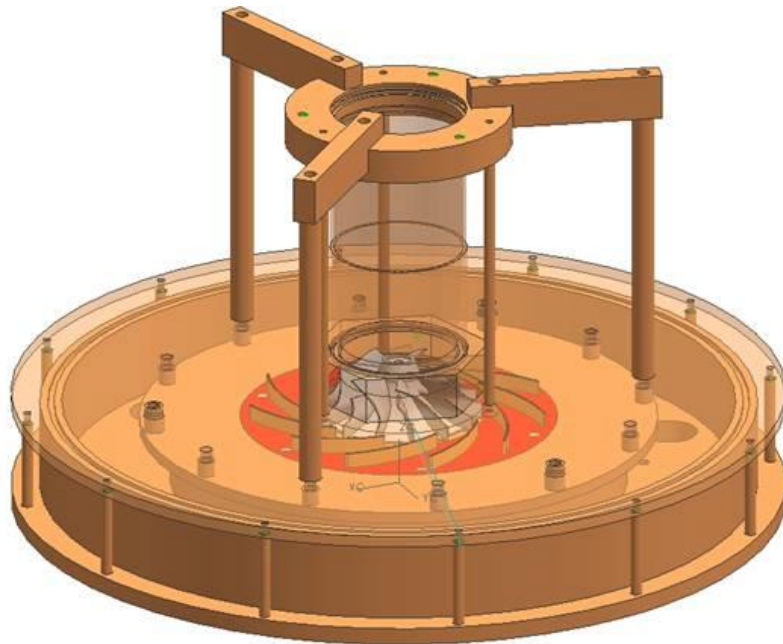


***Energie-Labor (EnLab)***

Entdeckungsreise in der Welt der Energietechnik

***Postenlauf Erweiterungsmodul 1. Semester***

# „Rotating Stall“ Verdichter



Der Posten wurde durchgeführt von:

•

Kohorte:

•

Gruppe:

•

Datum:

•

### Vorbereitungsfragen

- Betrachten Sie die Diffusor-Strömung in der Abbildung 1 und wählen Sie für die Geschwindigkeiten zwischen (1) & (2)  $>$ ,  $<$  oder  $=$

$C_1$   $C_2$

a)  $=$

b)  $<$

c)  $>$

*Hinweis: Sie sollen die Kontinuitätsgleichung für inkompressible Strömung anwenden.*

Welche Aussage können Sie für die entsprechende Druckänderung machen?

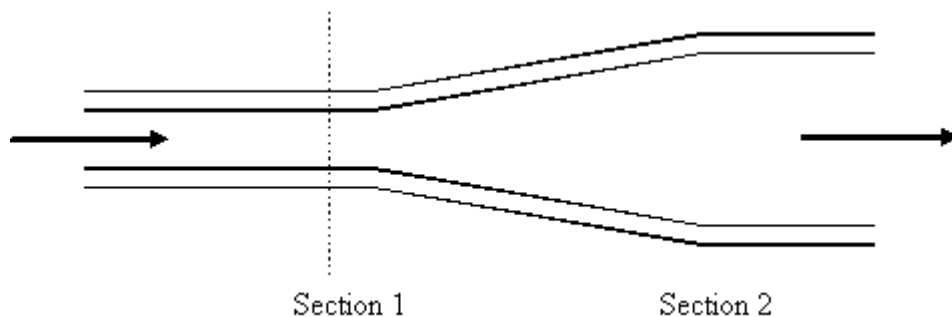


Abbildung 1: Diffusor

- Vereinfachen Sie die allgemeine Energiegleichung für die spezifische Anwendungen

(a) einer Radialpumpe:

(b) eines Radialverdichters:

- Skizzieren Sie die typischen Kennlinien für einen Radialverdichter, mit Hilfe Literatur-Untersuchung (Druckverhältnis als Funktion von Volumenstrom, wobei die Drehzahl ein Parameter ist).

## Symbolverzeichnis

Bezeichnung	Symbol	Einheiten
Fluidleistung	$P_{Fluid} = \Delta p \cdot \dot{V}$	[W=Nm/s]
Elektrische Leistung	$P_{el}$	[W=J/s]
Druck	p	[Pa]
Drehzahl	n	[s <sup>-1</sup> ]
Winkelgeschwindigkeit	$\omega=2\pi n$	[rad/s]
Umfangsgeschwindigkeit	U	[m/s]
Absolutgeschwindigkeit	C	[m/s]
Fallbeschleunigung	g	[m/s <sup>2</sup> ]
Dichte	$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]
Volumenstrom (Durchflussmenge)	$\dot{V}$	[m <sup>3</sup> /s]
Massenstrom	$\dot{m}$	[kg/s]
Radius	r	[m]
Durchmesser	D	[m]
Gesamtwirkungsgrad	$\eta_{Ges} = \frac{P_{Fluid}}{P_{el}}$	[-]

$$\Phi = \frac{\dot{V}}{U_2 D_2^2} \quad \text{Durchflusszahl} \quad [-]$$

$$\Psi = \frac{p_{Aus} - p_{Ein}}{\rho_1 U_2^2} \quad \text{Druckzahl} \quad [-]$$

## Index

1 Eintritt Laufrad 2 Austritt Laufrad 3 Austritt Diffusor

### Gegebene Grössen

Nr.	Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
1	Fallbeschleunigung	$g$	9.81	$[m/s^2]$	Gerundet
2	Dichte	$\rho$	998	$[kg/m^3]$	Dichte von Wasser bei 20° C, gerundet

### Einheiten

Bitte rechnen Sie mit den im Symbolverzeichnis angegebenen Einheiten. Wird eine Grösse in einer anderen Einheit erfasst, muss sie umgerechnet werden.

Gebräuchliche Druckeinheiten:  $10^5 \text{ N/m}^2 = 1000 \text{ mbar} = 1 \text{ bar}$

$$\text{N/m}^2 = \text{Pa}$$

## 1. Übersicht: Radialverdichter

In verschiedensten Bereichen der Technik werden gasförmige Medien mit Radialverdichtern komprimiert und gefördert. Die Funktionsweise eines Verdichters ist ähnlich, wie die einer Pumpe. Im Unterschied zur Pumpe werden in einem Verdichter keine Flüssigkeiten (z.B. Wasser) sondern Gase komprimiert.

Es werden grundsätzlich zwei Funktionsweisen unterschieden. Zum einen der Turboverdichter für grosse Volumenströme bei kleinen Verdichtungsendrücken (oder Druckverhältnisse), zum anderen die Verdrängerverdichter bei kleinem Durchsatz und grossen Verdichtungsendrücken. Ein Radialverdichter ist ein Turboverdichter bei dem durch ein rotierendes Laufrad (nach den Gesetzen der Strömungsmechanik) dem strömenden Fluid Energie zugesetzt wird. Die zwei Komponenten, die das Verhalten einer radialen Verdichterstufe massgeblich bestimmen, sind Laufrad und Diffusor (Abbildung 2). Das Laufrad dient der Energieübertragung von der rotierenden Welle auf das zu verdichtende Medium (Fluid).

