

Klausur
Strömungsmaschinen I
WiSe 2008/09

17. Februar 2009, Beginn 14:00 Uhr

Prüfungszeit: 90 Minuten

Zugelassene Hilfsmittel sind:

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

Andere Hilfsmittel, insbesondere:

- Alte Klausuren
- Übungen der Vorlesung
- Handy, Laptop, Fachbücher

sind nicht zugelassen.

Aufgabe	geschätzte Dauer	Punkte
1. Abgasturbolader	15 min	38
2. Radiales Gleichgewicht: Axialverdichter	25 min	30
3. Axialturbine mit Vorleitapparat	35 min	61
Gesamt	75 min	129

Name, Vorname:

Matrikelnummer:

Wir wünschen Ihnen viel Erfolg!
Prof. J. Seume
A. Mohseni

1. Abgasturbolader

Bild 1 zeigt schematisch einen einfachen Abgasturbolader, in dem das Abgas aus einem Verbrennungsmotor, mit Massendurchsatz \dot{m}_T , betreibt eine radiale Turbine gekuppelt mit einem Radialverdichter, der bereitet die Umgebungsluft mit Massendurchsatz \dot{m}_V für den Motor vor. Das Abgas wird nach der Turbine in die Atmosphäre freigegeben.

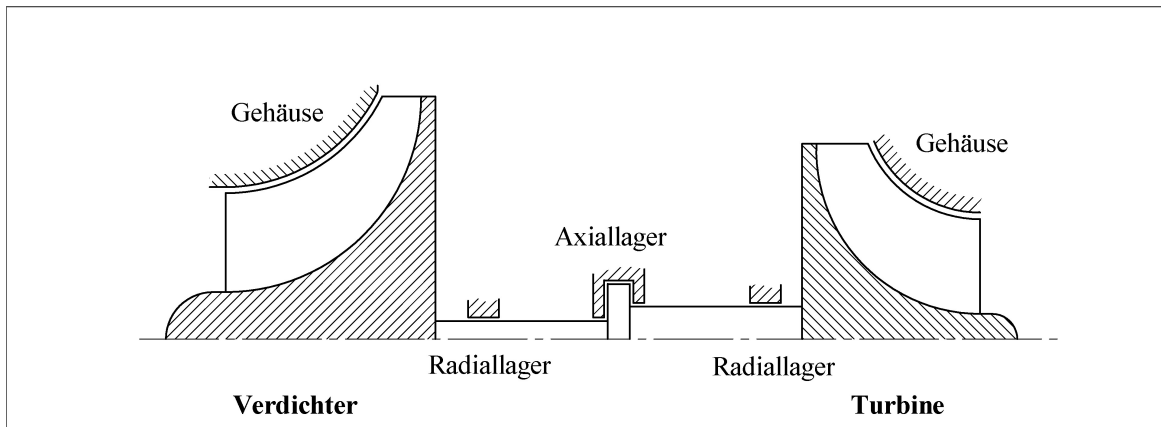


Bild 1: Abgasturbolader

Die folgenden Strömungszustände sind gegeben:

Verdichter - Austritt:		
Statische Temperatur	$T_{V2} =$	150 °C
Statischer Absolutdruck	$P_{V2} =$	2,4 bar
Turbine - Eintritt:		
Statische Temperatur	$T_{T1} =$	600 °C
statischer Absolutdruck	$P_{T1} =$	3,3 bar
Turbine - Austritt:		
Statische Temperatur	$T_{T2} =$	450 °C
Umgebung:		
Temperatur	$T_U =$	25 °C
Absolutdruck	$p_U =$	1 bar

Die Strömung wird in der Turbine beschleunigt. Von daher ist die Strömungsgeschwindigkeit am Austritt des Laufrads größer als Eintritts, $c_{T2} > c_{T1}$.

Annahmen:

1. Strömungsvorgang erfolgt adiabat.
2. Alle verlustbehafteten Strömungsvorgänge sind polytrop mit Polytropenexponenten größer als 1.

