ berechnen.

$$\Delta p_{V,Comp} = \zeta \cdot \rho \cdot \frac{c^2}{2} \quad (2.14)$$

Der Druckverlustbeiwert ist abhängig von der geometrischen Form und den Dimensionen des jeweiligen Bauteils. Für die gebräuchlichsten Formen wie z. B. Bögen oder Abzweigungen existieren allgemeine Berechnungsformeln oder Diagramme. Alternativ geben viele Hersteller für ihre Komponente die Beiwerte an.

Aus den Bestimmungsgleichungen für die Druckverlustberechnung (Gleichungen 2.12 und 2.14) lassen sich Proportionalitäten ableiten, mit denen sich die Änderung des Druckverlustes in Abhängigkeit von Strömungsgeschwindigkeit/Volumenstrom und Rohrleitungsinwenddurchmesser ermitteln lassen.

$$\frac{\Delta p_2}{\Delta p_1} = \left(\frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_{I,2}}{D_{I,1}} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (2.15)$$

Abbildung 2.2 zeigt exemplarisch drei Anlagenkennlinien sowie eine Ventilatorkennlinie. Die Betriebspunkte befinden sich jeweils im Schnittpunkt von Anlagen- und Ventilatorkennlinie. Die Anlagenkennlinien wurden bei unterschiedlichen Stellungen einer eingebauten Drosselklappe aufgenommen, die den Gesamtdruckverlust der Anlage entsprechend beeinflusst.

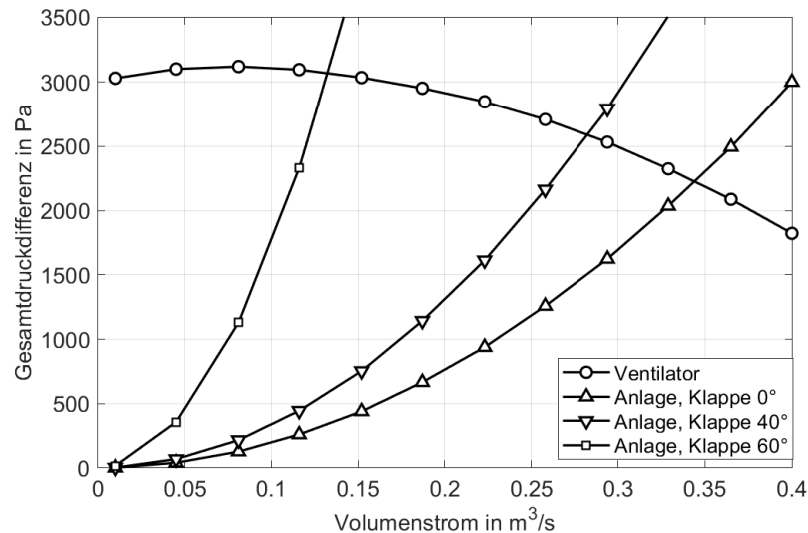


Abbildung 2.2: Ventilator- und Anlagenkennlinien für drei Klappenstellungen.

2.3 Messmethoden

Im Folgenden werden die wesentlichen Gesichtspunkte der am Versuchsstand eingesetzten Messensoren beschrieben. Diese umfasst die Messung von Temperatur, Differenzdruck und Durchfluss.

2.3.1 Temperaturmessung mit Thermoelementen

Thermoelemente zur Messung von Temperaturen basieren auf dem Seebeck-Effekt. Damit wird das Auftreten einer Thermospannung entlang eines metallischen Leiters bezeichnet, die vom Temperaturgefälle und vom Material des Leiters abhängt. Ein Thermoelement besteht aus zwei unterschiedlichen metallischen Leitern, die an der Messstelle zusammengeführt werden. Die entstehende Kontaktspannung ist proportional zur Temperaturdifferenz ΔT zwischen Messstelle und einer Vergleichsstelle. Je nach Werkstoffkombination ergeben sich bei steigender Temperatur(-differenz) höhere oder geringere Spannungswerte, charakterisiert wird dies durch den Thermokoeffizienten f_{AB} der Kombination von Metall A und B. Die Kontaktspannung U_{Kontakt} entspricht

$$U_{\text{Contact}} = f_{AB} \cdot \Delta T. \quad (2.16)$$

Ein Thermoelementsensor besteht aus zwei Drähten unterschiedlicher Materialien, die an der Kontaktstelle verbunden und mit einem Schutzrohr ummantelt sind, siehe Abbildung 2.3.



Abbildung 2.3: Gerades Thermoelement mit Metall-Schutzrohr [4]

Der Thermokoeffizient einer Materialpaarung hängt von den einzelnen Thermokoeffizienten der Einzelmaterialien ab. Diese werden im Rahmen der thermoelektrischen Spannungsreihe in Bezug zu Platin bestimmt und liegen im mV-Bereich. Damit die Thermospannung möglichst hoch ist, werden Werkstoffpaare mit entsprechend großer Differenz im Thermokoeffizienten verwendet. Die normgerechte Bezeichnung eines Thermoelementes nach [5] gibt mit einem Kennbuchstaben an, welche Materialkombination in diesem Sensortyp eingesetzt wird. Beispielsweise steht der Typ K für die Materialpaarung Nickel-Chrom/Nickel, der eine Empfindlichkeit von ca. $40 \mu\text{V}$ je K Temperaturänderung aufweist und im Bereich zwischen -270°C ($-6,5 \text{ mV}$) und 1300°C ($+52,4 \text{ mV}$) verwendet werden kann. Da die Thermospannung vergleichsweise gering ist, ist eine Verstärkung der Spannung im Rahmen der weiteren Signalverarbeitung unabdingbar. Da mit Thermoelementen prinzipiell die Temperaturdifferenz zwischen Kontakt- und Vergleichsstelle gemessen wird, muss zur Bestimmung absoluter Werte, die Temperatur an der Vergleichsstelle addiert werden (Kaltstellenkompensation). Die Temperatur an der Vergleichsstelle muss entweder gemessen oder konstant gehalten werden, z. B. mit einem Thermostaten.