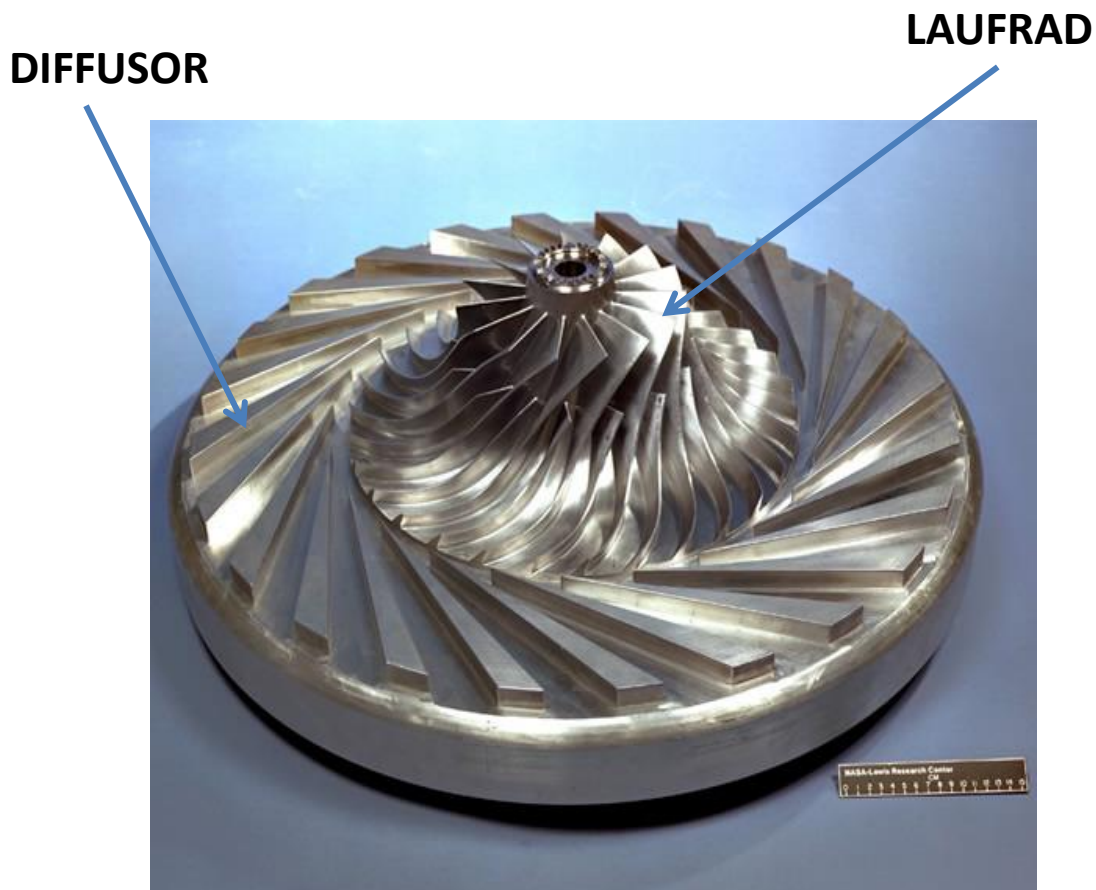


Abbildung 2: Hauptelemente einer Radialverdichterstufe

Am Austritt des Laufrades ist die kinetische Energie des Fluids hoch und der Diffusor soll einen möglichst grossen Anteil der kinetischen Energie in Druckenergie (Druckumsetzung der kinetischen Energie) umwandeln. Bei Radialverdichtern steckt etwa die Hälfte der dem Fluid über das Laufrad zugeführten Energie in der Austrittsgeschwindigkeit des Laufrades. Deswegen spielt der Diffusor eine wichtige Rolle.

Es werden je nach Anwendung und Bauart verschiedene Arten von Diffusoren eingesetzt. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen unbeschaukelten und beschaukelten Diffusoren. Ist ein möglichst hoher Wirkungsgrad wichtig, dann werden beschaukelte Diffusoren verwendet. Durch Umlenkschaukeln im Diffusor, welche die Strömung in die radiale Richtung lenken, kann gegenüber dem schaukellosen Diffusor die Geschwindigkeit des Fluids stärker verringert werden. Zusätzlich wird der Strömungsweg durch die erzwungene Umlenkrichtung reduziert (Abbildung 2). Es werden höhere Wirkungsgrade und kompaktere Bauweisen erreicht. Beschaukelte Diffusoren weisen jedoch gegenüber unbeschaukelten auch Nachteile auf wie der reduzierte Betriebsbereich.

Ein Verdichter wandelt mechanische Leistung die von einem elektrischen Motor gegeben ist in Druckerhöhung oder Fluidleistung.

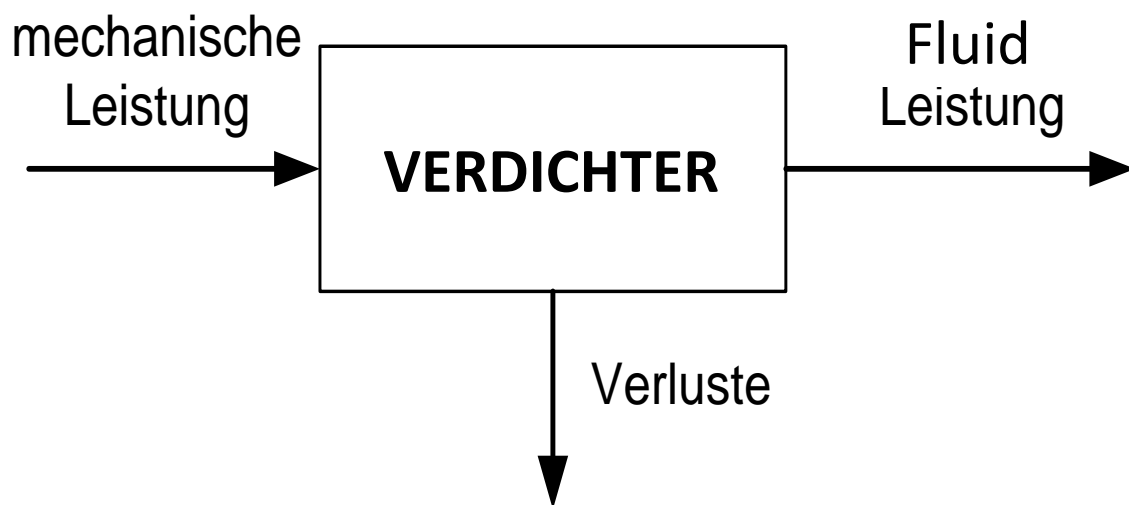


Abbildung 3: zu /abgeführte Leistung

## 2. Radialverdichter Kennlinien

Typische Kenngrößen eines Radialverdichters sind der Volumenstrom (Durchflussmenge oder Durchsatz in der Abszisse), das Druckverhältnis  $\pi = p_{\text{Aus}}/p_{\text{In}}$  (oder Druckerhöhung  $\Delta p$  in der Ordinate) und die Drehzahl  $n$  als Parameter. Der Zusammenhang dieser Größen lässt sich in einem Kennfeld darstellen (Abbildung 4). Im Rahmen dieses Versuches soll mit Hilfe von Druck und Volumenstrom-Messungen ein Teil des Kennfeldes eines Radialverdichters aufgenommen werden. Die gesamte Druckerhöhung der Verdichterstufe besteht aus zwei Teilen, über das Laufrad und über den Diffusor. Deswegen wird während den Messungen der Druckanstieg auch in zwei Teilen gemessen. Einmal vom Laufradeintritt (Punkt 1) bis Laufradaustritt (Punkt 2) und vom Laufradaustritt (Punkt 2) bis zum Diffusorausstritt (Punkt 3). Die Messungen werden anschliessend in einem Diagramm mit dimensionslosen Beiwerten dargestellt (siehe Abbildung 5 als Beispiel).

