

# Klausur Strömungsmaschinen I

WiSem 2014/2015

3. März 2015, Beginn 14:00 Uhr

Prüfungszeit: 90 Minuten

Zugelassene Hilfsmittel sind:

- Taschenrechner
- Geodreieck
- Zeichenmaterial
- gestellte Formelsammlung

Andere Hilfsmittel, insbesondere:

- alte Klausuren
- Übungsunterlagen, Skript, Folienumdruck, eigene Formelsammlung
- Handy, Laptop, Fachbücher

sind nicht zugelassen.

Anmerkungen zur Bearbeitung:

- Verwenden Sie dokumentenechte Stifte (nicht rot!).
- Rechen- und Lösungswege sind darzustellen.
- Annahmen sind kenntlich zu machen.
- Zwischen- und Endergebnisse sind deutlich hervorzuheben.

Aufgabe	Geschätzte Dauer	mögliche Punkte	erreichte Punkte
1. Verständnisfragen	40 min	39	
2. Axialverdichter	20 min	22,5	
3. Radialverdichter	20 min	21	
Gesamt	80 min	82,5	

Name, Vorname: .....

Matrikelnummer: .....

**Wir wünschen Ihnen viel Erfolg!**

**Dr.-Ing. Florian Herbst**

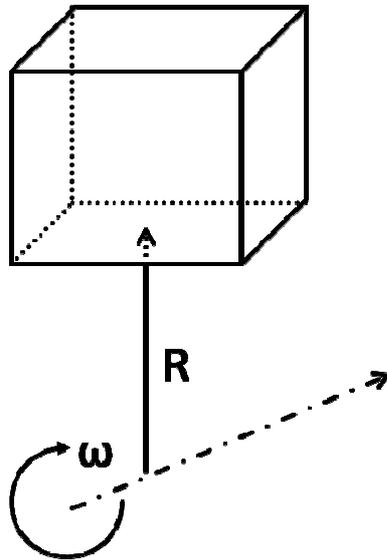
**Dr.-Ing. Arne Vorreiter**

**Dipl.-Ing. Lutz Schwerdt**

**Sönke Teichel, M.Sc.**

## Aufgabe 1 – Verständnisfragen

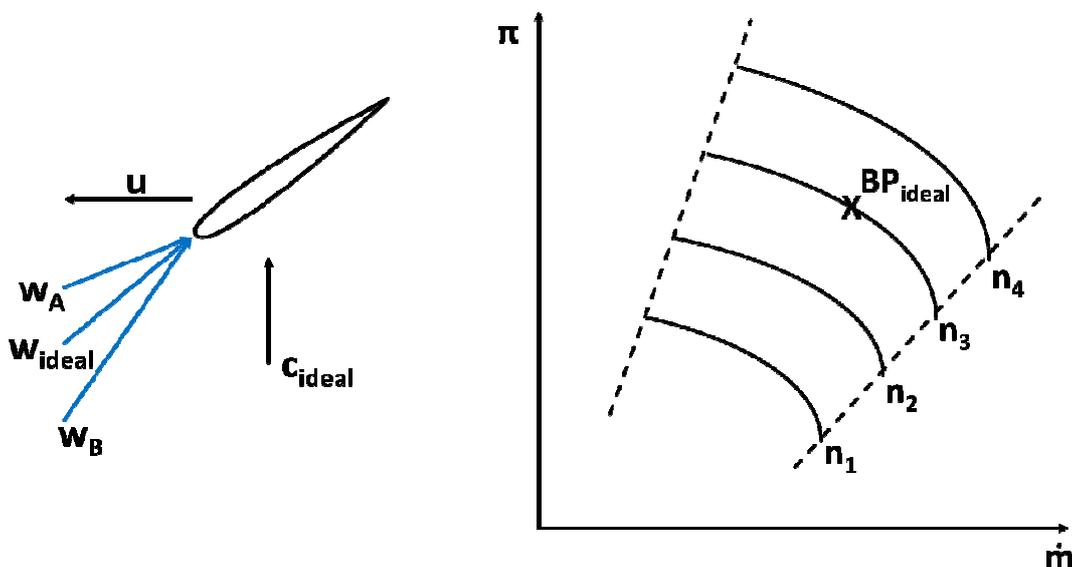
1.1 Welche Kräfte stehen beim Radialen Gleichgewicht im Gleichgewicht? Zeichnen Sie diese in die Skizze des Fluidelements ein! (3 Punkte)