2.3.2 Differenzdruckmessung mit Prozessmembranen

Zur Messung des Differenzdruckes eines Fluides werden an zwei Messstellen, z. B. vor und hinter einem Ventilator oder einer Umwälzpumpe, Messleitungen angebracht, die zum Sensor geführt werden. Dort liegt der jeweilige Druck an einer Prozessmembrane an, die entsprechend des Druckunterschiedes ausgelenkt wird. Der Grad der Auslenkung ist somit das Maß für den anliegenden Differenzdruck. Zur Bestimmung der Auslenkung wird beispielsweise an der Innenseite der Membrane eine bewegliche Elektrode aufgebracht, die zusammen mit einer unbeweglichen Elektrode am Grundkörper einen Plattenkondensator mit veränderlicher Kapazität bildet (kapazitive Sensoren). Mithilfe einer elektrischen Schaltung wird die Kapazität bestimmt, die sich mit der Auslenkung der Membran und damit mit dem anliegenden Differenzdruck entsprechend verändert.

Piezoresistive Sensoren entsprechen im Aufbau Dehnungsmessstreifen, bestehen also aus Widerständen, deren Leitfähigkeit sich mit der Dehnung verändert. Im Vergleich zu Metallwiderständen in herkömmlichen Dehnungsmessstreifen bestehen Piezowiderstände aus Halbleitern wie Silizium. Diese weisen einen hohen Wirkungsfaktor und damit eine entsprechend hohe Empfindlichkeit auf. Die Widerstände werden an der Membran angebracht. Im Sensor in Abbildung 2.4 wird die Auslenkung der Prozessmembrane durch ein Füllöl an die Siliziummembrane übertragen. Deren Widerstandsänderung ist proportional zur Auslenkung der Membrane.

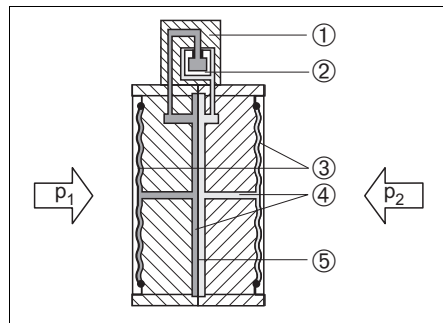


Abbildung 2.4: Schema eines piezoresistiven Druckdifferenzsensors nach [6],
1: Messelement, 2: Siliziummembrane, 3: Prozessmembrane, 4: Füllöl, 5: Überlastmembrane

Mit der Auslenkung einer Membrane kann grundsätzlich nur eine Druckdifferenz gemessen werden. Einzeldruckmessungen sind möglich, indem auf einer Seite der Membran ein Druck vorgegeben wird. Dies können z. B. der Umgebungsdruck (Relativdruckaufnehmer) oder ein Vakuum (Absolutdruckaufnehmer) sein.

2.3.3 Durchflussmessung mit Normdüsen

Mit Normdüsen können Durchflüsse nach dem sogenannten Wirkdruckverfahren bestimmt werden. Sie stellen prinzipiell einen Strömungswiderstand dar. Durch Verengung des Rohrquerschnittes wird die Strömungsgeschwindigkeit an dieser Engstelle erhöht, so dass sich der statische Druck in Strömungsrichtung ändert. Die Druckdifferenz zwischen festgelegten Punkten vor und hinter der Normdüse wird als Wirkdruck bezeichnet. Dieser lässt sich mit Sensoren (vgl. Abschnitt 2.3.2) bestimmen. Grundlage um daraus den Durchfluss zu bestimmen, ist die Energiegleichung nach Bernoulli.

$$\frac{p_E}{\rho} + \frac{c_E^2}{2} = \frac{p_A}{\rho} + \frac{c_A^2}{2} + h_V \Rightarrow c_A^2 - c_E^2 = 2 \cdot \left(\frac{p_E - p_A}{\rho} - h_V \right) \quad (2.17)$$

Mithilfe der bekannten Durchmesser am Ein- und Austritt lässt sich der Volumenstrom über die Gleichung 2.4 berechnen. Die Normdüse verursacht einen Reibungsdruckverlust, der mithilfe des Verlustterms h_V bei der Bestimmung der Geschwindigkeitsänderung aus der Messung des Wirkdruckes zu berücksichtigen ist. Die DIN EN ISO 5167 [7] gibt Bestimmungsgleichungen zur Berechnung des Durchflusses an, die diesen Druckverlust berücksichtigen. Voraussetzung ist es, dass das Bauteil bezüglich Geometrie und Maße nach normativen Vorgaben ausgeführt ist. Eine nach Norm konstruierte Düse wie beispielsweise in Abbildung 2.5 wird dementsprechend als Normdüse bezeichnet. In der Norm werden darüber hinaus andere Bauteilgeometrien beschrieben. Normblenden, Venturirohre und -düsen basieren auf dem gleichen Messprinzip und unterscheiden sich im Wesentlichen durch den hervorgerufenen Druckverlust.

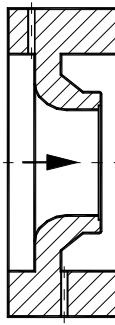


Abbildung 2.5: Schema einer Normdüse aus [8]

Abbildung 2.5 zeigt die beiden Öffnungen, zwischen denen der Wirkdruck Δp gemessen wird. Daraus lässt sich der Massenstrom des Mediums laut der DIN EN ISO 5167 wie folgt berechnen.

$$\dot{m} = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \epsilon_N \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2 \Delta p \rho} \quad (2.18)$$

In der Gleichung werden Kenngrößen für geometrische Eigenschaften der Düse selbst (Durchmesser Verhältnis β) sowie hydraulische Kennwerte (Durchflusskoeffizient C und Expansionszahl ϵ_N) verwendet. Letztlich leitet sich Gleichung 2.18 aus Gleichung 2.17 ab, wobei noch die Kontinuität und Reibungsdruckverluste sowie die Geometrie der Düse berücksichtigt werden.

2.3.4 Thermische Massedurchflussmessung

Thermische Massedurchflusssensoren nutzen einen stromdurchflossenen und dadurch beheizten Widerstand, dessen elektrische Leitfähigkeit von der Temperatur abhängt. Dies kann z. B. ein so genannter Hitzdraht oder ein Zylinder aus Platin oder Nickel sein. Häufig Anwendung finden PT100- oder PT1000-Sensoren, die aus Platin bestehen und bei 0 °C einen Widerstand von 100 Ω bzw. 1000 Ω aufweisen. Aufbau und Funktionsweise von Widerstandssensoren werden ausführlich in der Versuchsbeschreibung Hubkolbenverdichter beschrieben.