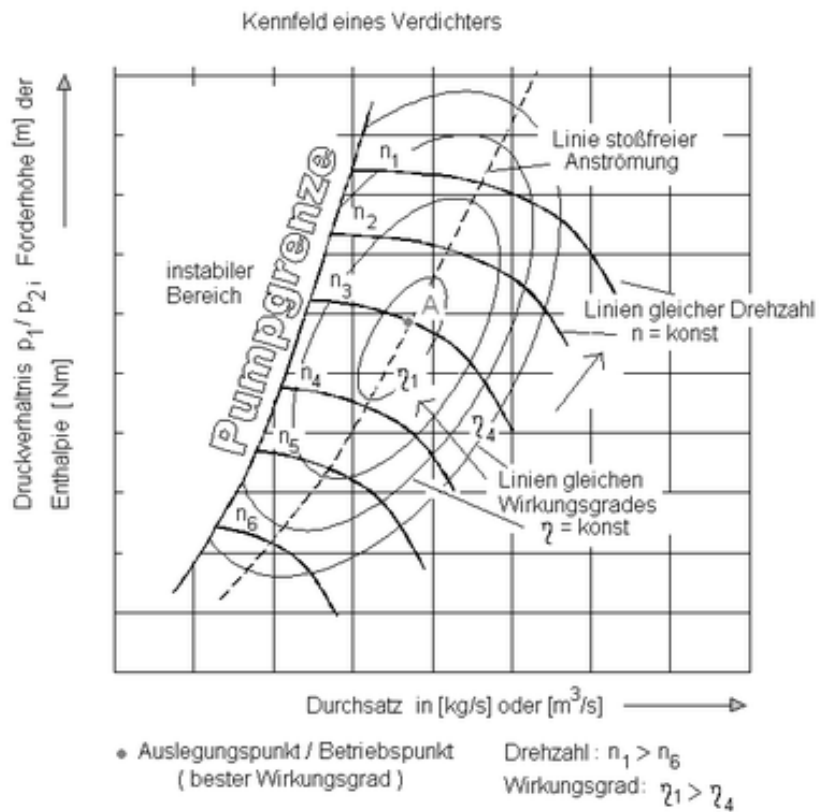


Abbildung 4 Typische Kennlinien eines Radialverdichters

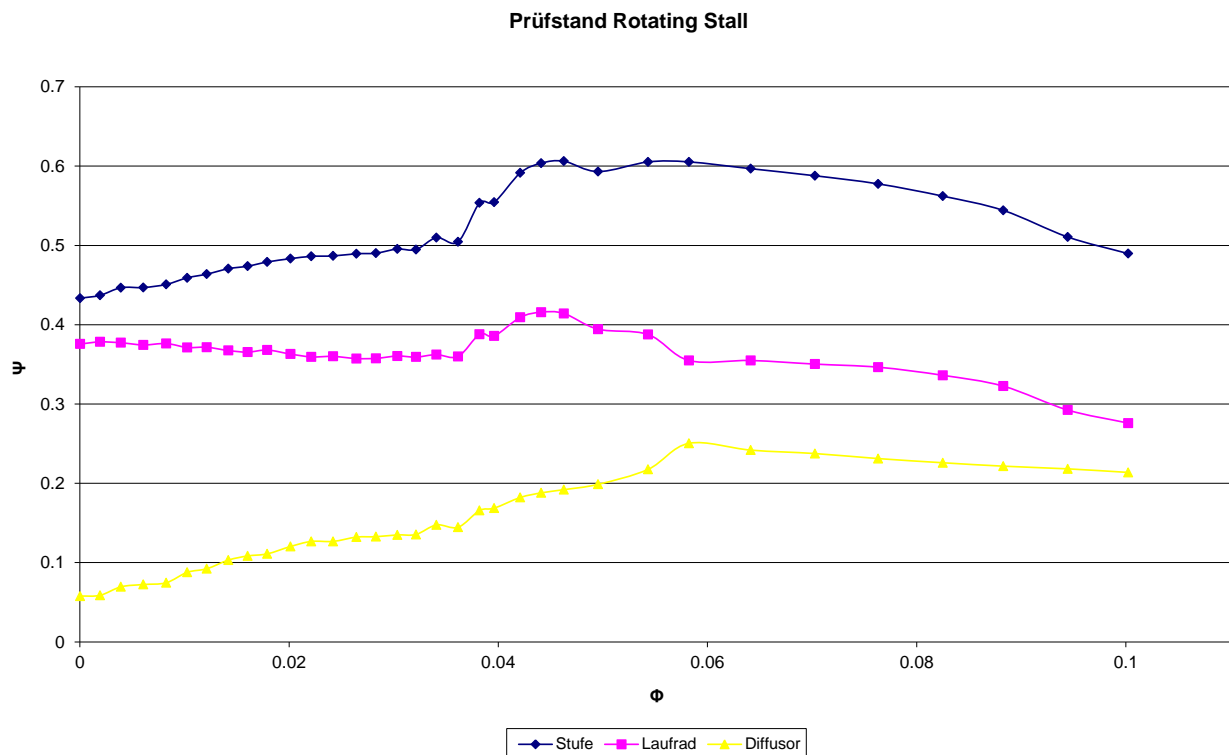


Abbildung 5 Kennlinien des Radialverdichters gemessen am Prüfstand für eine konstante Drehzahl

Der stabile Betriebsbereich eines radialen Verdichters wird zu kleineren Volumenströmen von der Pumpengrenze limitiert wie man auf der Abbildung 4 sehen kann. „Pumpen“ (auf Englisch „surge“) tritt auf wenn bei einem bestimmten Druck ein Mindestmassenstrom unterschritten wird. Wenn „Pumpen“ auftritt spricht man von einer Strömungsinstabilität. Die Ursache einer Strömungsinstabilität ist eine Strömungsablösung im Verdichter. Diese kann bei Strömungen mit einem Druckanstieg (z.B. Diffusor) passieren. „Pumpen“ tritt je nach Stärke der Fehlanpassung des Verdichters, in verschiedenen Intensitäten auf. Bei einer leichten Fehlanpassung kommt es zu einem "Rotating stall", wobei lediglich einzelne Schaufeln des Verdichters einen Strömungsabriss erfahren. „Rotating Stall“ wird im Abschnitt 4 ausführlicher beschrieben.

### 3. Diffusor

Der Diffusor (Abbildung 6) ist ein Element in der Fluidmechanik, der die Gas-/Flüssigkeitsströmungen verlangsamt und den Gas-/Flüssigkeitsdruck erhöht. Er stellt im Prinzip die Umkehrung einer Düse dar. Er dient weiterhin zur „Rückgewinnung“ von kinetischer Energie. So werden Diffusoren technisch genutzt, um kinetische Energie in Druckenergie zu wandeln. Dazu muss die Strömung verzögert werden. Man erreicht dies in der Regel durch eine Erweiterung des Strömungsquerschnitts. Bei zu grossen Querschnittserweiterungen oder zu grossen Druckerhöhungen ist das Fluid nicht mehr in der Lage der Geometrie des Diffusors zu folgen und die Strömung löst sich ab (Abbildung 6 rechtes Bild). Diese sogenannte Strömungsablösung bedeutet Strömungsverluste und kann auch zu Strömungsinstabilitäten führen

