

# Klausur

## Strömungsmaschinen I

### WS 2011/12

**28. Februar 2012, Beginn 14:00 Uhr**

Prüfungszeit: 90 Minuten

Zugelassene Hilfsmittel sind:

- Vorlesungsskript (einschließlich handschriftlicher Notizen) und zugehörige Abbildungen
- Foliensatz
- Taschenrechner, Geodreieck, Zeichenmaterial

Nicht zugelassene Hilfsmittel sind:

- Alte Klausuren
- Übungen der Vorlesung
- Handy, Laptop, Fachbücher, programmierbarer Taschenrechner, sonstige Fachunterlagen
- Bleistift sowie rote Stifte!

**Bitte leserlich schreiben! Unleserliche Antworten können nicht bewertet werden!**

Aufgabe	geschätzte Dauer	Punkte
1. Verständnisfragen	10 min	
2. Axialturbine	10 min	
3. Radiales Gleichgewicht	15 min	
4. Design eines Verdichters	10 min	
5. Abgasturbolader	15 min	
Gesamt	60 min	

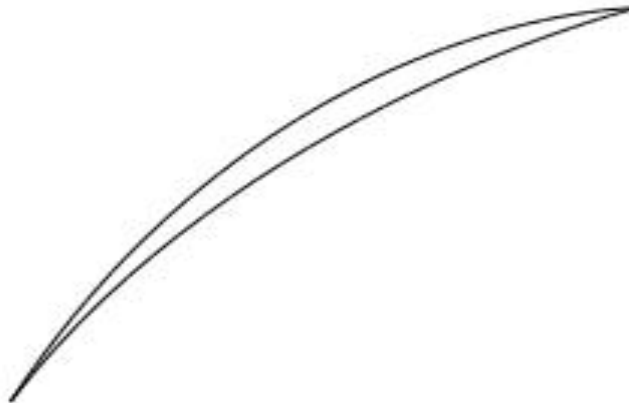
Name, Vorname: .....

Matrikelnummer: .....

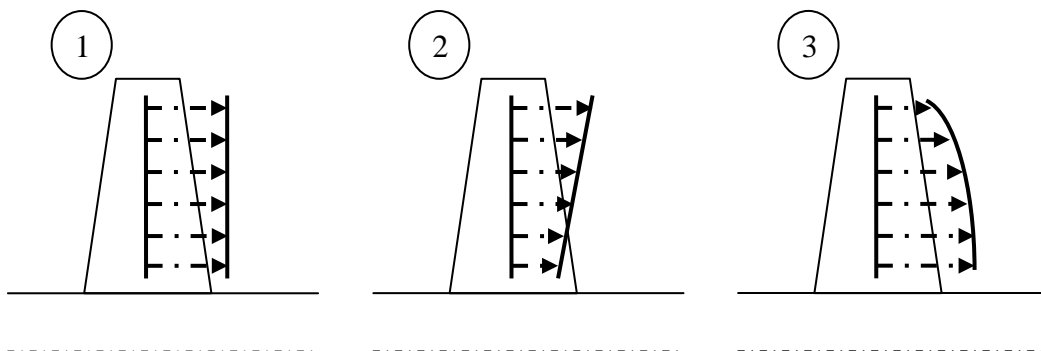
**Wir wünschen Ihnen viel Erfolg!**  
**Prof. J. Seume**  
**R. Adamczuk / T. Sextro**

## 1. Verständnisfragen

- a) Was versteht man unter dem Potentialwirbel-Gesetz (free vortex)? Was sind die Nachteile dieses Gesetzes?
- b) Nennen Sie zwei Gründe, wieso eine Strömungsmaschine mit mehreren Stufen ausgeführt wird.
- c) Skizzieren Sie in die untenstehende Abbildung die druckgseitige Inzidenz an einem Verdichterprofil mit Hilfe des tatsächlichen Geschwindigkeitsvektors und der Tangente an der Skelettlinie.



- d) Wählen Sie aus der untenstehenden Abbildung den Verlauf der Axialgeschwindigkeit  $c_{ax}$  über die Laufschaufelhöhe, wenn die Laufschaufel nach dem Festkörperwirbel-Gesetz ausgelegt wurde.



- e) Zeichnen Sie schematisch die vollständigen Geschwindigkeitsdreiecke am Ein- und Austritt der Laufschaufel sowie den Expansionsverlauf in ein  $h$ - $s$ -Diagramm für eine Turbinenstufe mit einem Reaktionsgrad von 0,5 sowie für eine Turbinenstufe mit einem Reaktionsgrad von 0.