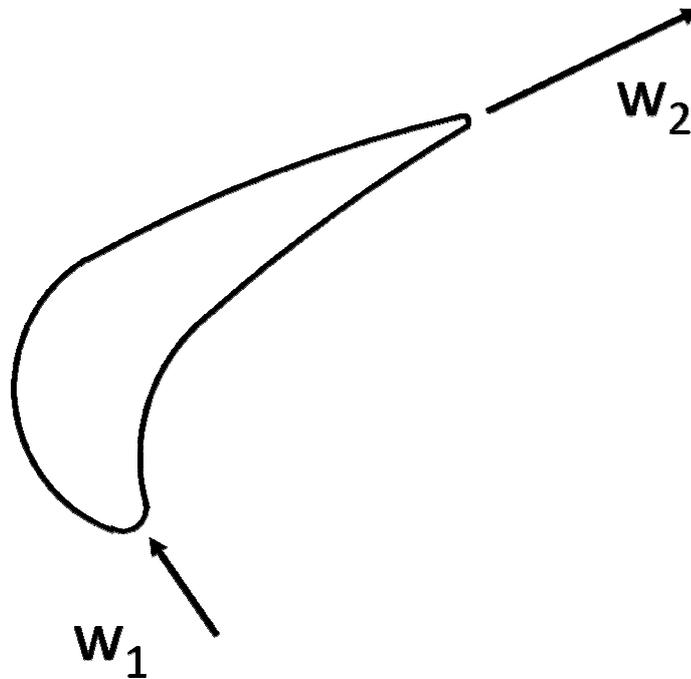
1.2 Im Auslegungspunkt eines Verdichters ( $BP_{ideal}$ ) wird das Profil mit der relativen Strömungsgeschwindigkeit  $w_{ideal}$  angeströmt. Die relativen Anströmungen  $w_A$  und  $w_B$  entsprechen den Betriebspunkten  $BP_A$  und  $BP_B$  auf der gleichen Drehzahllinie wie  $BP_{ideal}$ .

Zeichnen Sie die Betriebspunkte  $BP_A$  und  $BP_B$  qualitativ in das unten rechts stehende Verdichterkennfeld ein.

Markieren und benennen Sie zusätzlich die Grenzen des Verdichterkennfeldes, für hohe und geringe Massenströme. (3 Punkte)



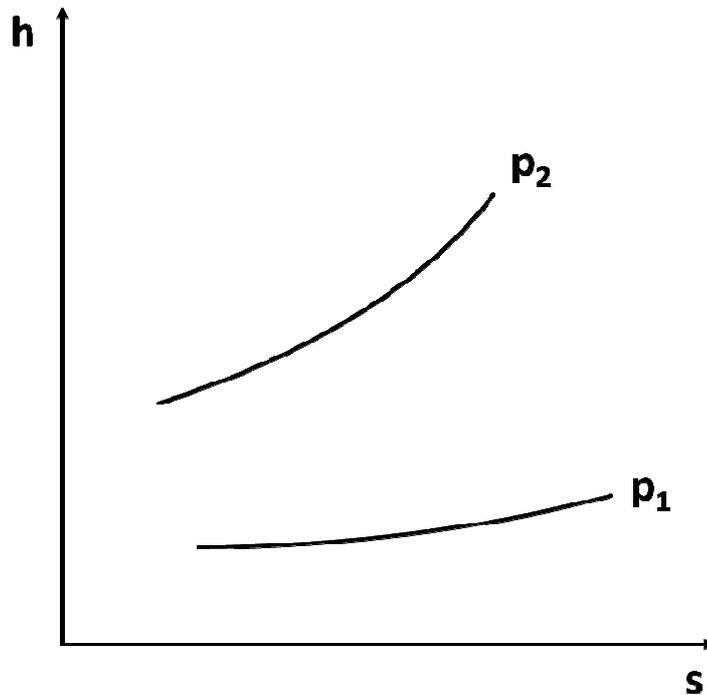
- 1.3 Gegeben sind ein Rotor-Schaufelprofil und die Strömungsvektoren der relativen Strömung  $w_1$  und  $w_2$ . Begründen Sie warum es sich um ein Turbinen- oder Verdichterprofil handelt. Zeichnen Sie die Drehrichtung sowie die Druck- und die Saugseite ein. (3 Punkte)