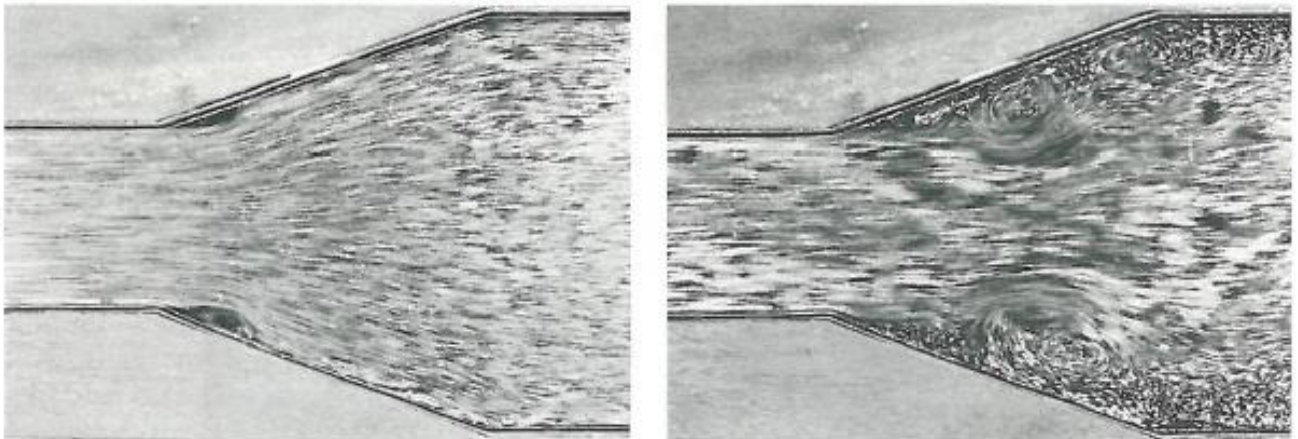


Abbildung 6 Strömungsablösung im Diffusor (recht)

### 4. Strömungsinstabilitäten wie „Rotating Stall“

In diesem Experiment wird das Phänomen „Rotating Stall“ (rotierende Ablösung oder rotierende Abreisströmung) untersucht. Rotating Stall und Surge (Pumpen) sind Strömungsinstabilitäten, die in Strömungsmaschinen (vor allem bei Verdichtern und Pumpen) bei Teillast (bei kleinem Durchfluss) vorkommen können. Bei Rotating Stall handelt es sich, im Gegensatz zur Systeminstabilität bei Pumpen, um ein lokal im Verdichter auftretendes instationäres Strömungsphänomen. Die Ursache dafür ist die Strömungsablösung in den Diffusor Kanälen, welche bei kleineren Massenströmen oder höheren Druckverhältnisse (in den sogenannten „Off-Design“- oder Teillast-Betriebspunkten) vorkommen kann.

Ähnlich wie beim einzelnen Diffusor-Kanal (Abbildung 6) kann die Strömung an einer Diffusorschaukel eines Verdichters oder einer Pumpe ablösen. Dies geschieht aufgrund einer Fehlanströmung/eines ungünstigen Anströmungsverhältnisses.



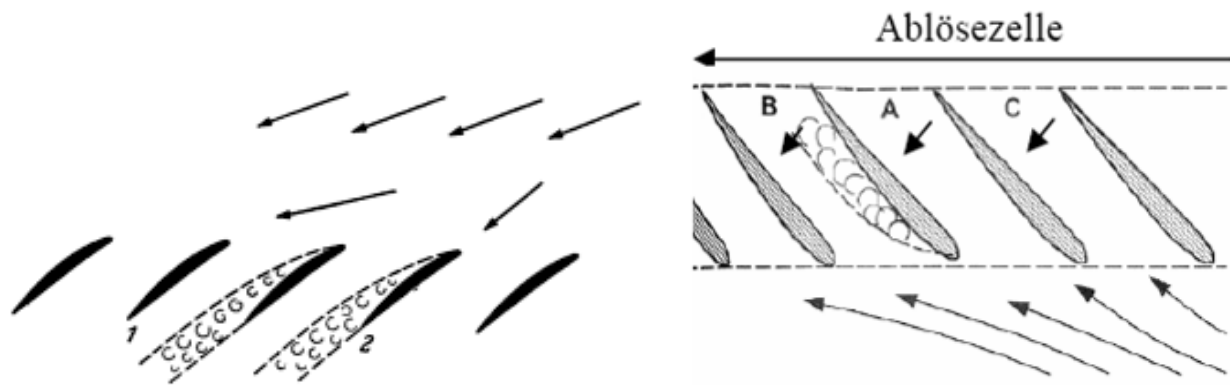


Abbildung 7 Zur Erklärung der rotierenden Ablösung

Wenn man den Anstellwinkel der Zuströmung steigert (Abbildung 7), löst die Strömung bei einem zu grossen Anströmungswinkel ab. Die Querschnittsversperrung durch die so entstehenden Totwassergebiete (Punkt 2) hat zur Folge, dass die Strömung vor dem Eintritt in den Schaufelkanal (Abbildung 7) umgelenkt wird. Hier wird also das Profil 1 durch dieses Umlenken noch ungünstiger angeströmt, während die Zuströmung zum Profil 2 wieder günstiger wird. Folglich wird jetzt Profil 1 ablösen während Profil 2 wieder regulär zu arbeiten beginnt. So wandert die Ablösung indem sie von Schaufel zu Schaufel fortschreitet. Mit anderen Worten: Die abgelöste Strömung blockiert den Schaufelkanal, so dass das nachfolgende Fluid in die benachbarten Schaufelkanäle ausweichen muss. Dies bedingt eine Zunahme des Anströmwinkels im benachbarten Kanal und führt dort wiederum zu einer Ablösung. Eine Fortbewegung (Rotation) des Ablösegebiets ist die Folge. Auf der anderen Seite kommt es hingegen durch Abnahme des Anströmwinkels zu einer Stabilisierung und zum Wiederanlegen der Strömung.

Rotating Stall kann in sehr unterschiedlichen Formen auftreten. So kann die Zahl der abgelösten Zellen, welche einigermaßen gleichmässig am Gitterumfang verteilt sind, zwischen 1 und 8 betragen. Je nach Drosselzustand des Verdichters kann die radiale und umfangmässige Erstreckung der abgelösten Zellen sehr unterschiedlich sein. Je kleiner der Durchfluss, desto grösser werden die Ablösungsgebiete am Schaufelgitter. Mit abnehmendem Volumenstrom entsteht beim Durchschreiten der Abreissgrenze (Pumpengrenze) zunächst nur eine Abreisszelle. Bei weiterem Verkleinern des Förderstromes kann sich die Abreisszone sprunghaft in mehrere Zonen aufteilen.