Der stromdurchflossene Widerstandssensor befindet sich direkt im Fluidstrom. Die freiwerdende Joulesche Wärme (RI^2) wird im stationären Fall an den vorbeifließenden Luftstrom abgegeben. Dazu ist eine Temperaturdifferenz zwischen Hitzdraht und Luftstrom erforderlich. Diese Temperaturdifferenz ist umso größer je schlechter das Wärmeübergangsverhalten ist. Der Wärmeübergang wird mit zunehmenden Luftstrom intensiver. Damit ist der Volumenstrom proportional zum Kehrwert der Temperaturdifferenz, $\dot{V} \sim \frac{1}{\Delta T}$. Der Wärmetransport erfolgt durch die einzelnen Moleküle des Fluids, die die Wärme beim Vorbeistreichen am Sensor aufnehmen. Der Wärmetransport hängt darüber hinaus auch von den Stoffeigenschaften des Mediums ab, daher muss die Zusammensetzung des Mediums dem Messgerät vorgegeben werden.

Neben dem beheizten Sensor befindet sich in der Messstrecke ein weiterer unbeheizter Widerstandssensor, der in herkömmlicher Weise als Temperaturfühler verwendet wird und die effektive Prozesstemperatur erfasst. Der stromdurchflossene Sensor wird durch die Regelung der Stromstärke auf einer konstanten Temperatur gehalten. Der Volumenstrom ist somit proportional zur Stromstärke, $\dot{V} \sim I$. Abbildung 2.6 zeigt ein thermisches Massedurchflusssmessgerät mit zwei PT1000-Zylindern.

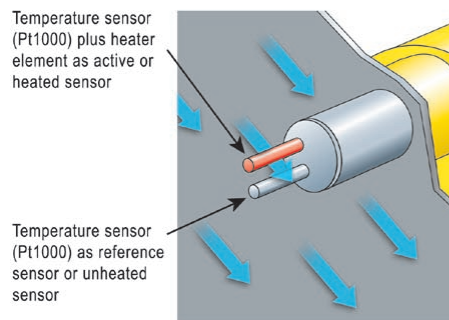


Abbildung 2.6: Aufbau eines thermischen Massedurchflussmessgerätes nach [9]

2.3.5 Norm- und Betriebsvolumenstrom von Gasen

Mit den beiden oben vorgestellten Durchflussmessverfahren wird jeweils der Massenstrom des Fluids ermittelt. Die Umrechnung auf den Volumenstrom erfolgt mittels der Dichte:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (2.19)$$

Bei einem Gas bzw. einer bekannten Zusammensetzung eines Gasgemisches (für eine genaue Berechnung der Luftdichte ist wegen des Wasseranteils die Luftfeuchtigkeit zu berücksichtigen) hängt die Dichte von der Temperatur und dem Druck ab, d. h. beide müssen bekannt sein, um die Dichte und damit aus dem Massenstrom den Volumenstrom berechnen zu können. Alternativ kann der Normvolumenstrom bestimmt werden, dies ist der Volumenstrom unter Normbedingungen - in Europa sind die Normbedingungen für Gase $p_{\text{Norm}} = 101\,325\text{ Pa}$ und $t_{\text{Norm}} = 273,15\text{ K}$. Der Normvolumenstrom erlaubt jedoch keine direkte Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit nach Gleichung 2.4. Hierzu wird der tatsächlich auftretende Betriebsvolumenstrom benötigt, der sich mit den Betriebsbedingungen aus dem Normvolumenstrom berechnen lässt.

$$\dot{V}_{\text{Betrieb}} = \dot{V}_{\text{Norm}} \cdot \frac{p_{\text{Norm}}}{p_{\text{Betrieb}}} \cdot \frac{t_{\text{Betrieb}}}{t_{\text{Norm}}} \quad p_{\text{Norm}}, p_{\text{Betrieb}} \text{ in Pa; } t_{\text{Norm}}, t_{\text{Betrieb}} \text{ in K} \quad (2.20)$$

3 Versuchsaufbau

Abbildung 3.1 zeigt den Versuchsaufbau. Neben den einzelnen Komponenten sind die 12 zur Verfügung stehenden Druckmesspunkte (PMP01...12) dargestellt. Diese können mittels Schläuchen mit drei piezoresistiven Druckdifferenzmessgeräten verbunden werden. Der Messbereich der Geräte beträgt 0 hPa - 30 hPa (Messgerät PDS01) bzw. 0 hPa - 10 hPa (Messgeräte PDS02 und PDS03).

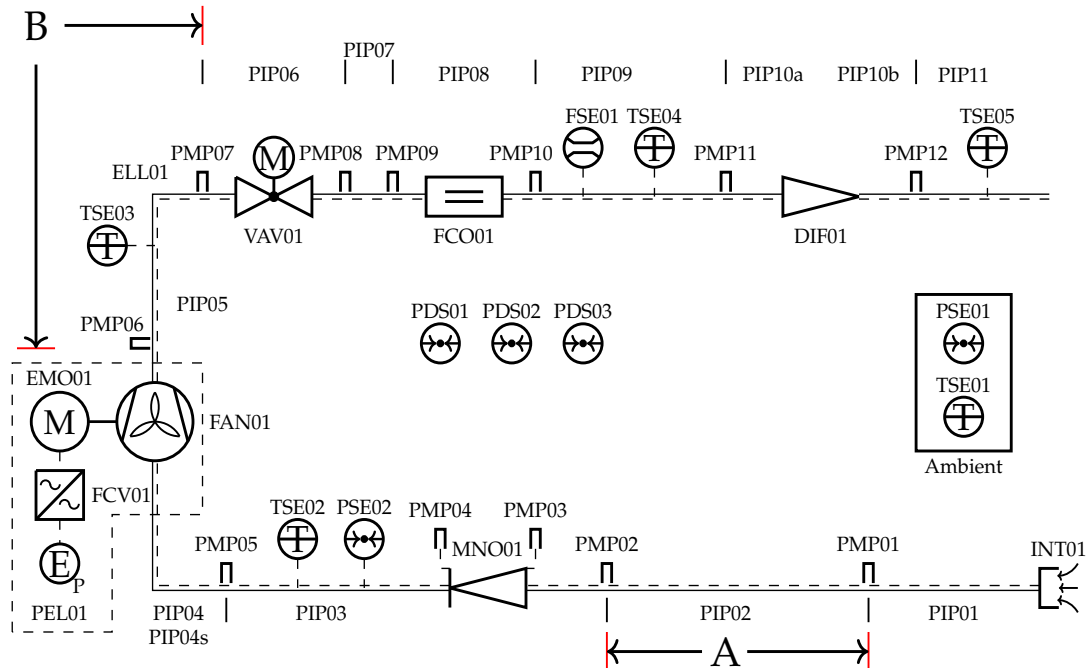


Abbildung 3.1: Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema des Prüfstandes