- 1.4 Verdichter benötigen für das gleiche Druckverhältnis deutlich mehr Stufen als Turbinen. Begründen Sie diesen Umstand physikalisch. (1 Punkt)

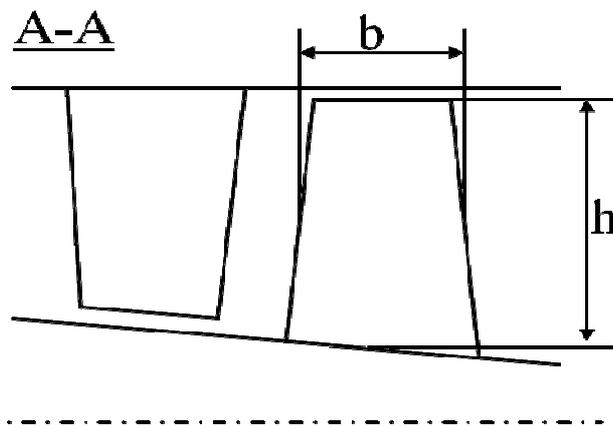
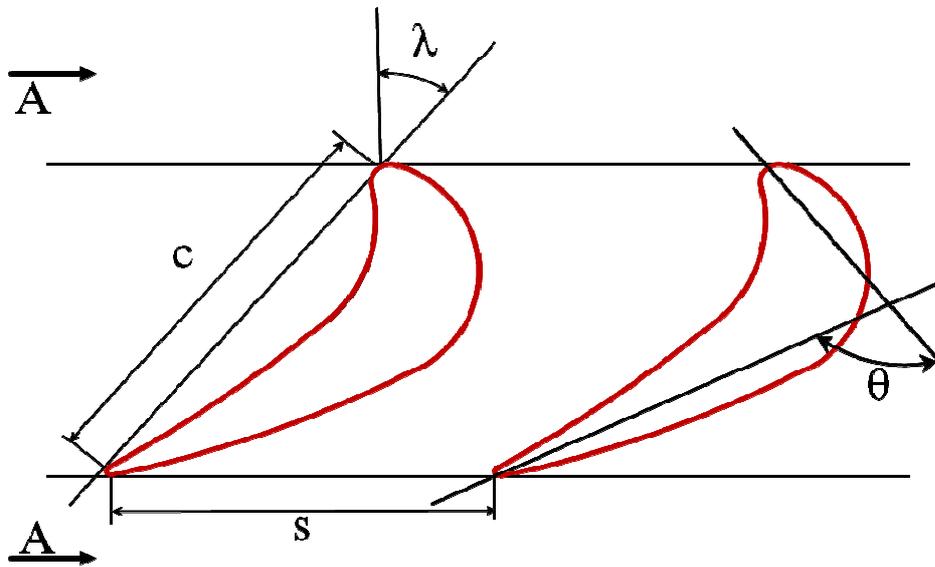
1.5 Gezeigt ist das h-s-Diagramm eines Verdichterlaufrades. Tragen Sie die folgenden Größen in das Diagramm ein und kennzeichnen Sie die Zustandsänderungen! Definieren Sie den isentropen Verdichterwirkungsgrad! (9 Punkte)

$$\frac{c_2^2}{2}, h_1, \Delta h, h_2, \frac{c_1^2}{2}, h_{tot,2}, \Delta h_s, h_{tot,1}$$



1.6 Was ist der Unterschied zwischen der Grenzschichtdicke  $\delta$  und der Verdrängungsdicke  $\delta_1$ ? Beschreiben oder skizzieren Sie die Definition der beiden Größen! (2 Punkte)