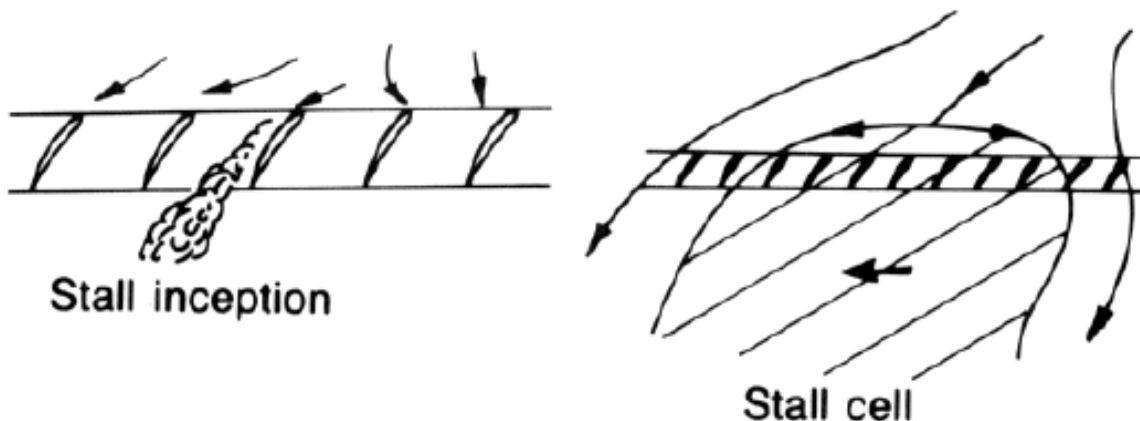


Abbildung 8 Prinzip von Rotating Stall

## 5. Strömungssichtbarmachung

Dieser Prüfstand dient zur Visualisierung von Rotating Stall. Dabei wird ein Radialverdichter, mit einem beschaufelten Diffusor, mit Wasser anstatt mit Luft betrieben. Das Einlaufrohr sowie die Deckscheibe des Gehäuses bestehen aus durchsichtigem Plexiglas. Dies ermöglicht eine Visualisierung der Strömung. Besonders wichtig ist die optische Zugänglichkeit im Diffusorbereich, da dort Rotating-Stall deutlich zu beobachten ist. Um die Strömung im Verdichter besser sichtbar zu machen, wird vor dem Laufrad Luft eingeführt. Die eingeführte Luft wird nach dem Diffusor in der Ringleitung abgesogen.

In Abbildung 9 ist der Ablauf von Rotating Stall im Diffusor skizziert. Durch die Versperrung des Diffusorkanals wird das Fluid rückwärts in den Diffusorkanal hineingezogen. Ein Wirbel bildet sich der den ganzen Diffusorkanal versperrt. Durch die verbesserte Anströmung wird der Wirbel nach kurzer Zeit aus dem Kanal ausgeschwemmt, und die Strömung normalisiert sich wieder.



Abbildung 9: Vorgänge während Rotating Stall

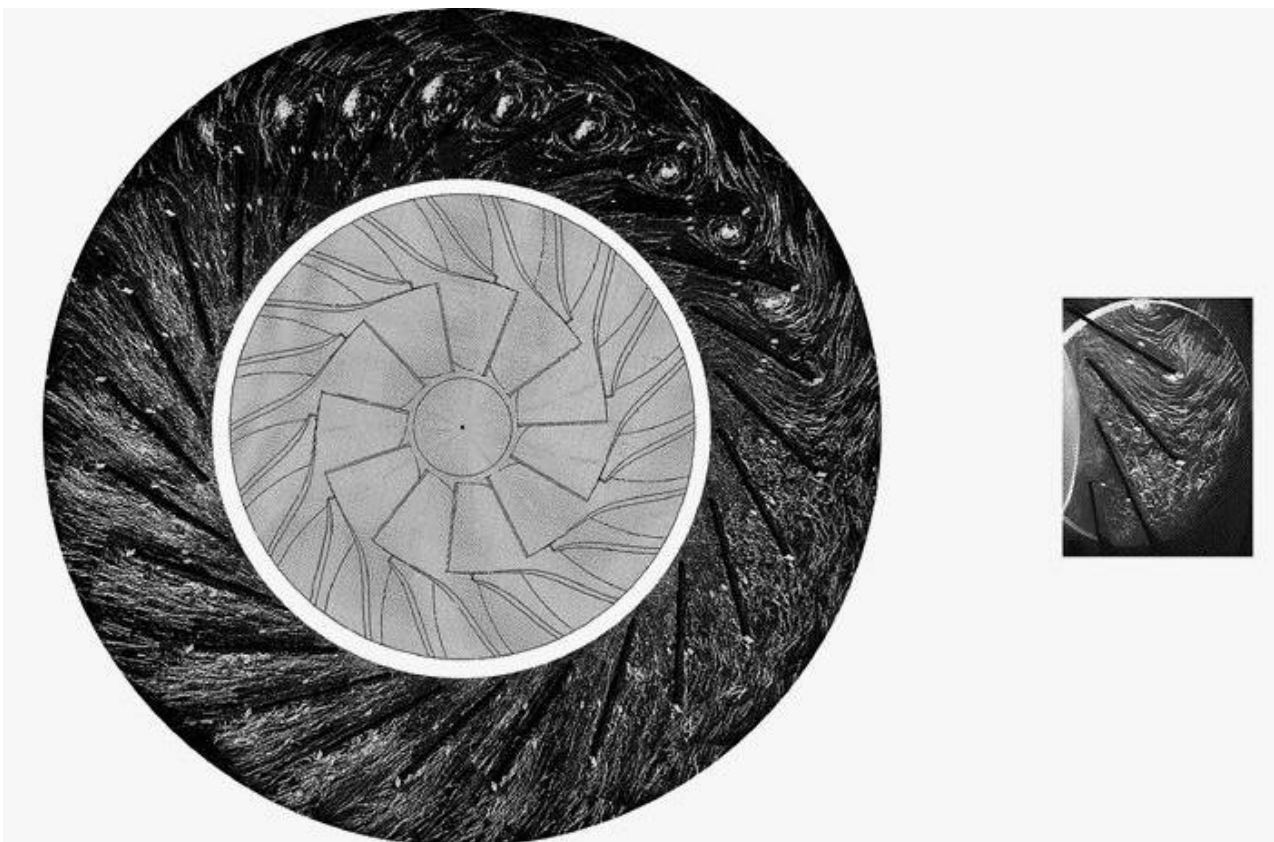


Abbildung 10: Strömungssichtbarmachung von Rotating Stall

## 6. Prüfstand

Abbildung 11 zeigt den Wasserkreislauf. Vom Einlaufbecken (1) läuft das Wasser vertikal durch ein Plexiglasrohr (2) zum Verdichter (3). Nachdem das Wasser den Verdichter passiert hat, wird es in der Ringleitung (4) gesammelt, und durch 6 Schläuche (5) zum Sammelbehälter (6) geführt. Nach dem Sammelbehälter befindet sich die Pumpe (7), welche das Wasser zurück zum Einlaufbecken pumpt. Nach der Pumpe wird der Volumenstrom elektromagnetisch gemessen (8) und der Durchfluss eingestellt (9). Der Verdichter wird durch einen Elektromotor angetrieben, der durch einen Frequenzumrichter (FU) gesteuert ist. Die Drehzahl des Laufrades ist so, dass eine Frequenz von 5 Hz 300 RPM entspricht. Das Laufrad besteht aus Titan und hat 14 Schaufeln (7 „full“ und 7 „splitter“ Schaufeln). Der Diffusor hat 11 Schaufeln. Das Einlaufrohr, sowie die Diffusorplatte bestehen aus Plexiglas. Dies erlaubt in der ganzen Verdichterstufe eine vollständige Analyse und Visualisierung der Strömung.