- f) Kennzeichnen Sie in der nachfolgenden Tabelle qualitativ (<, >, =) den Verlauf der Größen  $h_t$ ,  $h$ ,  $p_t$ ,  $p$ ,  $w$  und  $c$  in axialer Richtung der Leit- bzw. Laufschaufel einer reibungsfreien, adiabaten Verdichterstufe mit Reaktionsgrad 0,5.

LA Eintritt			LA Austritt		LE Eintritt			LE Austritt	
$h_{t0}$			$h_{t1}$		$h_{t2}$			$h_{t3}$	
$h_0$			$h_1$		$h_2$			$h_3$	
$p_{t0}$			$p_{t1}$		$p_{t2}$			$p_{t3}$	
$p_0$			$p_1$		$p_2$			$p_3$	
$w_0$			$w_1$		$w_2$			$w_3$	
$c_0$			$c_1$		$c_2$			$c_3$	

## 2. Axialturbine

Es soll eine mehrstufige Mikroaxialturbine mit den Betriebsdaten aus der nachfolgenden Tabelle betrachtet werden.

Wellenabtriebsleistung der gesamten Turbine	$W = 20 \text{ kW}$
Massenstrom	$\dot{m} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$
Umfangskomponente der Absolutgeschwindigkeit nach der Laufschaufel der ersten Stufe	$c_{u2} = -40 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
Axialgeschwindigkeit am Eintritt in die Laufschaufeln der ersten Stufe	$c_{ax,1} = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
Absolutgeschwindigkeit am Austritt der Turbine	$c_A = 150 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
Umfangsgeschwindigkeit an den Laufschaufeln der ersten Stufe am Eulerradius	$u = 80 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
Temperatur am Eintritt	$T_E = 160 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatur am Austritt	$T_A = 100 \text{ }^\circ\text{C}$
Spezifische Wärmekapazität	$c_p = 1004,5 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$

- Medium: Luft, angenommen als ideales Gas mit  $c_p = konst$ .
- Die Entspannung verläuft **nicht** adiabatisch
- Alle Berechnungen werden für den Eulerradius durchgeführt

### Aufgaben:

- Bestimmen Sie die Geschwindigkeiten  $c_1$  und  $c_{u1}$  wenn die erste Stufe der Turbine 30 % der Wellenabtriebsleistung erzeugt. Die Umfangsgeschwindigkeit kann über die Laufschaufel als konstant angenommen werden. (6 Punkte)
- Berechnen Sie den von der Turbine an die Umgebung abgeführten Wärmestrom. Die Absolutgeschwindigkeit am Eintritt kann dabei gleich der in Aufgabenteil a) berechneten Geschwindigkeit  $c_1$  gesetzt werden (3 Punkte)

### 3. Radiales Gleichgewicht

Für ein Vorleitgitter eines Prozessverdichters sind folgende Abmessungen sowie Strömungszustände gegeben.

Konstante für die Verteilung der Umfangsgeschwindigkeit	$k =$	$89 \frac{1}{s}$
Radius bei 5% Schaufelhöhe	$r_5 =$	$0,3 \text{ m}$
Radius bei 95 % Schaufelhöhe	$r_{95} =$	$0,7 \text{ m}$
Axialgeschwindigkeit im arithmetisch gemitteltem Radius	$c_{ax,M} =$	$70 \frac{m}{s}$
Dichte von Luft am Eintritt	$\rho =$	$1,2 \frac{kg}{m^3}$

#### Annahmen

- Medium: Luft als ideales Gas
- $c_u = k \cdot r$
- Keine Krümmung der Meridianstromlinie
- Die Verdichtung erfolgt adiabatisch

#### Aufgaben:

- a) Leiten Sie die Beziehung für die Verteilung von  $c_{ax}$  über die Schaufelhöhe her. Verwenden Sie hierfür die Beziehung (6 Punkte)

$$\frac{c_u^2}{r} + c_u \frac{dc_u}{dr} + c_{ax} \frac{dc_{ax}}{dr} = 0$$

- b) Berechnen Sie die Geschwindigkeiten  $c$ ,  $c_u$  sowie  $c_{ax}$  bei 5% und 95% Schaufelhöhe mit den in Aufgabenteil a) hergeleiteten Beziehungen. (7 Punkte)
- c) Es soll angenommen werden, dass die Dichte über die radiale Höhe konstant ist. Bestimmen Sie die Druckdifferenz zwischen 5% und 95% Schaufelhöhe. (6 Punkte)