1.7 Tragen Sie die Bezeichnungen der in den unten gezeigten Abbildungen markierten Parameter (deutsch oder englisch) einer Turbinenschaufelreihe in die Tabelle ein. (3 Punkte)



$\lambda$	
c	
s	
$\theta$	
b	
h	



1.9 Die Unterscheidung zwischen absoluten- und relativen Strömungsgeschwindigkeiten, wie Sie bei der Betrachtung der Schaufelreihen von Strömungsmaschinen üblich ist, ist auch für andere Anwendungsfälle relevant. Ein Beispiel ist das Segeln. Bei der Fahrt quer zur Windrichtung (Halbwindkurs) führt die Fahrtgeschwindigkeit des Segelbootes (Relativsystem) zu einer Abweichung der Anströmung des Segels gegenüber der tatsächlichen Windrichtung im Absolutsystem (siehe Abbildung 1). (7,5 Punkte)

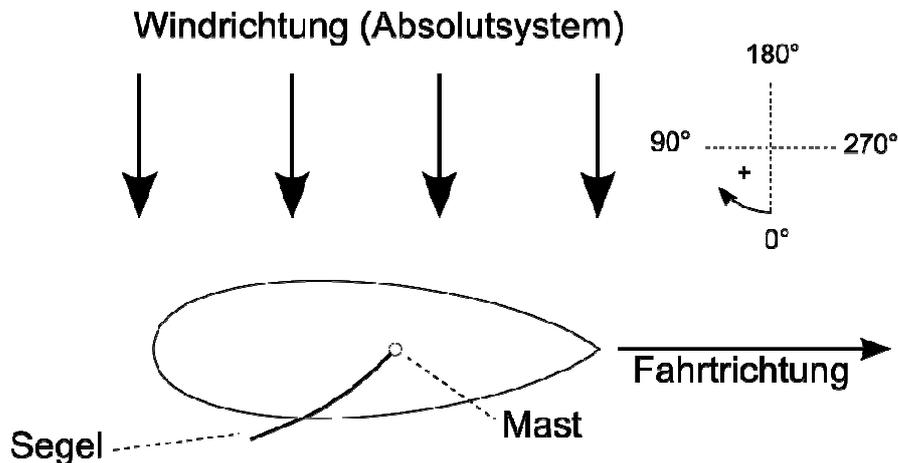


Abbildung 1: Segelboot

**Annahmen**

- Die Winkel sind entsprechend des Koordinatenkreuzes im Bild senkrecht zur Fahrtrichtung und im Uhrzeigersinn positiv definiert.
- Das Segel wird als ein Schaufelprofil betrachtet.
- Die Vortriebswirkung beruht alleine auf der Profilform des Segels, der Windwiderstand wird vernachlässigt.

**Gegeben:**

Windgeschwindigkeit im Absolutsystem	8 m/s
Windrichtung im Absolutsystem	0°
Anströmwinkel des Segels	60°

**Aufgaben**

- 1.9.1 Bestimmen Sie die Geschwindigkeit des relativen Windes. (2 Punkte)
- 1.9.2 Bestimmen Sie die Fahrtgeschwindigkeit des Bootes. (2 Punkte)
- 1.9.3 Zeichnen Sie qualitativ das Geschwindigkeitsdreieck der Anströmung des Segels und bezeichnen Sie alle relevanten Geschwindigkeiten. (3 Punkte)
- 1.9.4 Welcher Anströmwinkel des Segels muss gewählt werden um bei unverändertem Wind im Absolutsystem und gleicher Fahrtrichtung die Fahrtgeschwindigkeit auf 6 m/s zu reduzieren? (2 Punkte)

## Aufgabe 2 – Axialverdichter

Die erste Stufe des 4-stufigen Hochgeschwindigkeits-Axialverdichters am TFD wurde im Auslegungsbetriebspunkt vermessen. Die zugehörigen Größen sind in der Tabelle dargestellt. In dieser Aufgabe wird nur die erste Laufschaufelreihe LA1 betrachtet.