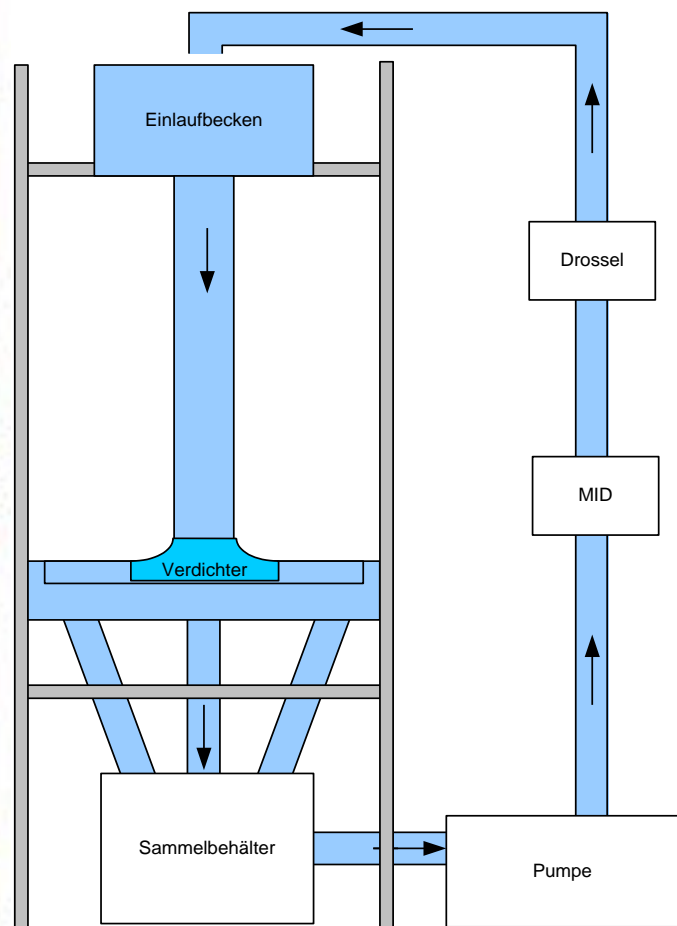


Abbildung 11: Prüfstand

## 7 .Instrumentierung & Messungen

### Drehzahl

Die Drehzahl des Verdichters wird über den Frequenzumrichter vorgegeben (mit 5Hz anfangen). Die vorgegebene Drehzahl wird dann mit einer direkten Drehzahlmessung mit Stroboskop kontrolliert.

### Volumenstrom

Die Pumpe fördert mit konstanter Drehzahl. Nach der Pumpe wird der Volumenstrom gemessen. Die Wassermenge (Volumenstrom) wird mit einem Drosselventil reguliert. Das Drosselventil muss von Hand auf den gewünschten Durchfluss eingestellt werden.

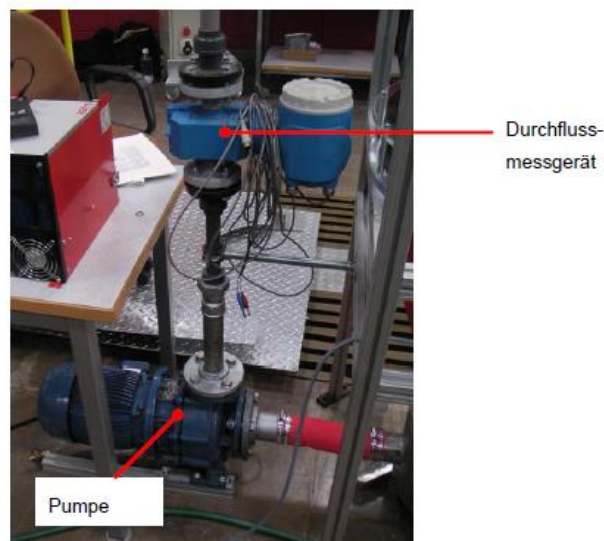


Abbildung 12: Pumpe

Der Volumenstrom wird durch eine magnetisch induktive Messung „MID“ (Abbildung 13) bestimmt. Die Position des MID ist in Abbildung 12 zu sehen. Der Durchfluss  $\dot{V}$  in l/s wird direkt an der Anzeige abgelesen.



Abbildung 13 MID Volumenstrommessinstrument Proline Promog von E+H

Magnetisch-induktive Durchflussmesser, kurz MID, verwenden eine Messmethode, die auf dem Faraday'schen Gesetz der elektromagnetischen Induktion beruht. Der Messaufnehmer erzeugt aus dem Durchfluss ein elektrisch nutzbares Signal.

## Kennlinienmessung

Um die Kennlinie des Verdichters aufzunehmen, werden für die Bestimmung der statischen Drücke drei Leitungen angebracht. Eine unmittelbar vor dem Laufrad (1), eine zwischen Laufrad und Diffusor (2) und eine am Austritt des Diffusors (3).

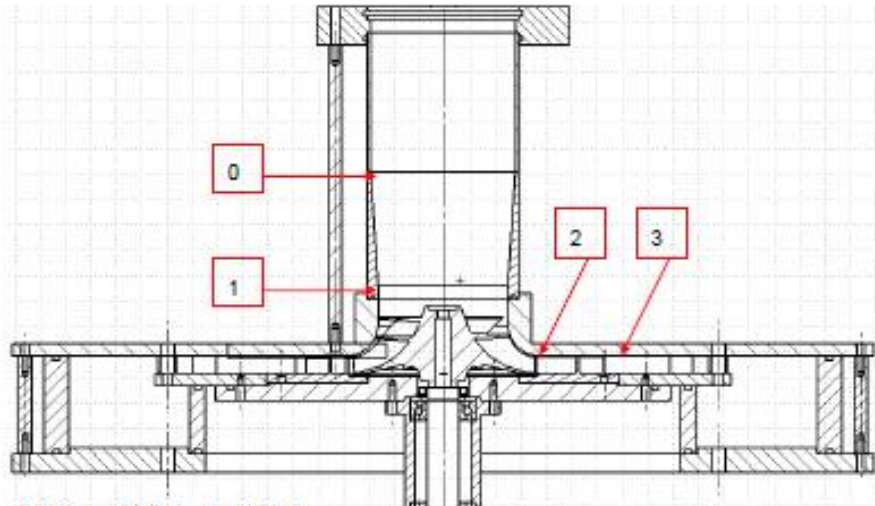


Abbildung 14: statische Druckaufnehmer

Weil wir uns für die Druckerhöhung im Laufrad und im Diffusor interessieren, werden die Druckunterschiede zwischen den Messstellen (1) und (2) und zwischen (2) und (3) mit Hilfe von Rosemount Differentialdruckaufnehmer gemessen.

## Zieldefinition (1. Teil)

### Zeitlimite:

4 Lektionen

### Aufgabe:

Messen Sie die Kennlinien des Verdichters. Fangen sie dafür mit einer konstanten Drehzahl (z.B. 5 Hz) an und variieren Sie anschliessend mittels Drosselung den Volumenstrom in beide Richtungen. Für einen bestimmten Volumenstrom werden die Druckunterschiede  $\Delta p_{12}$  &  $\Delta p_{23}$  gemessen. Nachdem Sie die Messgrössen für eine Kennlinie (bestehend aus verschiedenen Volumenströmen) für 5 Hz aufgezeichnet haben, verändern Sie die Drehzahl. Nun erfassen sie für zwei weitere Drehzahlen mit ähnlichen Volumenströmen und Druckunterschieden die dazugehörigen Kennlinien. Anhand des gemessenen Volumenstroms und des dazugehörigen Druckverhältnisses (Stufe), kann die Fluidleistung und dann der davon abhängige Wirkungsgrad berechnet werden.

Für die Datenerfassung wird die Software LabVIEW verwendet. Mit einem in LabVIEW bereits implementierten Programm, werden die Messsignale der Sensoren in die gewünschten Einheiten (Druck und Volumenstrom) umgerechnet und dargestellt. Die Daten können anschliessend in Excel zu verschiedenen Diagrammen weiterverarbeitet und ausgewertet werden

### Vorgehen:

Messen Sie für jeden Volumenstrom, die Druckunterschiede  $\Delta p_{12}$  &  $\Delta p_{23}$ . Tragen Sie die Werte in eine Excel-Tabelle ein. Berechnen Sie  $\Delta p_{13}$  (Druckerhöhung für die Stufe). Berechnen Sie aus den gemessenen Grössen die dimensionslosen Kennzahlen wie Durchflusszahl & Druckzahl und tragen sie diese in eine Tabelle ein. Erstellen Sie mit den Ergebnissen für einen Verdichter übliche Diagramme (siehe Abbildungen 4 & 5).

