

# Kennfeldabschätzung für Radialturbinen

## Kolloquium

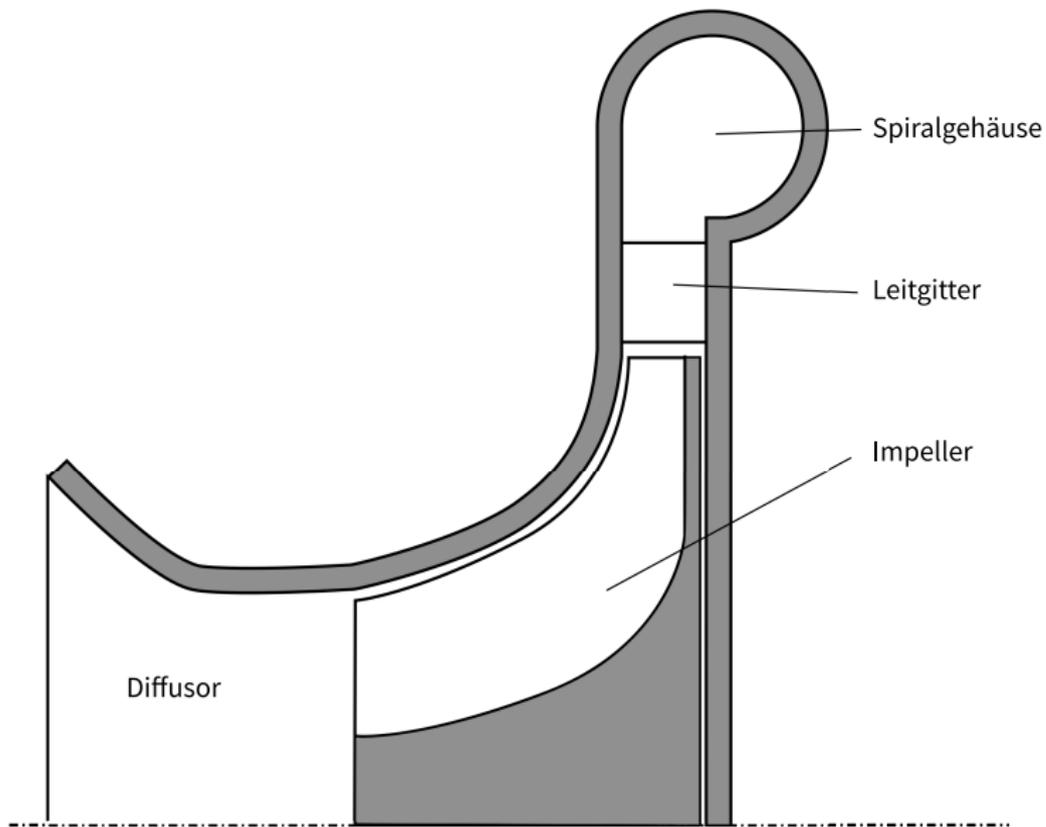
Chaobai Li

Fakultät Maschinenwesen, TU Dresden

15.03.2019

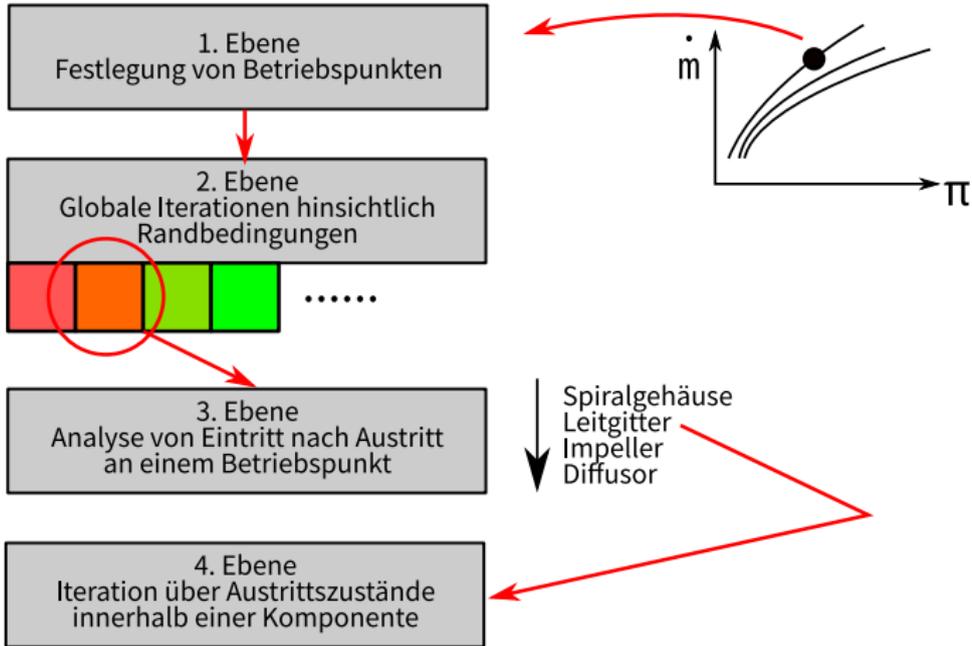
- Kennfeldabschätzung für Radialturbinen
  - mit der Methode von Aungier
  - Umsetzung ins Computerprogramm
  - Testen mit der Erstellung von Kennfeldern aus bekannten Beispielen
- Bewertung dieser Methode
  - Einsatzgrenzen
  - Robustheit und Parametersensitivität
  - Genauigkeiten