Die Luft wird durch das Rohrende INT01 über eine Einlaufstrecke vom Ventilator angesaugt. Zur Bestimmung des Volumenstroms befindet sich in der Einlaufstrecke eine Normdüse MNO01, deren Wirkdruck über zwei Druckmesspunkte direkt an der Düse gemessen wird. Zwischen Düse und Eintritt des Ventilators ist zudem der Absolutdrucksensor PSE02 angebracht. Durch Betrieb des Ventilators FAN01 erhöht sich der Druck zwischen Aus- und Eintritt des Ventilators. Über zwei Messpunkte kann die statische Druckdifferenz zwischen Eintritt und Austritt gemessen werden, die der Gesamtdruckdifferenz entspricht, da die Rohrdurchmesser und damit der dynamische Druck an Ein- und Austritt identisch sind. Der Ventilator wird von dem drehzahlregelmotor EMO01 angetrieben. Die Drehzahl wird durch den Frequenzumrichter FCV01 vorgegeben, dessen Eingangsleistung vom Leistungsmessgerät PEL01 gemessen wird.

Zur Veränderung des Anlagenwiderstands befindet sich in der Druckleitung die elektrisch verstellbare Drosselklappe VAV01. Zusätzlich ist in der Druckleitung der Diffusor DIF01 eingebaut, an dem sich zwei Druckmesspunkte sowie am Austritt ein Temperatursensor befinden. Der Durchfluss wird druckseitig mittels des thermischen Durchflusssensors FSE01 erfasst (Ausgabe Normvolumenstrom), von diesem Gerät wird ebenfalls die Temperatur ausgegeben (TSE04). Zur Vergleichmäßigung der Strömung ist vor dem Sensor der Gleichrichter FCO01 installiert. An unterschiedlichen Stellen der Anlage sind Sensoren zur Temperaturmessung installiert (TSE01-03/TSE05, Thermoelemente Typ K). Die Umgebungsbedingungen werden über den Temperatursensor TSE01 und den Luftdrucksensor PSE01 aufgezeichnet. Die Ansteuerung der Drosselklappe und des Frequenzumrichters sowie die Messwerterfassung und -auswertung erfolgen rechnergestützt mit der Software LabVIEW. Die Messwerte werden innerhalb einer graphischen Bedienoberfläche angezeigt.

4 Versuchsdurchführung

Lesen Sie vor dem Labortermin alle Unterkapitel zur Versuchsdurchführung und führen Sie die Berechnungen zur Versuchsvorbereitung in Abschnitt 4.1 durch.

Am Prüfstand wird zunächst der Druckverlust von zwei Rohrstücken bei unterschiedlichen Volumenströmen gemessen und mit in der Vorbereitung berechneten Werten verglichen. Im Anschluss werden in zwei Versuchsabschnitten durch Messung von Volumenstrom und Druckerhöhung am Ventilator Anlagen- und Ventilator Kennlinien ermittelt. Anhand der Ergebnisse können die grundsätzlichen Zusammenhänge zwischen den Kennlinien diskutiert werden. Vor der jeweiligen Versuchsreihe sind die für die Messung notwendigen Druckmesspunkte auszuwählen und anzuschließen sowie das Durchflussmessgerät festzulegen und zu konfigurieren.

4.1 Versuchsvorbereitung

Im Labor werden die Druckverluste von zwei Rohrleitungsabschnitten der Anlage gemessen (siehe Versuch 1 in Abschnitt 4.2). Zum Vergleich sollen in der Vorbereitung die Druckverlustkennlinien (Druckverlust in Abhängigkeit des Volumenstroms) für diese beiden Bereiche rechnerisch bestimmt werden. Berechnen Sie hierzu den Druckabfall in diesen Rohrleitungsabschnitten für acht Volumenströme im Bereich bis $1200 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Für die Berechnung können Sie ein Tabellenkalkulationsprogramm verwenden und die Datei zum Labor mitbringen. Alternativ können Sie die Werte auch in das Diagramm im Anhang, Abschnitt 5.5, eintragen.

Die zu berechnenden Bereiche sind mit Bereich A und Bereich B bezeichnet (siehe Abbildung 3.1). Bereich A befindet sich zwischen den Druckmesspunkten PMP01 und PMP02 und besteht aus einer geraden Rohrleitung. Bereich B liegt zwischen PMP06 und PMP07 und weist zusätzlich zur Rohrleitung einen 90° -Bogen auf. Damit Sie die Berechnung der Druckverluste nach Abschnitt 2.2 durchführen können, werden folgende Daten vorgegeben:

- Länge der Rohrleitungen: $l_A = 3 \text{ m}$, $l_B = 0,7 \text{ m}$;
- Rohrleitungstyp: Geschweißtes Edelstahlrohr $139,7 \times 4 \text{ mm}$;
- Radius des Bogens: $r = 190 \text{ mm}$;
- Dichte von Luft: $\rho = 1,183 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$;
- Kinematische Viskosität von Luft: $\nu = 15,3 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$.

Der für die Berechnung der Druckverluste in der Rohrleitung benötigte Wert für die Rauigkeit k ist mithilfe des angegebenen Rohrleitungstyps zu ermitteln. Hierzu können Sie selbst recherchierte Quellen oder die Tabelle im Anhang, Abschnitt 5.2, verwenden. Im Anhang, Abschnitte 5.3 und 5.4, sind Methoden zur Bestimmung des Rohrreibungsbeiwertes λ und des Druckverlustbeiwerts des Bogens ζ aufgeführt.

4.2 Versuchsdurchführung

Tragen Sie die jeweiligen Messergebnisse in ein Tabellenkalkulationsprogramm ein. Hierzu können Sie entweder die Datei aus der Versuchsvorbereitung nutzen oder eine neue Datei anlegen. Wenn Sie für die Berechnungen der Versuchsvorbereitung das Diagramm im Anhang, Abschnitt 5.5, genutzt haben, tragen Sie auch hier die Messergebnisse ein.