### Wirkungsgrad:

Normalerweise wird der Verdichter mit einem elektrischen Motor direkt angetrieben. Weil sich im Labor der Eintritt des Verdichters auf etwa 3m Höhe befindet, brauchen wir eine Pumpe um das Wasser auf diese Höhe zu fördern. Da die Leistung des elektrischen Motors vor der Pumpe gemessen wird, beinhaltet der gemessene Wirkungsgrad auch noch die Pumpenleistung (inklusive Verluste). Aus diesen Gründen bestimmen wir eigentlich den Wirkungsgrad des „Systems“ (Pumpe, Drosselventil, usw.). und nicht des Verdichters.

Die Nenndrehzahl dieses Verdichters ist 60'000 RPM, aber wir betreiben den Verdichter nur mit 300 – 1200 RPM. Deswegen sind die Druckerhöhung über den Verdichter und somit auch die Fluidleistung und der Wirkungsgrad sehr klein.

Elektrische Leistung  $P_{el}$  [W]

Fluidleistung  $P_{Fluid} = \Delta p_{Stufe} * \dot{V}$  [W]

Wirkungsgrad  $\eta_{Ges} = \frac{P_{Fluid}}{P_{el}}$

### **Berechnungen:**

Ein Kollege von ihnen hat den gleichen Versuch letztes Jahr durchgeführt. Davon sind die Messgrößen eines Betriebspunktes noch bekannt.

$\Delta p_1$ [Pa]	$\Delta p_2$ [Pa]	f [Hz]	$\dot{V}$ [l/s]	$P_{el}$ [W]
6377.68	2938.69	10	3.319	859.33

Berechnen sie alle notwendigen Größen um ihre Messungen mit denjenigen ihres Kollegen zu vergleichen. Haben Sie und ihr Kollege das gleiche gemessen?

1. Berechnen Sie den Druckunterschied über die Verdichterstufe:

$$\Delta p_{\text{Stufe}} =$$

2. Um die dimensionslosen Kennzahlen zu bestimmen müssen sie die Umfangsgeschwindigkeit kennen (Laufraddurchmesser  $D = 0.147\text{m}$ ,  $n$  = Drehzahl):

$$U = \pi D n =$$

3. Berechne Sie die Durchflusszahl des Verdichters:

$$\phi =$$

4. Berechnen Sie die Druckzahl für das Laufrad, den Diffusor und den Verdichter ( $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$ ):

$$\Psi_1 =$$

$$\Psi_2 =$$

$$\Psi_{\text{Stufe}} =$$

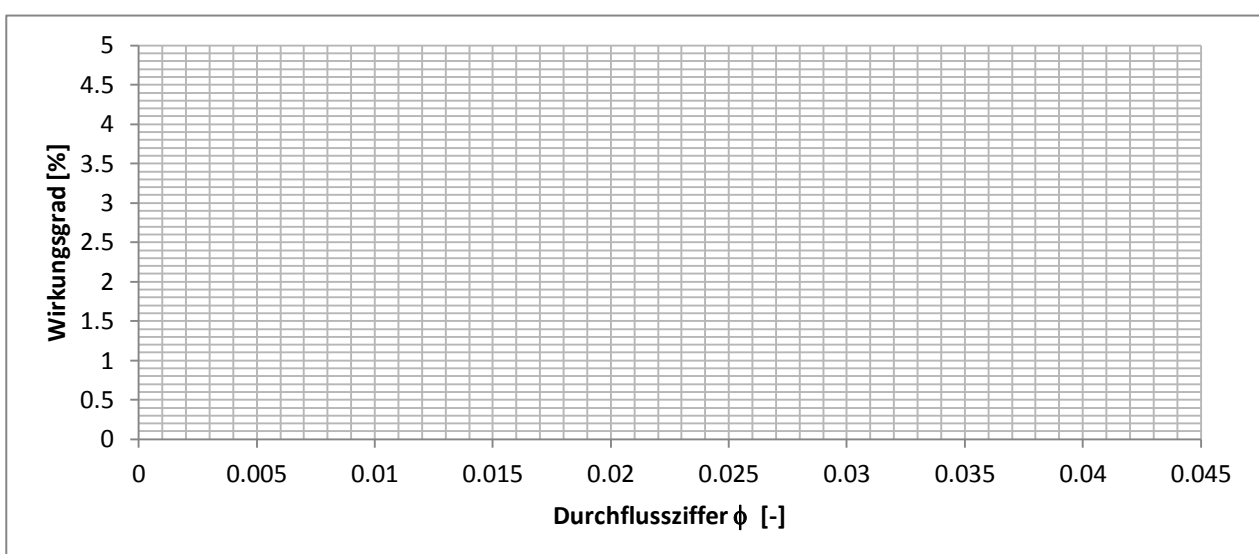
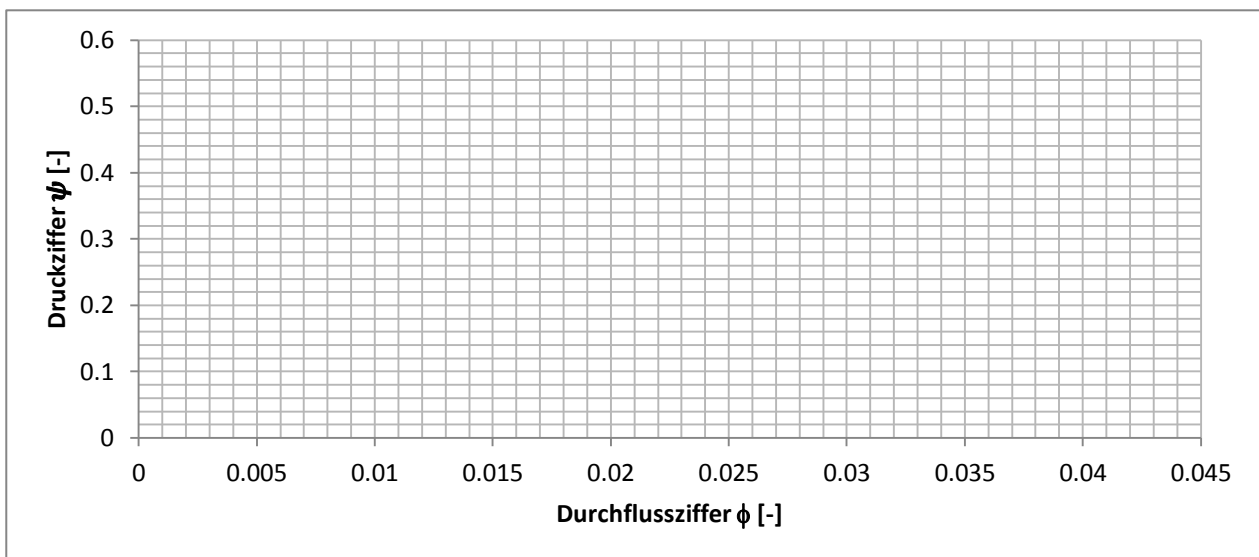


5. Berechnen Sie, aus der elektrischen Leistung und der hydraulischen Leistung des Verdichters, den Wirkungsgrad des Verdichters:

$$P_{\text{hyd}} =$$

$$\eta =$$

Tragen Sie nun die Resultate ihrer Berechnungen in die untenstehenden Diagramme ein und vergleichen sie diese anschliessend mit ihren eigenen Messungen.