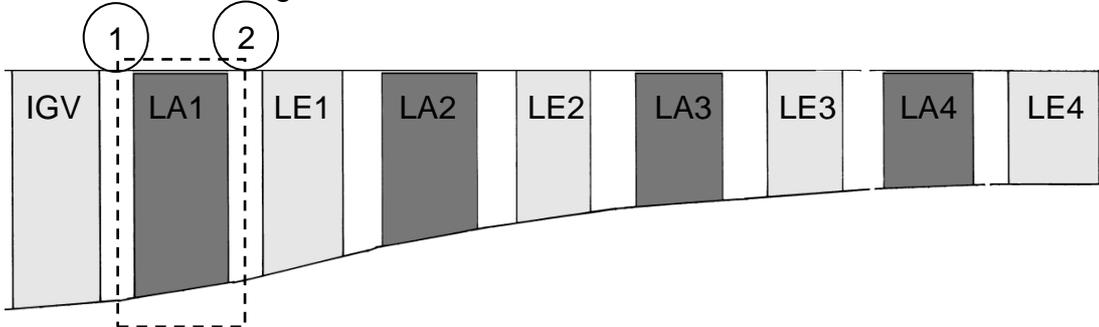


Abbildung 2: Seitenschnitt des 4-stufigen Axialverdichters

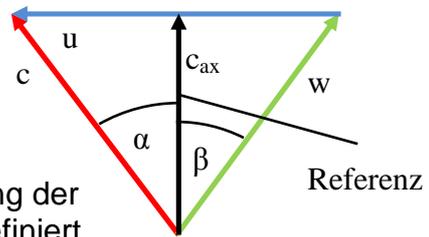
Parameter	Zeichen	Einheit	Wert
Massenstrom	$\dot{m}$	kg/s	8,2
Drehzahl	$n$	$\text{min}^{-1}$	18.000
Austrittswinkel des IGV	$\alpha_{1,m}$	$^\circ$	10
Eintrittstemperatur LA1	$T_1$	$^\circ\text{C}$	15
Austrittstemperatur LA1	$T_2$	$^\circ\text{C}$	40
Spez. Totalenthalpieänderung	$\Delta h_{\text{total}}$	J/kg	25112,5
Eintrittsdruck stat LA1	$p_1$	bar	0,5
Spez. Gastkonstante	$R_s$	J/(kg·K)	287
Isentropenexponent	$\kappa$	-	1,4
Mittlerer Radius am Eintritt LA1	$R_{1,m}$	mm	130
Mittlerer Radius am Austritt LA1	$R_{2,m}$	mm	135
Fläche am Austritt LA1	$A_2$	$\text{m}^2$	$63,62 \cdot 10^{-3}$
Axialgeschwindigkeit am Eintritt LA1	$c_{1,ax,m}$	m/s	207,6

### Randbedingungen:

- Das Prozess-Fluid wird als ideales Gas betrachtet.
- Das Laufrad verfügt nicht über eine drallfreie Anströmung, sondern wird durch ein Vorleitgitter (VLE/IGV) mit dem Eintrittswinkel  $\alpha_{1,m}$  angeströmt.
- Die Spaltverluste sind vernachlässigbar.
- Die Zustandsänderung wird als adiabat und isentrop betrachtet.
- Die spezifische Gaskonstante, die spezifische Wärmekapazität und der Isentropenexponent werden als konstant betrachtet.
- Radiale Strömungskomponenten werden vernachlässigt.

**Hilfen:** Definition der Strömungswinkel

Referenz: Rotationsachse



Die Umfangskomponenten und Winkel sind in Richtung der Umfangsgeschwindigkeit positiv, entgegen negativ definiert.