Aufgaben:

- a) Bezeichnen Sie die Strömungsrichtungen (Verdichter und Turbine) und die Eintritts- und Austrittsebenen auf dem Bild 1:
- V1: Verdichter - Eintritt
 - V2: Verdichter - Austritt
 - T1: Turbine - Eintritt
 - T2: Turbine - Austritt
- b) Mit der Berücksichtigung der Verluste am Eintritt des Verdichters und am Austritt der Turbine, ordnen Sie nach der Größe und mit Begründung die folgenden Drücke und Temperaturen:
1. $p_U, p_{V1}, p_{tot,V1}$
 2. $T_U, T_{V1}, T_{tot,V1}$
- c) Zeichnen Sie schematisch das h-s-Diagramm von dem Verdichter und der Turbine in einem Diagramm. Die relative Position zwischen der Verdichterkurve und der Turbinenkurve soll nur entlang h-Achse (und nicht s-Achse) bestimmen. Zu bezeichnen und kennzeichnen sind:
1. Die relevanten Drucklinien,
 2. Die isentrope statische Zustandsänderung zwischen den Ebenen V1 und V2 bzw. T1 und T2.
 3. Die polytrope statische Zustandsänderung zwischen den Ebenen V1 und V2 bzw. T1 und T2.
 4. Die polytrope Totalzustandsänderung zwischen den Ebenen V1 und V2 bzw. T1 und T2.
 5. Kinetische Energie an den Ebenen V1, V2, T1 und T2.
- d) Welche Bedingung muss zwischen den Totalenthalpieänderungen ($h_{tot,V2} - h_{tot,V1}, h_{tot,T2} - h_{tot,T1}$), den Massendurchsätzen (\dot{m}_V, \dot{m}_T) und dem Lagerverlusten, \dot{W}_{Lager} , bei stationärem Betrieb erfüllt werden? (Annahme: Alle anderen Verluste (außer dem Lagerverlust) können vernachlässigt werden.)

2. Radiales Gleichgewicht: Axialverdichter

Die folgende Abbildung zeigt schematisch eine Stufe eines Axialverdichters.