## 4. Design eines Axialverdichters

Für einen mehrstufigen axialen Prozessverdichter sind folgende Daten bekannt:

Massenstrom des Verdichters	$\dot{m}$	=	50 $\frac{kg}{s}$
Verdichtereintrittsdruck	$p_E$	=	2,0 bar
Druckverhältnis des Verdichters	$\pi$	=	8
Verdichtereintrittstemperatur	$T_E$	=	60 °C
Durchmesser der zuführenden Rohrleitung	$d$	=	1000 mm
Isentroper Wirkungsgrad	$\eta_s$	=	0,85
Spezifische Wärmekapazität	$c_p$	=	1004,5 $\frac{J}{kg K}$
Isentropenexponent	$\kappa$	=	1,4

### Annahmen:

1. Die Stufen sind als Repetierstufen ausgeführt, so dass für die Absolutgeschwindigkeiten am Ein- bzw Austritt gilt:  $c_A = c_E$
2. Das Medium Luft kann als ideales Gas angenommen werden
3. Die Zustandsänderung im Verdichter kann als adiabat betrachtet werden.

### Aufgaben:

- a) Bestimmen Sie die Leistung, die notwendig ist um das geforderte Druckverhältnis sowie den Massendurchsatz zu erreichen. (4 Punkte)
- b) Die Axialgeschwindigkeit in den Rohrleitungen nach dem Verdichter soll trotz der Verdichtung gleich der Axialgeschwindigkeit vor dem Verdichter sein. Berechnen Sie hierfür den notwendigen Durchmesser der Rohrleitung am Austritt. (6 Punkte)

## 5. Radialturbine

In Abbildung 3.1 wird schematisch der Aufbau einer Laufgruppe eines Abgasturbolader gezeigt.

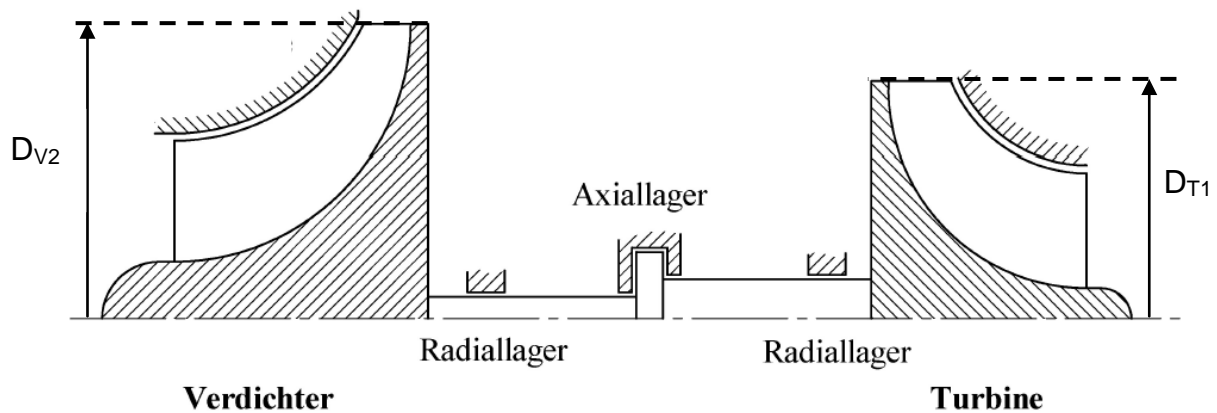


Abbildung 3.1: Abgasturbolader

Bei der Abgasturboaufladung wird ein Teil der an sich verlorenen Abgasenergie zum Antrieb einer Turbine genutzt. Der Abgasmassenstrom  $\dot{m}_T$  wird über eine Radialturbine entspannt, um einen radialen Verdichter anzutreiben. Der Radialverdichter wiederum saugt den Luftmassenstrom  $\dot{m}_V$  zur Verbrennung an, um sie dem Motor verdichtet zuzuführen. Die folgende Abmessungen und Strömungszustände sind gegeben:

<b>Verdichter</b>	
Drehzahl	$n = 167.000 \text{ 1/min}$
Luftmassenstrom	$\dot{m}_V = 0,1 \text{ kg/s}$
Polytroper Stufenwirkungsgrad	$\eta_V = 0,75$
Totaltemperatur am Verdichtereintritt	$T_{\text{tot},V1} = 298 \text{ K}$
Totaldruck am Verdichtereintritt	$p_{\text{tot},V1} = 100.000 \text{ Pa}$
Totaldruck am Verdichteraustritt	$p_{\text{tot},V2} = 220.000 \text{ Pa}$
Mach-Zahl am Verdichteraustritt	$Ma_{V2} = 0,1$
Austrittsdurchmesser des Verdichters	$D_{V2} = 60 \text{ mm}$
Isentropenexponent	$\kappa = 1,4$
Gaskonstante von Luft (id. Gas)	$R = 287 \text{ J/kgK}$