# Aufbau einer Radialturbine dieser Arbeit



- eindimensionale Analyse auf der Mittellinie
- adiabat, verlustbehaftete Strömung
- erfordert Kenntnisse über Halspassage in Leitgitter und Impeller
  - Behandlung von Überschallströmung ermöglicht
- iterative Lösung in 2 Ebenen:
  - für jede Komponenten (Massenstrombilanz)
  - evtl. für die ganze Turbine (Randbedingungen)

# Die Methode von Aungier: 4 Ebene



# Die Methode von Aungier: Eingabe

- Mögliche Eingaben
  - Arbeitsfluid: z.B. Luft
  - am Eintritt:  $p_E^*$ ,  $T_E^*$  (\*: Totalgröße),  $\dot{m}_E$
  - am Austritt:  $p_A$
  - Drehzahl:  $N$
- Performance-Analyse mit 3 Typen von Randbedingungen
  - Auswahl nach Bedarf:
    - z.B. die Bedingungen von Experimenten entsprechend
    - nicht alle Eingaben werden eingehalten!
  - Berechnung an einem vorgegebenen Betriebspunkt
    - aus mehrere Betriebspunkten -> Kennfelder

# Die Methode von Aungier: Randbedingungen

- 1 ohne
  - Austrittsbedingung  $p_A$  vernachlässigt
  - einfache Berechnung vom Eintritt nach Austritt
  - gilt nicht in Überschallbereich
- 2  $\dot{m}_E$  ist anzustreben
  - in Unterschallbereich wie ①
  - in Überschallbereich:
    - $\dot{m}_E$  schrittweise reduziert
    - erbringt den maximalen Massenstrom in Unterschallbereich
- 3  $p_A$  ist anzustreben...

# Die Methode von Aungier: Randbedingungen

## ③ $p_A$ am Austritt wird berücksichtigt

- viele Iterationen...
  - in Unterschallbereich:
    - durch Veränderung an Massenstrom  $\dot{m}_E$
    - Newton-Verfahren zur Suche
  - in Überschallbereich:
    - $\dot{m}_E$  begrenzt
    - erfordert zusätzliche Lösung von Gegendrücken verstopfter Komponenten
- Vorherige Randbedingung bildet Grundlagen für die Spätere:
- ① -> ② -> ③

# Analyse an einem Betriebspunkt

- chronologische Analyse von allen Komponenten:
  - Sprialgehäuse, Leitgitter, Impeller, Diffusor
- für jede Komponente:
  - Querschnitt 1 und 3: Eintritt & Austritt
  - evtl. geometrischer mittleren Querschnitt 2, z.B.  
 $r_2 = 0.5(r_1 + r_3)$

# Analyse von einer Komponente

- Ziel: Bestimmung von
  - thermodynamische Zustandsgröße am Austritt:  
 $h_3, s_3, p_3, \rho_3 \dots$
  - Geschwindigkeitskomponente:
    - $c_{3m}, c_{3\theta} \rightarrow c_3$  und  $\alpha_3$  (stationär)
    - $w_{3m}, w_{3\theta} \rightarrow w_3$  und  $\alpha_{3,rel}$  (rotierend), danach:  $c_3, c_{3\theta}, \dots$
- wobei
  - Massenstromerhaltung
  - Enthalpie- oder Rothalpieerhaltung
  - Ergebnisse von Verlustberechnungengleichzeitig erfüllt werden

# Analyse von einer beschaufelten Komponente

- Massenstromerhaltung zwischen Ein- und Austritt:

$$\dot{m} = 2\pi r_1 b_1 \rho_1 c_1 \sin \alpha_1 = 2\pi r_3 b_3 \rho_3 c_3 \sin \alpha_3$$

- Enthalpie- oder Rothalpieerhaltung:

$$h_1^* = h_3^* \quad (\text{stationär})$$

$$h_{1,\text{rel}}^* - h_{3,\text{rel}}^* = \frac{u_1^2 - u_3^2}{2} \quad (\text{rotierend})$$

- Geschwindigkeit  $c$  oder  $w$  aus (absolute oder relative) Totalenthalpie?