Vorbereitung der Versuche Teil 1: Auswahl des Durchflussmessgerätes

Am Prüfstand stehen zwei Durchflussmessgeräte zur Verfügung - eine Normdüse und ein thermischer Durchflusssensor. Überlegen Sie welche Vor- und Nachteile die Messgeräte haben und wählen Sie das Gerät aus, das Sie in den Versuchen verwenden wollen. Der thermische Durchflusssensor ist so eingestellt, dass der jeweils aktuelle Normvolumenstrom ausgegeben wird. Die Normdüse muss so an das Differenzdruckmessgerät angeschlossen werden, dass der Wirkdruck gemessen wird. Das Messwerterfassungsprogramm ist bereits so aufgebaut, dass aus dem Wirkdruck direkt der Normvolumenstrom berechnet wird. Da für die Strömungsgeschwindigkeit jedoch der Betriebsvolumenstrom entscheidend ist, sollen Sie diesen bestimmen, d. h. bei beiden Durchflussmessverfahren ist eine Umrechnung notwendig. Welche Informationen sind hierzu notwendig und wie können diese aus der vorhandenen Sensorik für den von Ihnen gewählten Sensor gewonnen werden? Das Messwerterfassungsprogramm erlaubt Ihnen für den gewählten Durchflusssensor die hierzu notwendigen Einstellungen vorzunehmen.

Vorbereitung der Versuche Teil 2: Anbindung der Differenzdruckmessgeräte

Für die Aufnahme der Kennlinien sind unterschiedliche Differenzdruckmessungen notwendig. Hierzu stehen drei Differenzdrucksensoren und unterschiedliche Druckmesspunkte zur Verfügung. Überlegen Sie, welche Messpunkte Sie für die jeweilige Aufgabe verwenden werden und mit welchen Messgerät diese verbunden werden sollen. Tragen Sie die Konfiguration unterteilt für die drei Versuchsteile in die nachfolgende Tabelle ein.

Tabelle 4.1: Konfiguration der Differenzdruckmessgerät, Druckmessung erfolgt jeweils zwischen Anschluss (+) und Anschluss (-)

Messgerät	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
PDS01 0..30 hPa (+)			
PDS01 0..30 hPa (-)			
PDS02 0..10 hPa (+)			
PDS02 0..10 hPa (-)			
PDS03 0..10 hPa (+)			
PDS03 0..10 hPa (-)			

Nach Absprache mit dem Laborpersonal können Sie den Aufbau mittels Messschläuchen realisieren und die Konfiguration im Messwerterfassungsprogramm eintragen.

Versuch 1 - Messung der Druckverluste in den Bereichen A und B

Der Druckverlust der Bereiche A und B wird für unterschiedliche Volumenströme gemessen und in ein Diagramm eingetragen. Der Volumenstrom wird durch Anpassung der Drehzahl variiert (500 min^{-1} – 3000 min^{-1}) - es sind etwa acht verschiedene Drehzahlen einzustellen. Für den Versuch ist wie oben beschrieben ein Durchflussmessgerät sowie die Druckmesspunkte für die Differenzdrucksensoren auszuwählen. Notieren Sie für jeden Betriebspunkt:

- den Betriebsvolumenstrom gemessen mit dem gewählten Durchflussmessgerät,
- den statischen Differenzdruck der Bereiche A und B.

Versuch 2 - Aufnahme der Anlagenkennlinie

Bei einer vorgegebenen Drosselklappenstellung (z. B. $\gamma = 0^\circ$) wird die Anlagenkennlinie aufgenommen. Der Volumenstrom wird durch Anpassung der Drehzahl variiert ($500 \text{ min}^{-1} - 3000 \text{ min}^{-1}$) - es sind etwa acht verschiedene Drehzahlen einzustellen. Beachten Sie, dass Sie für die Versuche 2 und 3 die Differenzdrucksensoren an andere Druckmesspunkte anschließen müssen. Notieren Sie für jeden Betriebspunkt der Anlage:

- den Volumenstrom gemessen mit dem gewählten Durchflussmessgerät,
- den statischen Differenzdruck zwischen Ein- und Auslauf des Ventilators.

Versuch 3 - Aufnahme der Ventilator-kennlinie

Es wird bei zwei vorgegebenen Drehzahlen (z. B. $n = 2000 \text{ min}^{-1}$) die Ventilator-kennlinie aufgenommen. Der Volumenstrom wird mittels der Drosselklappe variiert ($0^\circ - 90^\circ$). Von vollständig geöffnet ($\gamma = 0^\circ$) bis geschlossen ($\gamma = 90^\circ$) sind zehn Klappenstellungen einzustellen. Notieren Sie für jeden Betriebspunkt der Anlage:

- Volumenstrom gemessen mit dem gewählten Durchflussmessgerät,
- Statischer Differenzdruck zwischen Ein- und Auslauf des Ventilators.
- die Leistungsaufnahme des Frequenzumformers.

4.3 Versuchsauswertung

Zur Auswertung der Versuche sind folgende Aufgaben durchzuführen und zu diskutieren:

- Erstellen Sie ein Diagramm, in dem die gemessenen und berechneten Druckverluste der Bereiche A und B dargestellt sind. Vergleichen Sie die Kurven aus Messung und Berechnung und diskutieren Sie die etwaigen Unterschiede.
- Erstellen Sie ein $\Delta p, \dot{V}$ -Diagramm mit der gemessenen Anlagen- sowie den Ventilator-kennlinien. Kennzeichnen Sie die Betriebspunkte. Berechnen Sie für die Messpunkte aus Versuch 2 und 3 die hydraulische Leistung (siehe Gleichung 2.10) und tragen Sie die beiden Kurven in ein $P_{Hyd}, \dot{V}$ -Diagramm ein.
- Überprüfen Sie anhand Ihrer gemessenen Ventilator-kennlinien mithilfe der Gleichungen 2.8, 2.9 und 2.10 die Gültigkeit der Ähnlichkeitsgesetze für Volumenstrom, Druckdifferenz und hydraulische Leistung.
- Berechnen Sie mithilfe der Ähnlichkeitsgesetze eine zweite Anlagenkennlinie und zeichnen diese in das $\Delta p, \dot{V}$ -Diagramm ein. Wählen Sie hierzu einen beliebigen Punkt aus einer der Ventilator-kennlinien aus, der bei einer anderen Klappenstellung als bei der gemessenen Anlagenkennlinie aufgenommen wurde. Ausgehend von diesem Punkt können Sie die anderen Werte mittels der Ähnlichkeitsgesetze bestimmen (Gleichungen 2.8 und 2.9). Kennzeichnen Sie die Betriebspunkte innerhalb des $\Delta p, \dot{V}$ -Diagramms bei Verwendung dieser Anlagenkennlinie.
- Berechnen Sie die Volumenzahl und die Druckzahl (Gleichungen 2.6 und 2.7) für die Messreihen der Ventilator-kennlinien. Tragen Sie in einem Diagramm die Druckzahl über der Volumenzahl für beide Drehzahlen auf.