**Aufgabe:**

2.1 Berechnen Sie:

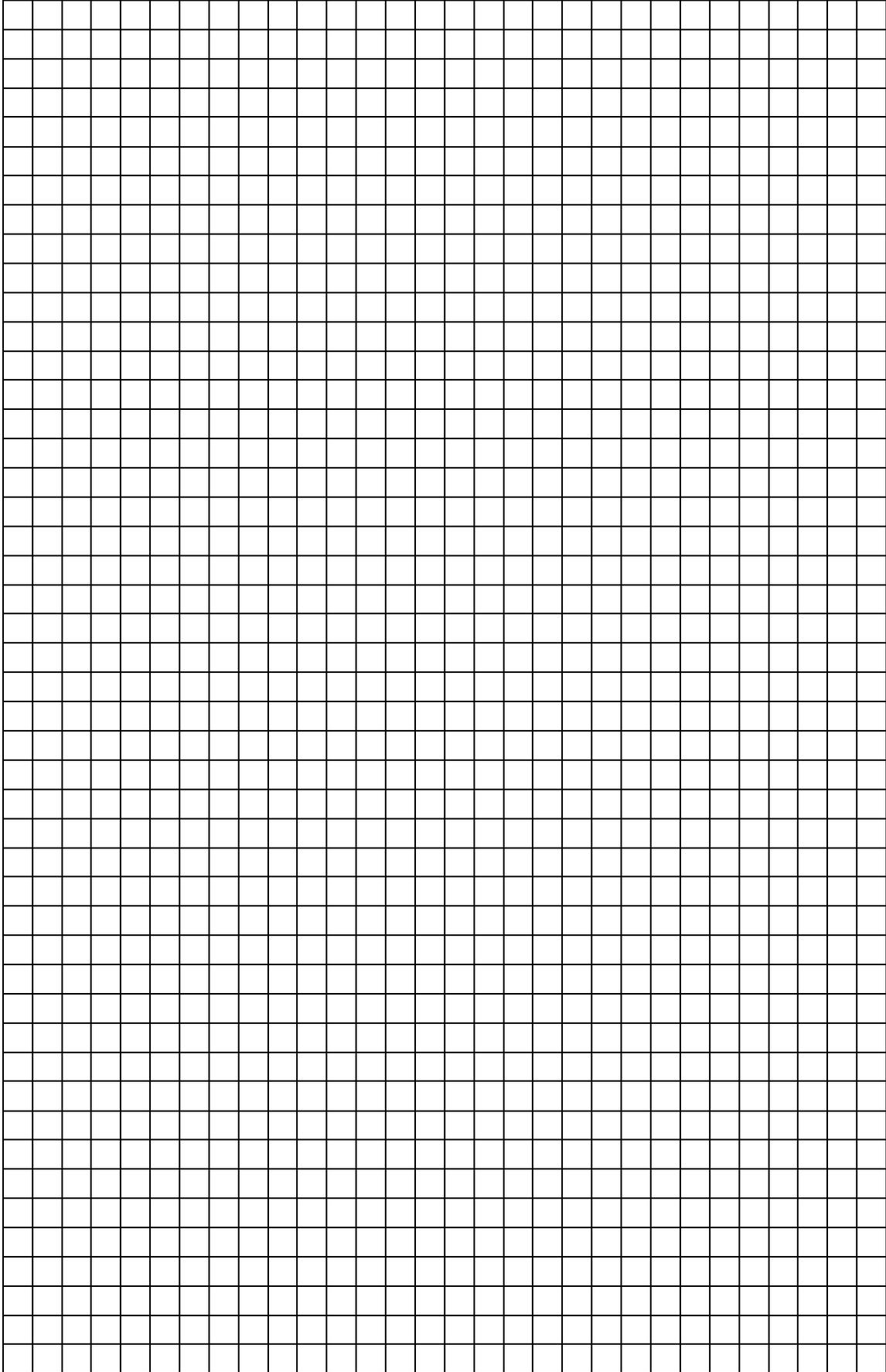
2.1.1 Am Eintritt der Laufschaufel LA1 im Mittenschnitt (Index: m) die Umfangsgeschwindigkeit  $u_{1,m}$ , sowie die Umfangskomponente  $c_{1,u,m}$  der absoluten Strömungsgeschwindigkeit!

2.1.2 Am Austritt der Laufschaufel LA1 im Mittenschnitt den Druck  $p_2$ , die Dichte  $\rho_2$ , die Axialgeschwindigkeit  $c_{2,ax,m}$  und die Umfangsgeschwindigkeit  $u_{2,m}$ , die absoluten und relativen Umfangskomponenten der Strömungsgeschwindigkeiten  $c_{2,u,m}$  bzw.  $w_{2,u,m}$  und den relativen Strömungswinkel  $\beta_{2,m}$ ! Zwischenschritte und Zwischenergebnisse werden ebenfalls bewertet und sind daher vollständig darzustellen. (12,5 Punkte)

2.2 Zeichnen Sie die Geschwindigkeitsdreiecke am Eintritt und am Austritt in die karierten Felder! (6 Punkte) Bitte Maßstab 1 cm  $\approx$  50 m/s verwenden.