- Abströmwinkel  $\alpha_3$  oder  $\alpha_{3,\text{rel}}$  aus Geometrie & als inkompressible Strömung abgeschätzt!
- iterative Lösung von o.g. 2 Erhaltungen möglich?
- noch thermodynamische Beziehung unbekannt:  $s_1 \neq s_3$

# Verluste in einer Komponente

- Verluste an Totaldrücke innerhalb einer Komponente
  - gesamter Verlustfaktor

$$Y = \frac{p_1^* - p_3^*}{p_3^* - p_3} \Rightarrow p_3^* = \frac{p_1^* + Y p_3}{1 + Y}$$

- Annäherung mit inkompressiblem Fluid:

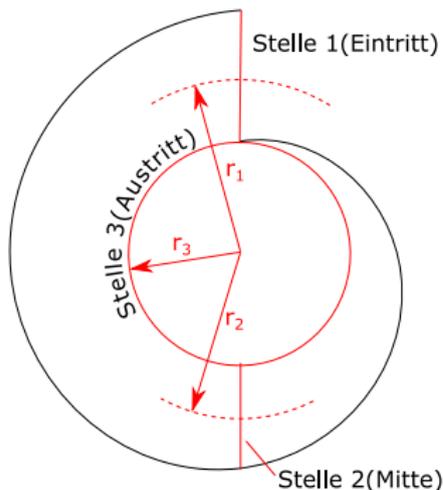
$$p^* = p + \frac{1}{2} \rho c^2$$

- immer auf  $p_3^* - p_3$  (dynamischen Druck am Austritt) bezogen
- $Y = Y_\theta + Y_\rho + Y_{\text{inc}} + Y_{\text{HS}} + Y_{\text{CL}}$

# $Y_i$ : Verschiedene Verlustfaktoren

- $Y = Y_\theta + Y_p + Y_{inc} + Y_{BL} + Y_{HS} + Y_{CL}$
- $Y_\theta$ : Verlust der Drallströmung im Spiralgehäuse

$$Y_\theta = \frac{1}{c_3^2} \left( \frac{c_1 r_1}{r_3} - \frac{c_2 r_2}{r_3} \right)^2$$



# $Y_i$ : Verschiedene Verlustfaktoren

- $Y = Y_\theta + Y_\rho + Y_{\text{inc}} + Y_{BL} + Y_{HS} + Y_{CL}$
- $Y_\rho$ : Verlust in Grenzschichten

$$Y_\rho = \frac{2\Theta + \Delta^2}{(1 - \Delta)^2}$$

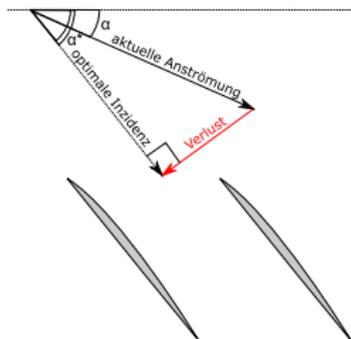
- $\Delta$ : Summe von anteiligen Verdrängungsdicken,  $= \sum \delta_i^*/b_i$
- $\Theta$ : Summe von anteiligen Implusverlustdicken,  $= \sum \delta_i/b_i$
- Grenzschichtberechnung ergibt neben  $Y_\rho$  auch die Verdrängungsdicke  $\Delta$ 
  - Strömungsquerschnitt muss mit Multiplikation von  $(1 - \Delta)$  korrigiert werden.

# $Y_i$ : Verschiedene Verlustfaktoren

- $Y = Y_\theta + Y_\rho + Y_{\text{inc}} + Y_{BL} + Y_{\text{HS}} + Y_{\text{CL}}$
- $Y_{\text{inc}}$ : Inzidenzverlust

$$Y_{\text{inc}} = \frac{\sin^2(\alpha_1 - \alpha_1^*)(p_1^* - p_1)}{p_3^* - p_3}$$