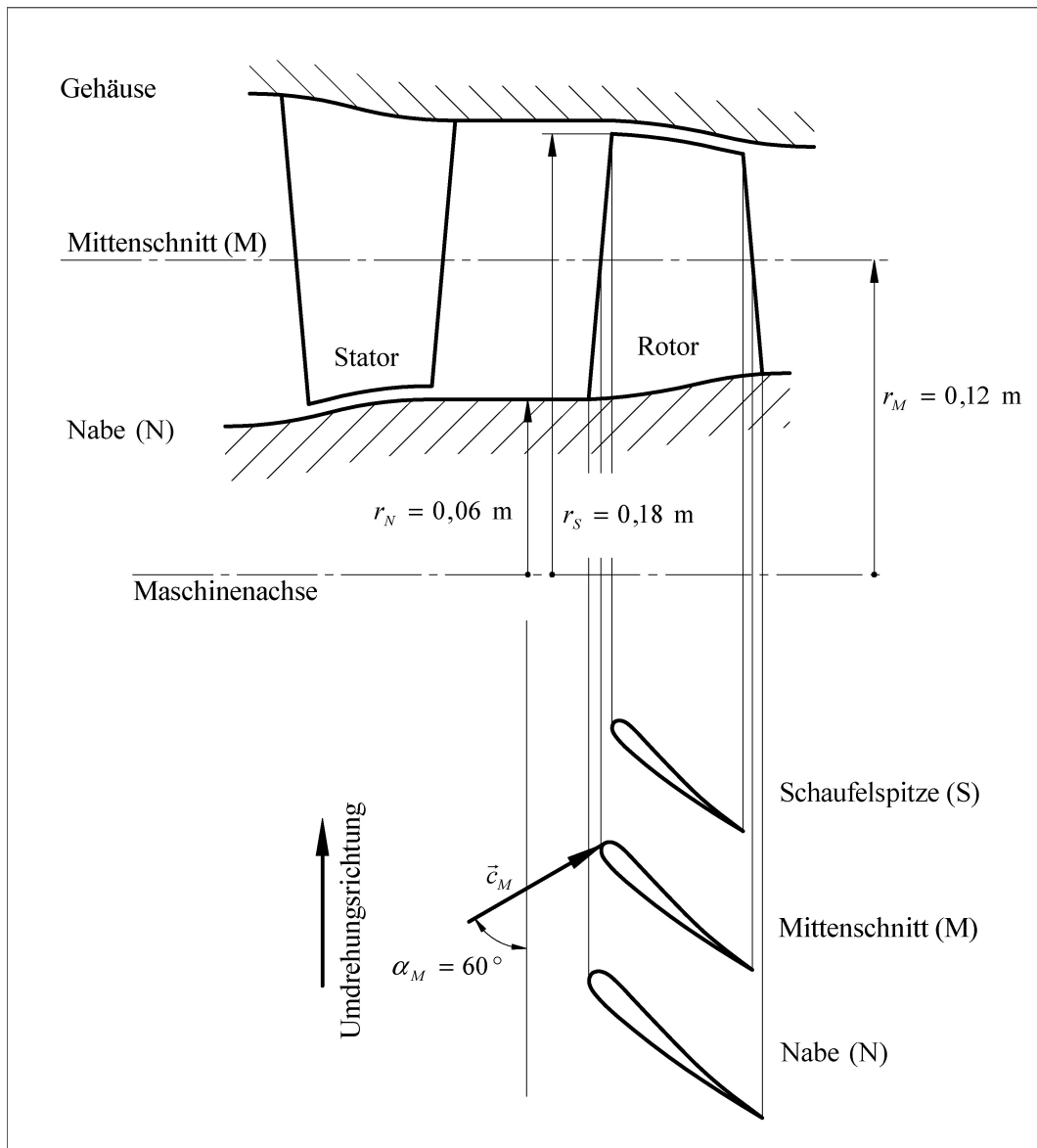


Bild 1

Die folgenden Abmessungen und Strömungszustände sind für die Axialspalte zwischen dem Stator und dem Rotor gegeben:

Drehzahl	$n = 25000$ / min
absolute Strömungsgeschwindigkeit im Mittenschnitt	$c_M = 300$ m/s
absoluter Strömungswinkel im Mittenschnitt	$\alpha_M = 60^\circ$
statische Temperatur (konstant in radialer Richtung)	$T = 395$ K
Isentropenexponent	$\kappa = 1,4$
Gaskonstante	$R = 287$ J/(kg · K)

- Die Winkel beziehen sich auf die Umfangsrichtung.
- Die Radien r_N and r_S sind in der Axialspalte zwischen dem Stator und Rotor konstant.
- Medium: Luft, angenommen als ideales Gas.
- Annahmen:
 1. Die Strömung im Mittenschnitt folgt den Schaufeln (Inzidenzwinkel gleich Null).
 2. Die Verdichtung erfolgt adiabatisch.
 3. Die Meridianstromlinien sind parallel zur Maschinenachse (d.h. die Geschwindigkeitsvektoren haben keinen radialen Komponenten).
- Die Umfangskomponente der absoluten Geschwindigkeit c_u hat die folgende radiale Verteilung:

$$c_u \cdot \sqrt{r} = K = \text{const.} \quad (c_u \text{ ist eine Funktion vom Radius } r) \quad (1)$$

Aufgaben:

- a) Bestimmen Sie die Änderung der Axialgeschwindigkeit c_{ax} in radialer Richtung. (Zur Lösung siehe die Formelsammlung)
- b) Berechnen Sie die Umfangs- und die Axialgeschwindigkeit an der Schaufelspitze $c_{u,S}$ und $c_{ax,S}$.
- c) Mit der Annahme, dass die statische Temperatur in radialer Richtung konstant ist, berechnen Sie das Druckverhältnis zwischen der Schaufelspitze und dem Mittenschnitt, $\frac{p_S}{p_M}$. (Zur Lösung siehe die Formelsammlung)

3. Axialturbine mit Vorleitapparat

Bild 1 zeigt schematisch ein kleines Triebwerk, in dem ein Gaserzeuger betreibt eine einstufige Nutzturbine gekoppelt mit einem Generator. Die Nutzturbine erhält Energie aus dem Gaserzeuger, der mechanisch nicht gekuppelt ist.