- Berechnen Sie für die Messreihen der Ventilator Kennlinien die Wirkungsgrade des Subsystems Ventilator + Elektromotor. Hierzu benötigen Sie die Eingangsleistung des Motors. Diese entspricht der Ausgangsleistung vom Frequenzumformer $P_{FU,aus}$ und kann aus der gemessenen Eingangsleistung $P_{FU,in}$ berechnet werden. Für den Wirkungsgrad des Frequenzumformers η_{FU} kann die nachfolgende Näherungsfunktion in Abhängigkeit von der Drehzahl n in 1/min verwendet werden.

$$P_{FU,aus} = P_{FU,in} \cdot \eta_{FU} \quad \text{mit} \quad \eta_{FU} = 0,978 \cdot \left(1 - e^{-0,0016 \cdot n}\right) \quad (4.1)$$

Tragen Sie in einem Diagramm den Wirkungsgrad für beide Drehzahlen in Abhängigkeit vom Volumenstrom auf.

Literaturverzeichnis

- [1] H. Recknagel, E. Sprenger und K.-J. Albers, *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*. Essen: Deutscher Industrieverlag GmbH, Vulkan-Verlag GmbH, 2015.
- [2] DIN EN ISO 5801: *Industrieventilatoren - Leistungsmessung auf genormten Prüfständen*, 2011.
- [3] L. Böswirth und S. Bschorer, *Technische Strömungslehre*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2012.
- [4] WIKA Alexander Wiegand SE Co. KG, *Datenblatt IN 00.23: Einsatz von Thermoelementen*, Klingenberg am Main, 2016.
- [5] DIN EN 60584-1: *Thermoelemente - Teil 1: Thermospannungen und Grenzabweichungen*, 2013.
- [6] Endress+Hauser Messtechnik GmbH+Co. KG, *Technische Information Deltabar S PMD 70/75, FMD 76/77/78*, Reinach, Schweiz, 2011.
- [7] DIN EN ISO 5167: *Durchflussmessung von Fluiden mit Drosselgeräten in voll durchströmten Leitungen mit Kreisquerschnitt*, 2004.
- [8] Dosch Messapparate GmbH, *Normdüse DU 600 (ISA1932)*, Berlin, 2016.
- [9] FCI Fluid Components International LLC, *Comparison of Differential Pressure and Thermal Dispersion Technologies*, San Marcos, USA, 2008.
- [10] H.-B. Horlacher und U. Helbig, *Rohrleitungen 2*. Berlin: Springer Vieweg, 2018.
- [11] K.-H. Grote und J. Feldhusen, *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau*. Berlin: Springer-Verlag, 2007.
- [12] S. Genic, „A review of explicit approximations of Colebrook’s equation“, *FME Transactions*, Nr. 39, S. 67–71, 2011.
- [13] D. Surek und S. Stempin, *Technische Strömungsmechanik*. Berlin: Springer Vieweg, 2017.

5 Anhang

5.1 Radialventilator Details

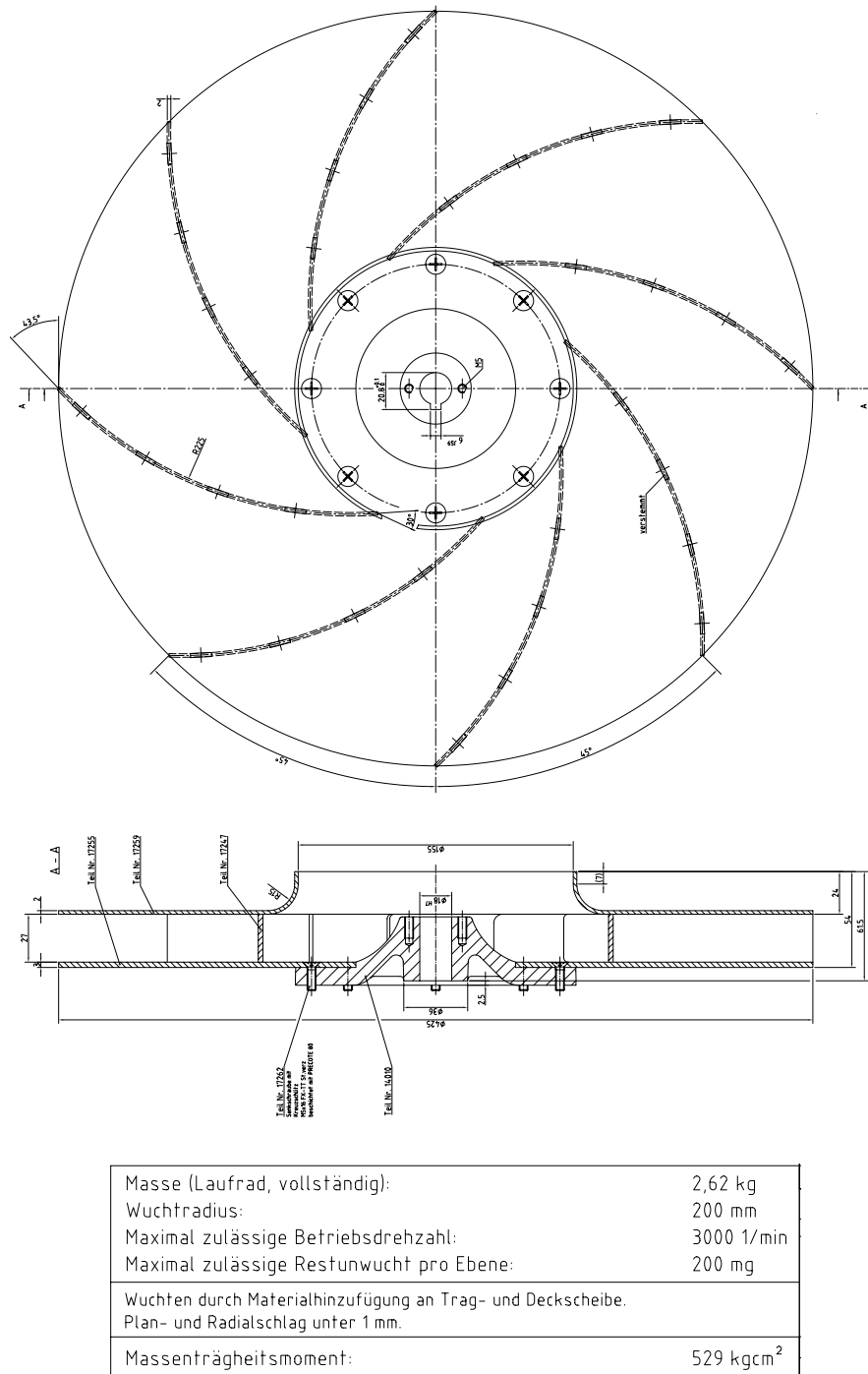


Abbildung 5.1: Ventilator der Fa. Elektror Airsystems GmbH; Oben: Achsnormalschnitt des Laufrads; Mitte: Meridianschnitt des Laufrads; unten: Herstellerangaben zur Restunwucht

5.2 Rohrrauigkeiten

Die folgende Tabelle ist [10] entnommen und gibt Rauigkeiten für unterschiedliche Rohrmaterialien an.