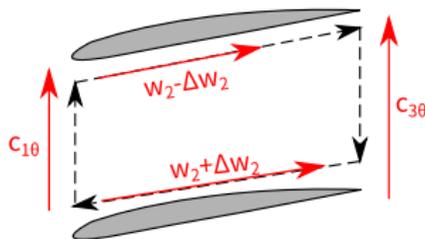
- $\alpha_1^*$ : optimaler Inzidenzwinkel
  - für Leitgitter:  
eine Funktion von Geometrie
  - für Impeller:  
von Geometrie, Drehzahl und  
Massenstrom abhängig



# $Y_i$ : Verschiedene Verlustfaktoren

- $Y = Y_\theta + Y_p + Y_{inc} + Y_{BL} + Y_{HS} + Y_{CL}$
- $Y_{BL}$ : Verlust wegen Schaufelbelastungen

$$Y_{BL} = \frac{1}{24} \left( \frac{2\Delta w_2}{w_3} \right)^2$$



- $Y_{HS}$ : Verlust ungleichmäßiger  $w$ -Verteilung von Nabe nach Gehäuse

$$Y_{HS} = \frac{1}{6} \left( \frac{\kappa_m b_2 w_2}{w_3 \sin \alpha_3} \right)^2$$

- findet im Impeller statt
- Einfluss von  $\Delta w_2$  ist auch in Grenzschichtberechnungen zu berücksichtigen!

# $Y_i$ : Verschiedene Verlustfaktoren

- $Y = Y_\theta + Y_\rho + Y_{\text{inc}} + Y_{BL} + Y_{HS} + Y_{CL}$
- $Y_{CL}$ : Spaltverlust an der Schaufelspitze

$$Y_{CL} = \frac{\dot{m}_{CL} \Delta p}{\dot{m}(p_{3,\text{rel}}^* - p_3)}$$

- $\Delta p$ : Druckdifferenz zwischen Druck- und Saugseite an der Schaufelspitze
  - abgeschätzt aus Änderung vom Drehimpuls in Strömung
- $\dot{m}_{CL}$ : Leckage-Massenstrom an dieser Stelle
  - Geschwindigkeit aus  $\Delta p$ :  $u_{CL} = \sqrt{2\Delta p / \bar{\rho}}$

- Verlustfaktor  $Y$ : verlustbehaftete Natur der Analyse von Aungier
- Austrittszustände einer Komponente wird iterativ bestimmt, so dass
  - aus Geschwindigkeit und Dichte:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1$$

- 

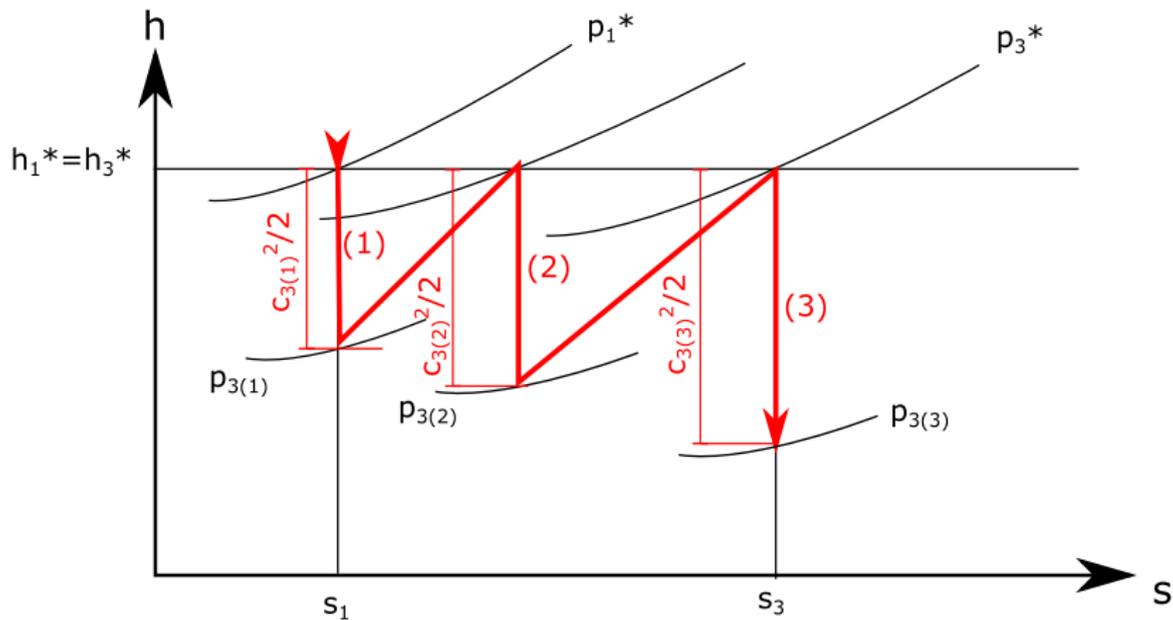
$$c_{3m}/c_{3\theta} = \tan \alpha_3$$

- 

$$p_3^* = \frac{p_1^* + Y p_3}{1 + Y}$$

- $h_3^*$  (oder  $h_{3,rel}^*$ ) und  $h_1^*$  (oder  $h_{1,rel}^*$ ) die energetische Beziehung entsprechen