### **Messungen:**

- Berechnen Sie den Wirkungsgrad in der Excel Tabelle mit den gemessenen Grössen.
- Stellen Sie die Ergebnisse mit Hilfe von unterschiedlichen Diagrammen dar (siehe Abbildung 4).

Nachdem man die Kennlinien des Verdichters gemessen hat, wird die Strömung an verschiedenen Betriebspunkten der Kennlinie analysiert. Für die optimale Visualisierung von Rotating Stall braucht es Luftbläschen, denn ohne diese ist Rotating Stall von Auge nur sehr schwer zu erkennen. Diese Luftbläschen müssen vor dem Verdichter induziert werden.

1. Messungen durchführen.
2. Kennfeld des Verdichters darstellen
3. Den Wirkungsgrad berechnen
4. Machen Sie eine Energieanalyse des Verdichters. Wo und wieso entstehen Verluste? Vervollständigen Sie das Leistungsflussdiagramm.
5. Beobachtung der Strömung mit Hilfe der Visualisierung.

Bearbeiten Sie die Aufgabenblätter mit Excel-Tabellen und -Diagrammen so selbstständig wie möglich.

Für das Anfahren und Herunterfahren des Verdichters oder bei Fragen wenden Sie sich bitte an den Assistenten, technischen Angestellten oder Dozenten.

Beachten Sie die Sicherheitshinweise.

### **Abzugeben sind:**

- ☒ ausgefülltes Titelblatt
- ☒ bearbeitete Arbeitsblätter
- ☒ vollständig beschriftete und ausgedruckte Diagramme

Die Arbeitsblätter werden korrigiert und wenn nötig, bei der Rückgabe, mit Ihnen besprochen.

### **Vorgehen**

- PC starten
- Frequenzumformer einschalten. Gewünschte Frequenz (Drehzahl) eingeben.
- Pumpe in Betrieb nehmen
- LabVIEW-Programm auf starten, erstellte Excel-Datei einfügen

- Plausibilitätskontrolle der Signale durchführen
- Mit Drosselventil den Volumenstrom (Durchflussmenge) variieren.
- Messung durchführen: Messung im LabVIEW auslösen.
- Excel-Datei öffnen,
- Daten auf Excel kopieren, im Diagramm die Messpunkte einzeichnen. Dimensionslose Kennwerte berechnen
- Mit Drosselventil-Position ändern. Einen neuen Volumenstrom wählen
- Messung wiederholen.
- Nachdem Sie genügend Punkte für eine Kurve gemessen haben, die Drehzahl (Frequenz) ändern und ähnliche Messungen für zwei andere Drehzahlen durchführen.
- Falls notwendig Messungen wiederholen, neue Messpunkte messen.
- Wenn Kennlinien (Kennfeld)-Messung fertig ist, interessante Punkte aus diesem Diagramm für Strömungsbeobachtung wählen.
- Für diese Betriebspunkte (Drehzahl & Volumenstrom) am Eintritt des Verdichters die Luftleitung öffnen.
- Strömung im Diffusor beobachten. Beobachtungen notieren.

Werten Sie die Diagramme aus. Beschriften Sie die Achsen.

## Energieanalyse

Vervollständigen Sie das Leistungsflussdiagramm:

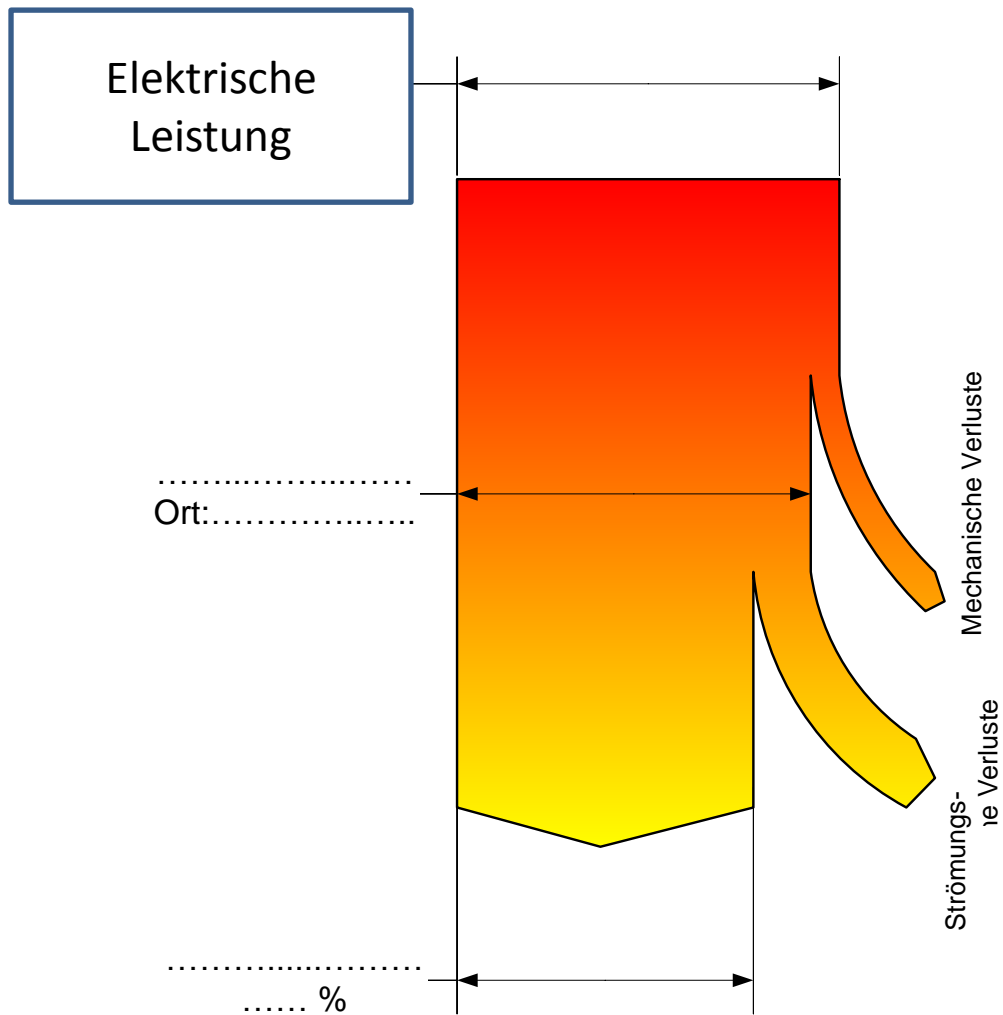


Abbildung 15 : Energieflussdiagramm

Geben Sie zwei Stellen an wo mechanische Verluste auftreten:

- 
- 

Geben Sie zwei Beispiele für Strömungsverluste an:

- 
-

**Welche Aufgabe hat der Diffusor?**

**Was passiert wenn wir den Diffusor entfernen?**

**Warum ist der Betriebsbereich eines Verdichters begrenzt?**

**Warum kommt es in einem Verdichter zu Rotating-Stall?**

**Was versteht man unter dem Begriff „Pumpen“ (Erklären sie anhand des Kennfeldes)?**

**Was sagt der Wirkungsgrad aus?**

**Wie viel der zur Verfügung stehenden Leistung gehen durch Verluste verloren?**

**Beschreiben Sie Ihre Beobachtung der Strömungssichtbarmachung?**