2.3 Für einen Teillastbetriebspunkt wird der Massenstrom deutlich reduziert. Was sind die qualitativen Folgen (wird größer, wird kleiner, bleibt gleich) für folgende Größen? (4 Punkte)

$c_{ax,1}$	$\alpha_1$	$\beta_1$	Leistung P





### Aufgabe 3 – Radialverdichter

Am TFD wurde ein Radialverdichter ausgelegt und vermessen. Die Auslegung hat folgende theoretische Größen ergeben:

Parameter	Zeichen	Einheit	Wert
Massenstrom	$\dot{m}$	kg/s	0,5
Drehzahl	$n$	$\text{min}^{-1}$	120.000
Leistung	$P$	kW	31,7
<b>Geschwindigkeit am Eintritt</b>			
Umfangsgeschwindigkeit	$u_{1,m}$	m/s	204,2
Absolut			
Axialkomponente	$C_{1,ax,m}$	m/s	231,4
Umfangskomponente	$C_{1,u,m}$	m/s	0,0
Gesamt	$C_{1,m}$	m/s	231,4
Relativ			
Axialkomponente	$W_{1,ax,m}$	m/s	231,4
Umfangskomponente	$W_{1,u,m}$	m/s	-204,2
Gesamt	$W_{1,m}$	m/s	308,6
<b>Winkel am Eintritt</b>			
Absolut	$\alpha_{1,m}$	°	0
Relativ	$\beta_{1,m}$	°	-41,4
<b>Geschwindigkeit am Austritt</b>			
Umfangsgeschwindigkeit	$u_2$	m/s	439,8
Absolut			
Radialkomponente	$C_{2,r}$	m/s	114,6
Umfangskomponente	$C_{2,u}$	m/s	144,1
Gesamt	$C_2$	m/s	184,1
Relativ			
Radialkomponente	$W_{2,r}$	m/s	114,6
Umfangskomponente	$W_{2,u}$	m/s	-295,7
Gesamt	$W_2$	m/s	317,1
<b>Winkel am Austritt</b>			
Absolut	$\alpha_{2,m}$	°	51,5
Relativ	$\beta_{2,m}$	°	-68,8

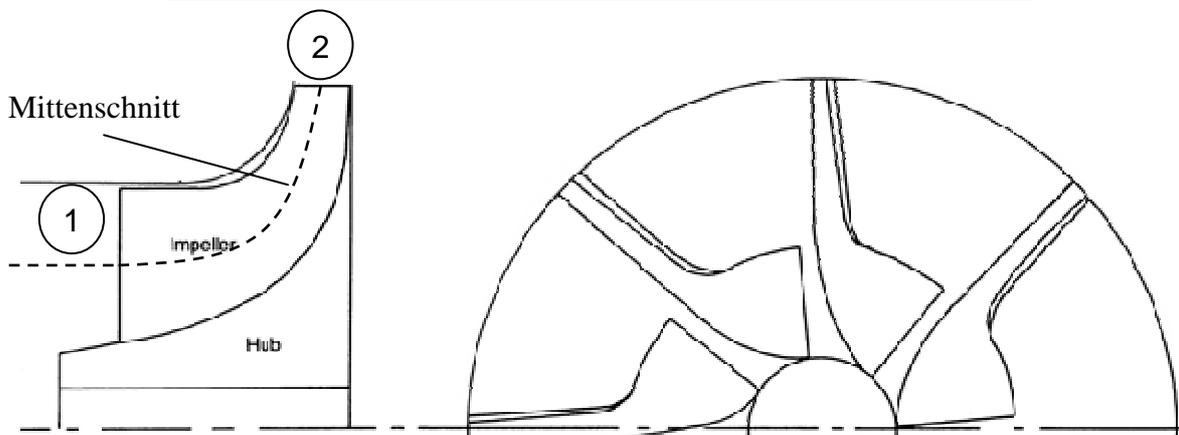


Abbildung 3: Radialverdichter<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Quelle: Whitfield und Baines