Rohrmaterial, Zustand	Rauigkeitsgrad	Rohrrauigkeit k in mm
Stahl, poliert, verchromt	nicht rauh	0,0014 – 0,0015
nichtrostender Stahl		0,0015
Kupferrohr, neu		0,0015
Kunststoffrohr		0,0015
PE-Material		0,003 – 0,028
PE-Rohre		0,007
Stahl, kunststoffbeschichtet		0,010 – 0,032
Gasleitungen, neu	kaum rauh	0,020 – 0,065
Stahl, nahtlos, gezogen		0,01 – 0,06
Stahl, geschweißt		0,02 – 0,10
Kupfer, gealtert		bis 0,03
handelsübliches Stahlrohr		0,045
Stahlrohr, nahtlos, neu		0,02 – 0,06
Stahlrohr, nahtlos gewalzt, neu		0,03 – 0,05
Stahlrohr, geschweißt, neu		0,04 – 0,10
Stahlrohr, gezogen, neu		0,04 (0,02 – 0,10)
Stahlrohr, geschweißt, neu		0,05 (bis 0,10)
Erdgasleitungen, alt	mäßig rauh	0,10 – 0,14
Stahl, verzinkt		0,06 – 0,30
Stahlrohr, verzinkt		0,15

Abbildung 5.2: Rauheiten verschiedener Rohrleitungswerkstoffen, entnommen aus [10]

5.3 Rohrreibungsbeiwerte

Die Rohrreibungsbeiwerte können auf unterschiedliche Weise ermittelt werden. Nachfolgend sind Methoden zur Bestimmung des Rohrreibungsbeiwerts aus drei Publikationen dargestellt.

1. Methode aus [3]

Turbulente Rohrströmung $Re \geq 2320$; $w = w_{\max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}}$; $n = 2,1 \log Re - 1,9$		
hydraulisch glatt $\Delta p_v = c \cdot w_m^{1,75 \text{ bis } 1,8}$	Übergangsbereich $\Delta p_v = c \cdot w_m^{1,75 \text{ bis } 2}$	hydraulisch rau $\Delta p_v = c \cdot w_m^2$
Turbulenz entsteht in der Kern-Strömung von selbst (Geschw.gradient) Kernströmung Rohrwand laminare Unterschicht	Turbulenz zusätzlich verursacht durch Wandraugigkeit laminare Unterschicht	Turbulenz durch Wandraugigkeit stark dominierend laminare Unterschicht
Die laminare Unterschicht deckt die Wandraugigkeit komplett zu; die Rohrströmung, die praktisch eine turbulente Grenzschicht darstellt, gleitet an der laminaren Unterschicht entlang. Die Turbulenz entsteht von selbst in der Kernströmung (Wirbelbildung). $\lambda = f(Re)$	Mit zunehmender Geschwindigkeit, d. h. dünnerer laminarer Unterschicht und/oder größerer relativer Wandraugigkeit k beginnen Rauigkeitsspitzen aus der laminaren Unterschicht herauszuringen. Die Turbulenz bzw. λ hängt sowohl von k/d als auch von der Re-Zahl ab. $\lambda = f\left(Re, \frac{k}{d}\right)$	Bei noch höherer Re-Zahl und/oder größerem k/d ragen die Rauigkeitsspitzen so weit aus der laminaren Unterschicht heraus, dass die Energieverluste nur durch die starken Wirbel (Turbulenzen), die von diesem Rauigkeitsgebirge ausgehen, verursacht werden. λ ist nur k/d abhängig. $\lambda = f\left(\frac{k}{d}\right)$
$2320 < Re < 10^5$: Gl. von Blasius: $\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} \quad (8.8)$ $10^5 < Re$: Gl. von Prandtl: $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log(Re \cdot \sqrt{\lambda}) - 0,8 \quad (8.8a)$ λ iterativ berechnen!	Der Übergangsbereich ist zuständig, wenn $65d/k < Re < 1300d/k$ Colebrook-Formel: $\lambda = \frac{1}{\left[2 \cdot \log\left(\frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{0,27}{d/k}\right)\right]^2} \quad (8.9)$ λ iterativ berechnen!	Gl. von von Kármán: $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,74 - 2 \cdot \log \frac{2k}{d} \quad (8.10)$

Abbildung 5.3: Rohrreibungszahl bei ausgebildeter turbulenter Strömung, entnommen aus [3]

2. Methode aus [11]

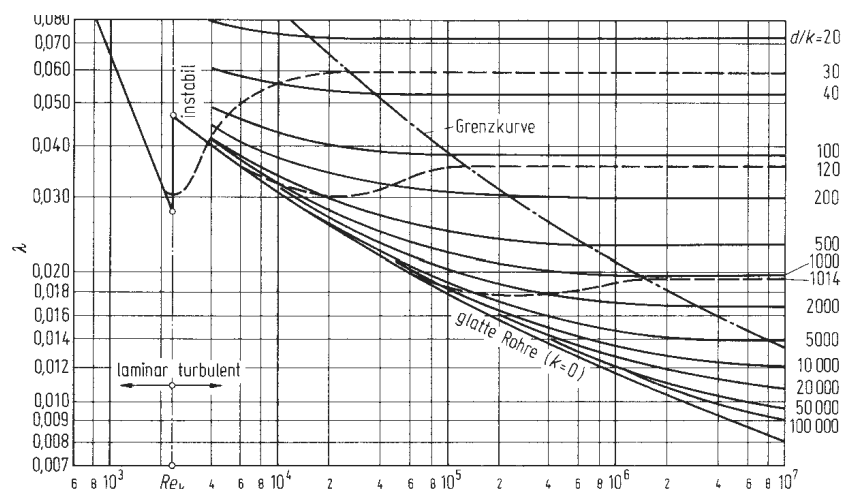


Abbildung 5.4: Rohrreibungszahl nach Colebrook und (gestrichelt) Nikuradse, entnommen aus [11]