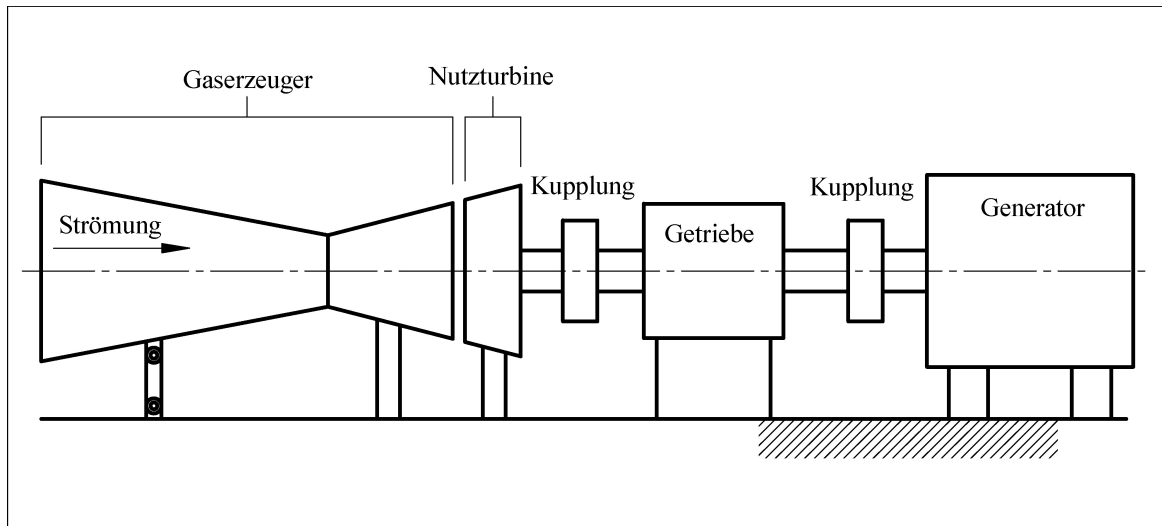


Bild 1: Schematische Darstellung eines kleinen Triebwerks

Um die Drehzahl vom Generator bei variierendem Leistungsbedarf konstant zu halten, hat die Nutzturbine ein Vorleitgitter, Bild 2.

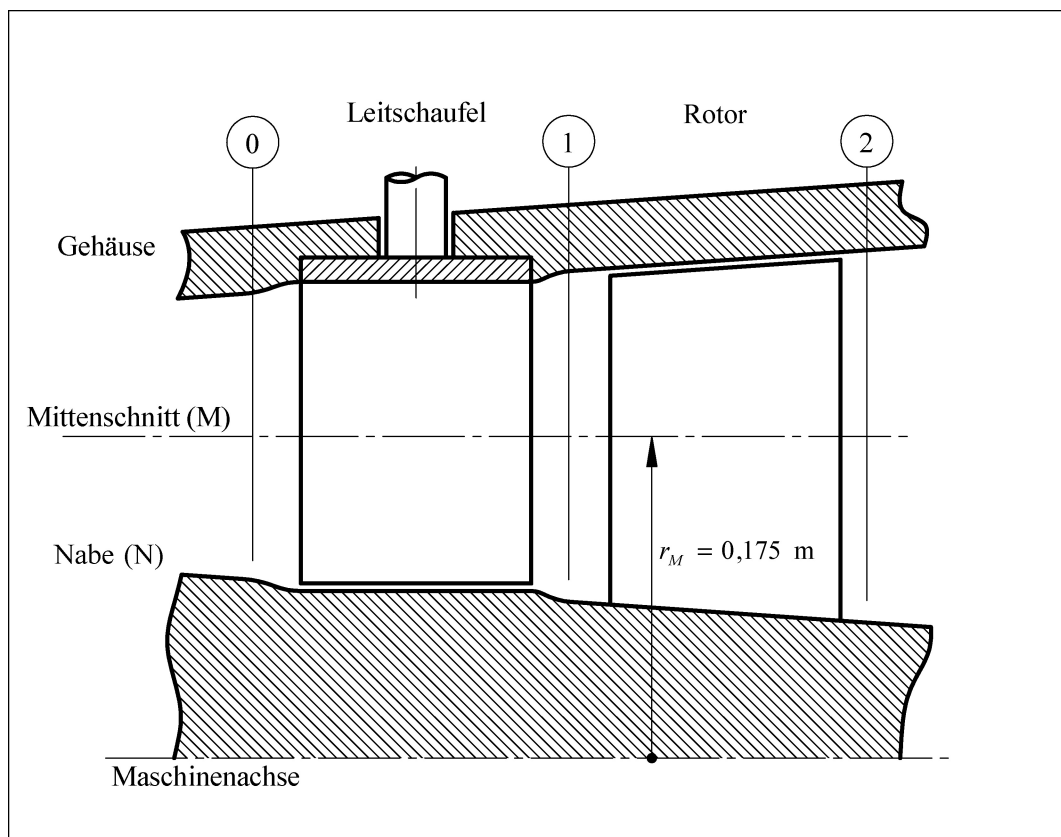


Bild 2: Die Nutzturbine

Die folgende Abmessungen und Strömungszustände sind für die Nutzturbine gegeben:

Drehzahl	n	=	9000	/ min
Massendurchsatz	\dot{m}	=	10	kg/s
statische Dichte am Eintritt (konstant in radialer Richtung)	ρ_0	=	1,5	kg/m ³
Zuströmungswinkel (drallfrei)	α_0	=	90°	
Austrittswinkel der Leitschaufel	$35^\circ \leq \alpha_1 \leq 45^\circ$			
Strömungswinkel am Austritt des Laufrads	β_2	=	45°	
Mittlerer Radius des Strömungskanals	r_M	=	175	mm
Querschnitt – Ebene 0	A_0	=	0,04255	m ²
Querschnitt – Ebene 1	A_1	=	0,04948	m ²
Querschnitt – Ebene 2	A_2	=	0,05641	m ²
Eintrittstotaltemperatur, Vorleitgitter/Leitschaufel	$T_{tot,0}$	=	770	K
Statischer Absolutdruck am Austritt des Laufrads	p_2	=	1,1	bar
gesamter isentroper Wirkungsgrad (zwischen den Ebenen 0 und 2) basierend auf statischen Größen (konstant für $35^\circ \leq \alpha_1 \leq 45^\circ$)	$\eta_{s,ges}$	=	75%	
spezifische Wärmekapazität	C_p	=	1142	J/(kg · K)
Gaskonstante	R	=	287	J/(kg · K)

Der Abströmwinkel von Leitschaufeln wird durch einen Vorleitapparat so geregelt, dass die Drehzahl des Generators konstant bleibt.

Annahmen:

1. Außer in Ebene 0 folgt die Strömung den Schaufeln (Inzidenzwinkel gleich Null).
2. Die Zuströmung zu Ebene 0 ist drallfrei.
3. Das Medium kann als ideales Gas angenommen werden.
4. Strömungskanal hat konstanten Mittenschnittradius.
5. Die Winkel beziehen sich auf die Umfangsrichtung.
6. Strömungszustände sind in radialer Richtung gleichförmig.
7. Strömungsvorgang erfolgt adiabat.
8. Die Strömungsverluste in Leitschaufeln können vernachlässigt werden. Von daher gilt $T_{tot,1} = T_{tot,0}$.
9. Die Umfangsgeschwindigkeit in allen Ebenen kann konstant und gleich der Umfangsgeschwindigkeit im Mittenschnitt u_M angenommen wird.

Aufgaben:

a) Für eine negative c_{u2} skizzieren Sie schematisch das Schaufelprofil für ein Leitrad und ein Laufrad. Zu bezeichnen und zu kennzeichnen sind:

1. eine Leitschaufel gefolgt von einer Laufschaufel,
2. „Leitrad“ und „Laufrad“ Bezeichnung,
3. die Ebenen 0, 1 und 2.
4. Umdrehungsrichtung,
5. Strömungsrichtung, absolut am Eintritt der Leitschaufel.
6. die Strömungswinkel α_0 , α_1 , β_1 und β_2 ,

b) Für den Aufgabeteil (a), zeichnen Sie die Geschwindigkeitsdreiecke in Ebenen 1 und 2. Zu bezeichnen und kennzeichnen sind:

1. die Geschwindigkeiten \vec{c}_1 , \vec{c}_2 , \vec{w}_1 , \vec{w}_2 , \vec{u}_1 and \vec{u}_2 ,
2. die Winkel α_1 , α_2 , β_1 und β_2 .

c) Berechnen Sie die Umfangsgeschwindigkeit in Mittenschnitt, u_M , und die axiale Geschwindigkeit in Ebene 0, $c_{ax,0}$.

d) Die Änderung der statischen Temperatur in Ebene 1 mit dem Austrittswinkel der Leitschaufel α_1 ist:

$$T_1 = \frac{770 (\alpha_1 - 0,14)^2}{(\alpha_1 - 0,14)^2 + 0,00866} \quad , \quad \text{hier } T_1 [\text{K}] \text{ und } \alpha_1 [\text{rad}] \quad (1)$$

Bestimmen Sie die Leistung der Nutzturbine als eine Funktion des Abströmwinkels der Leitschaufel, $\dot{W} = f(\alpha_1)$.

e) Berechnen Sie den Reaktionsgrad, hier:

$$r_k = \text{Reaktionsgrad} = \frac{\text{statische Enthalpieänderung im Laufrad}}{\text{statische Enthalpieänderung in der Stufe}} \quad (2)$$

für $\alpha_1 = 40^\circ$.