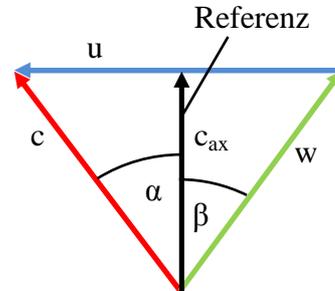
**Hilfen:**

- Alle Berechnungen werden für den Mittenschnitt durchgeführt. Es werden nur Strömungskomponenten in dieser Ebene berücksichtigt.

- Slip factor<sup>2</sup>:  $\sigma = \frac{c_{u,2,tatsächlich}}{c_{u,2,theoretisch}}$

- Definition der Strömungswinkel:

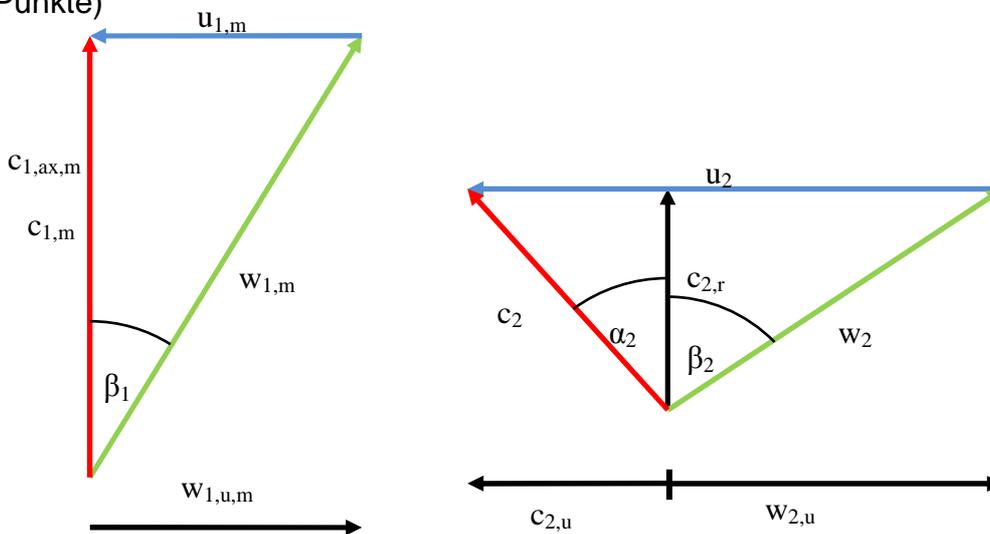
Referenz am Eintritt: Rotationsachse  
Referenz am Austritt: rein radialer Vektor



Die Umfangskomponenten und Winkel sind in Richtung der Umfangsgeschwindigkeit positiv, entgegen negativ definiert.

**Aufgaben:**

- 3.1 Gegeben sind die Geschwindigkeitsdreiecke samt der dazugehörigen Größen am Eintritt und am Austritt des Radialverdichters (siehe Tabelle). Angenommen die tatsächliche Abströmung des Laufrades weist einen slip factor von  $\sigma = 0,8$  auf, berechnen Sie wie sich das auf die Leistung des Radialverdichters auswirkt! (4 Punkte)



- 3.2 Berechnen Sie die tatsächlichen Geschwindigkeitskomponenten am Austritt und zeichnen Sie die entsprechenden Geschwindigkeitsvektoren in das gegebene Geschwindigkeitsdreieck aus dem ersten Aufgabenteil ein! (7,5 Punkte)

- 3.3 Berechnen Sie die tatsächlichen Strömungswinkel am Austritt und die Deviation! Handelt es sich hier um eine druck- oder saugseitige Deviation? (6 Punkte)

<sup>2</sup> Wilson, D. G.; Korakianitis, T. (1998): *The Design of High-Efficient Turbomachinery and Gas turbines*. 2<sup>nd</sup> Edition