3. Methode aus [12]

Eq. num.	Equation	Range	Ref.	Authors (year)
(4)	$f = 0.0055 \left[1 + \left(20000\varepsilon + \frac{10^6}{Re} \right)^{1/3} \right]$	$Re = 4000 - 5 \cdot 10^8$ $\varepsilon = 0 - 0.01$	[8]	Moody (1947)
(5)	$f = 0.11 \left(\frac{68}{Re} + \varepsilon \right)^{0.25}$	Not specified	[9]	Altshul (1952)
(6)	$f = 0.53\varepsilon + 0.094\varepsilon^{0.225} + 88\varepsilon^{0.44} Re^{-1.62\varepsilon^{0.134}}$	$Re = 4000 - 5 \cdot 10^7$ $\varepsilon = 0.00001 - 0.04$	[10]	Wood (1966)
(7)	$f = \left[-2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7} + \frac{7}{Re^{0.9}} \right) \right]^{-2}$	Not specified	[11]	Churchill (1973)
(8)	$f = \left[1.14 - 2 \log \left(\varepsilon + \frac{21.25}{Re^{0.9}} \right) \right]^{-2}$	$Re = 5000 - 10^7$ $\varepsilon = 0.00004 - 0.05$	[12]	Jain (1976)
(9)	$f = \left[-2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^{-2}$	$Re = 5000 - 10^8$ $\varepsilon = 0.000001 - 0.05$	[13]	Swamee, Jain (1976)
(10)	$f = \left\{ -2 \log \left[\frac{\varepsilon}{3.7065} - \frac{5.0452}{Re} \log \left(\frac{\varepsilon^{1.1098}}{2.8257} + \frac{5.8506}{Re^{0.8981}} \right) \right] \right\}^{-2}$	$Re = 4000 - 4 \cdot 10^8$	[14]	Chen (1979)
(11)	$f = \left[-1.8 \log \left(0.135\varepsilon + \frac{6.5}{Re} \right) \right]^{-2}$	$Re = 4000 - 4 \cdot 10^8$ $\varepsilon = 0 - 0.05$	[15]	Round (1980)
(12)	$f = \left\{ -2 \log \left[\frac{\varepsilon}{3.7} - \frac{5.02}{Re} \log \left(\varepsilon - \frac{5.02}{Re} \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7} + \frac{13}{Re} \right) \right) \right] \right\}^{-2}$	$Re = 4000 - 10^8$ $\varepsilon = 0.00004 - 0.05$	[16]	Zigrang, Sylvester (1982)
(13)	$f = \left\{ -1.8 \log \left[\left(\frac{\varepsilon}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right] \right\}^{-2}$	$Re = 4000 - 10^8$ $\varepsilon = 0.000001 - 0.05$	[17]	Haaland (1983)
(14)	$A = 0.11 \left(\frac{68}{Re} + \varepsilon \right)^{0.25}$ If $A \geq 0.018$ then $f = A$ and if $A < 0.018$ then $f = 0.0028 + 0.85A$	$Re = 4000 - 10^8$ $\varepsilon = 0 - 0.05$	[18]	Tsal (1989)
(15)	$f = \left[-2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.70} + \frac{95}{Re^{0.983}} - \frac{96.82}{Re} \right) \right]^{-2}$	$Re = 4000 - 10^8$ $\varepsilon = 0 - 0.05$	[19]	Manadilli (1997)
(16)	$f = \left\{ -2 \log \left[\frac{\varepsilon}{3.7065} - \frac{5.0272}{Re} \log \left(\frac{\varepsilon}{3.827} - \frac{4.567}{Re} \cdot \log \left(\left(\frac{\varepsilon}{7.79} \right)^{0.9924} + \left(\frac{5.3326}{208.82 + Re} \right)^{0.9345} \right) \right] \right\}^{-2}$	$Re = 3000 - 1.5 \cdot 10^8$ $\varepsilon = 0 - 0.05$	[20]	Romeo, Royo, Monzon (2002)
(17)	$f = 1.613 \left[\ln \left(0.234\varepsilon^{1.1007} - \frac{60.525}{Re^{1.1105}} + \frac{56.291}{Re^{1.0712}} \right) \right]^{-2}$	$Re = 3000 - 10^8$ $\varepsilon = 0 - 0.05$	[21]	Fang (2011)
(18)	$\beta = \ln \frac{Re}{1.816 \ln \left(\frac{1.1Re}{\ln(1+1.1Re)} \right)}, f = \left[-2 \log \left(10^{-0.4343\beta} + \frac{\varepsilon}{3.71} \right) \right]^{-2}$	Not specified	[7]	Brkić (2011)
(19)	$\beta = \ln \frac{Re}{1.816 \ln \left(\frac{1.1Re}{\ln(1+1.1Re)} \right)}, f = \left[-2 \log \left(\frac{2.18\beta}{Re} + \frac{\varepsilon}{3.71} \right) \right]^{-2}$	Not specified	[7]	Brkić (2011)

Abbildung 5.5: Unterschiedliche Näherungsgleichungen der Gleichung von Colebrook (mit relativer Rauigkeit $\varepsilon = k/D_I$), entnommen aus [12]

5.4 Druckverlustbeiwert Bogen

Nachfolgend sind zwei Methoden zur Bestimmung des Druckverlustbeiwertes eines 90°-Bogen aufgeführt.

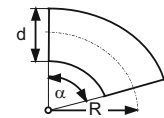
1. Methode aus [1]

Bogen		1					
							
$R/D = 0,5$	$0,75$	$1,0$	$1,5$	2	3	4	
ζ		$= 0,9$	$0,43$	$0,33$	$0,24$	$0,19$	$0,15$

Abbildung 5.6: Bestimmung des Druckverlustbeiwertes im 90°-Bogen nach [1]

2. Methode aus [13]

Kreisbogenkrümmer		glatt					
α		15°	22,5°	45°	60°	90°	90°
$R/d=1$	ζ	0,03	0,04	0,14	0,19	0,21	0,51
2		0,03	0,04	0,09	0,12	0,14	0,30
4		0,03	0,04	0,08	0,10	0,11	0,23
6		0,03	0,04	0,07	0,09	0,09	0,18
10		0,03	0,04	0,07	0,07	0,11	0,20



Segmentkrümmer

Abbildung 5.7: Bestimmung des Druckverlustbeiwertes im 90°-Bogen nach [13]

5.5 Diagramme