### Annahmen:

1. Luft kann als ideales Gas angenommen werden.
2. Die Zustandsänderung im Verdichter kann als adiabat und polytrop betrachtet werden.
3. Die Absolutgeschwindigkeit bleibt über die Stufe **nicht** konstant! Der kinematische Anteil bei der Bestimmung von Druck, Temperatur und Enthalpie kann nicht vernachlässigt werden.

**Aufgaben:**

- a) Bezeichnen Sie die Strömungsrichtungen (Verdichter und Turbine) sowie die Ein- und Austrittsebenen in Abbildung 3.1. (2 Punkte)

$V_1$ : Verdichter-Eintritt

$V_2$ : Verdichter-Austritt

$T_1$ : Turbinen-Eintritt

$T_2$ : Turbinen- Austritt

- b) Zeichnen Sie zunächst rein qualitativ in das  $h,s$ -Diagramm von Verdichter und Turbine den Verlauf der isentropen und polytropen statischen Zustandsänderungen zwischen den Ebenen  $V_1$  und  $V_2$  bzw.  $T_1$  und  $T_2$ . Verwenden Sie die nachstehenden Beschriftungen zur Kennzeichnung der Verläufe. (2 Punkte)

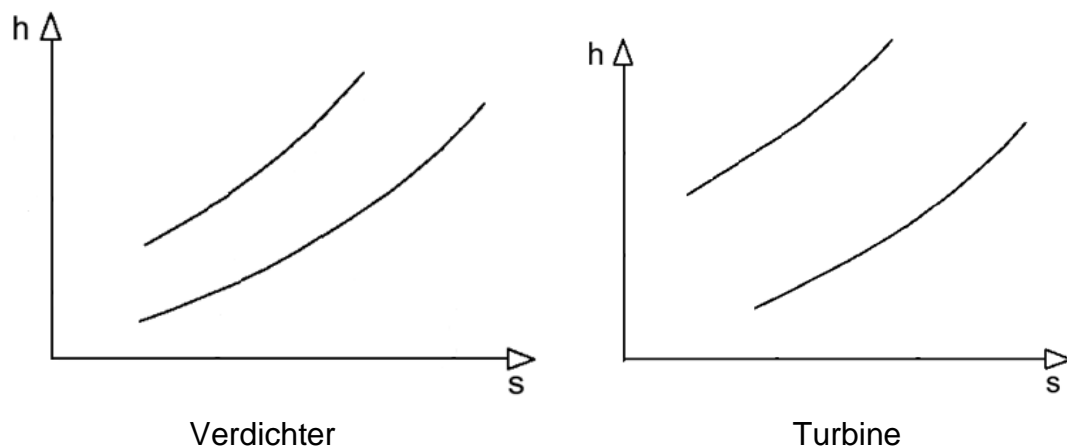
Verdichterbeschriftung:  $V_1, V_2, V_{2s}$

Turbinenbeschriftung:  $T_1, T_2, T_{2s}$

Bezeichnen Sie zudem die eingezeichneten Druckverläufe und sowie die zu den Ein- und Austrittszustände zu gehörigen Größen. Verwenden Sie die nachstehenden Beschriftungen zur Kennzeichnung der Verläufe und Größen. ( $s$ =isentrop) (3 Punkte)

Verdichterbeschriftung:  $p_{tot,V1}, p_{tot,V2}, h_{tot,V1}, h_{tot,V2}, h_{tot,V2s}$

Turbinenbeschriftung:  $p_{tot,T1}, p_{tot,T2}, h_{tot,T1}, h_{tot,T2}, h_{tot,T2s}$



- c) Berechnen Sie zunächst die spezifische Stufenarbeit des Verdichters  $y_V$  unter Berücksichtigung des polytropen Stufenwirkungsgrads. (8 Punkte)
- d) Berechnen Sie den Volumenstrom am Austritt der Verdichterstufe  $\dot{V}_{V2}$  mit den statischen Zustandsgrößen unter Berücksichtigung, dass die Mach-Zahl am Verdichteraustritt  $Ma_{V2} = 0,1$  beträgt. (8 Punkte)
- e) Berechnen Sie mit dem größten Rotordurchmesser  $D_B$  die spezifische Drehzahl  $\sigma_{M,V}$  sowie den spezifischen Durchmesser  $\delta_{M,V}$  für den Verdichter. (4 Punkte)



- f) Zeigen Sie anhand des Cordier-Diagrammes (Abbildung 3.2), ob die Wahl des Verdichterrades geeignet ist und geben sie gegebenenfalls einen Verbesserungsvorschlag, bei dem sowohl die Drehzahl  $n$ , der Volumenstrom  $\dot{V}_{V2}$  als auch die spezifische Stufenarbeit  $y_V$  gleich bleiben. (2 Punkte)

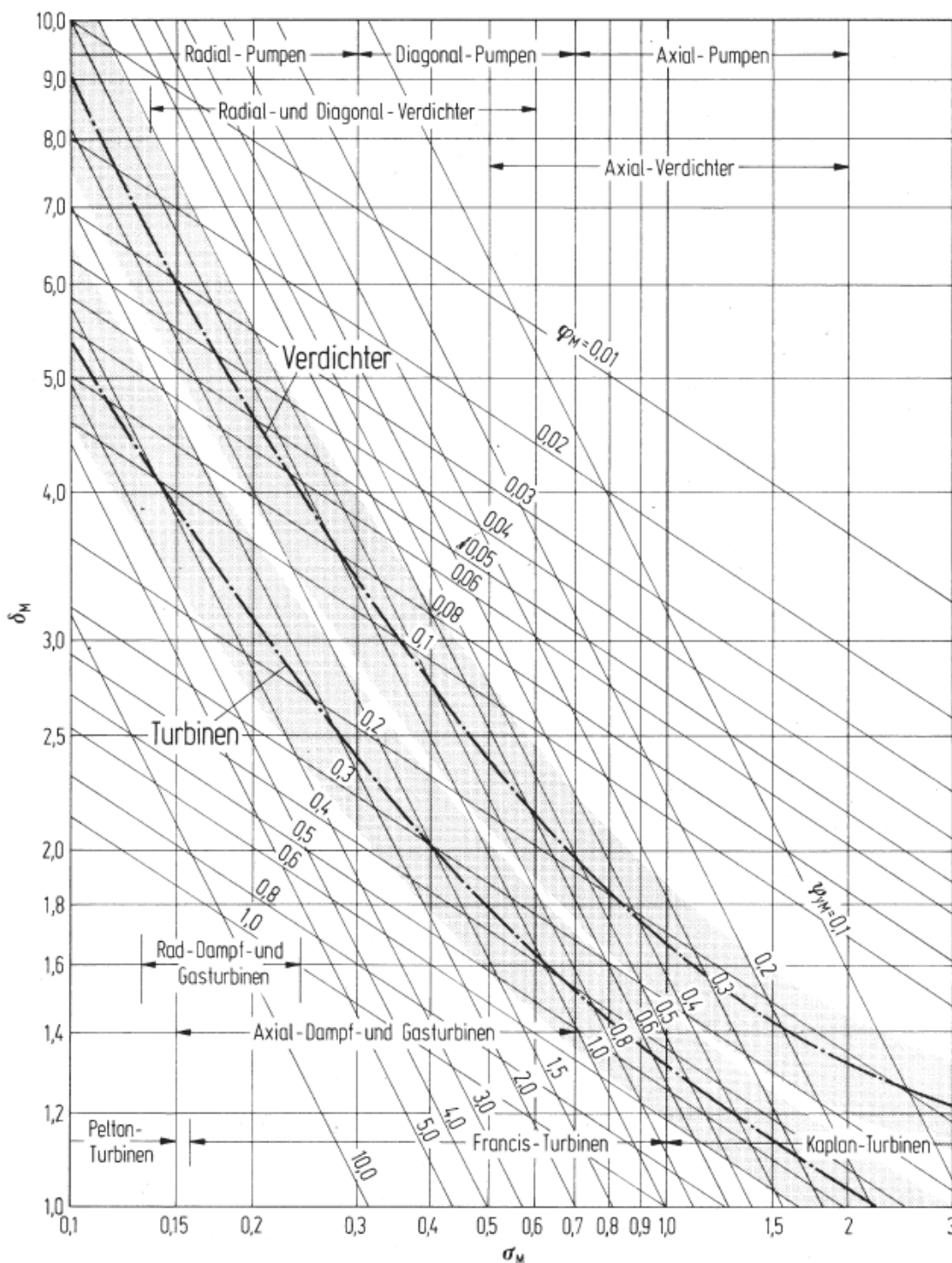


Abbildung 3.2: Cordier-Diagramm