# Massenstrombilanz



- 1 Ausgangspunkt:  $s_{3(1)} = s_1$
- 2 Abschätzung an Austrittszustände
  - 1 Dichte aus Eintrittszustand  $\rho_{3(1)} = \rho_1$
  - 2 Austrittsgeschwindigkeiten abgeschätzt
  - 3 thermodynamische Größe am Austritt bekannt
    - hier: energetische Beziehung
    - Dichte aus Thermodynamik muss nicht mit  $\rho_{3(1)}$  übereinstimmen!
- 3 Korrektur an  $p_3^* = p_{3(1)}^*$ 
  - 1 Ein- und Austrittszustände: Abschätzung von  $Y$
  - 2  $p_3^*$  gewichtet aus  $p_1^*$  und  $p_3$
  - 3 neue Entropie:  $s_{3(2)} > s_{3(1)}$
  - 4 neue Dichte(!):  $\rho_{3(2)}$
- 4 Wiederholung, bis abgeschätzten Massenstrom  $\dot{m}_3$  mit  $\dot{m}_1$  konvergiert.

# Abbruch in Massenstrombilanz: Überschallbetrieb

- Ist die Strömung in der Komponente supersonisch: keine Konvergenz!
- Feststellung: während Iterationen immer auf

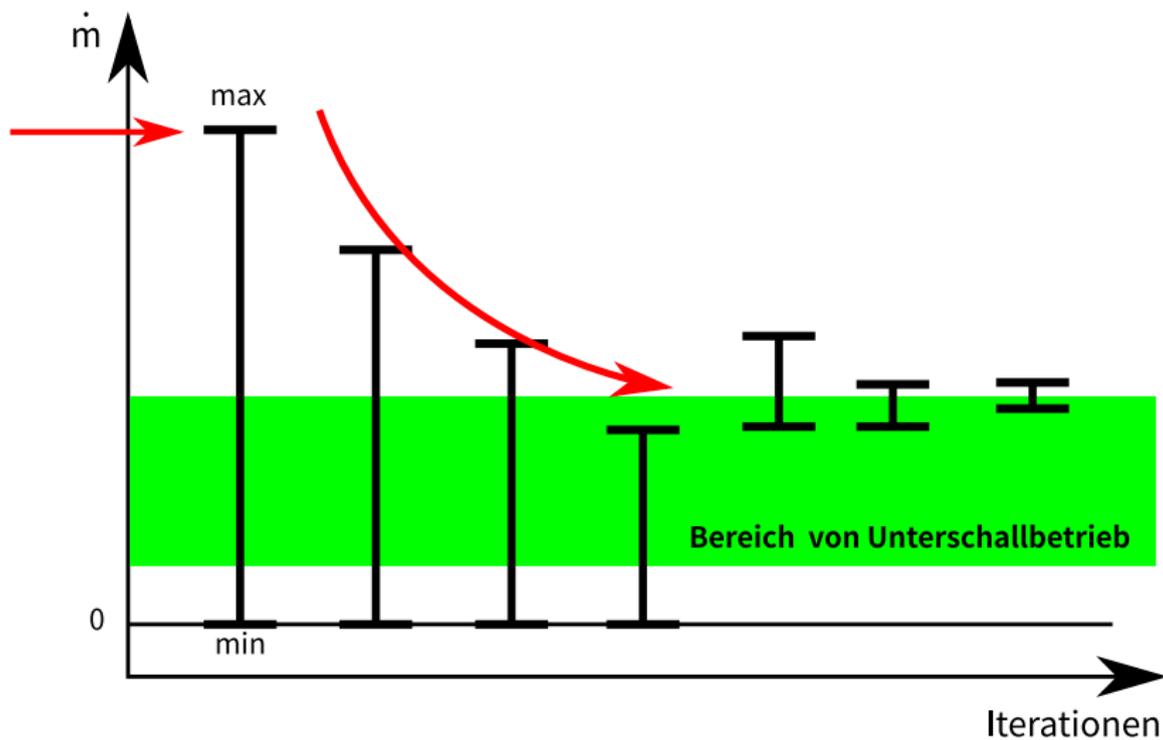
$$\frac{d(\rho c)}{dc} < 0$$

prüfen.

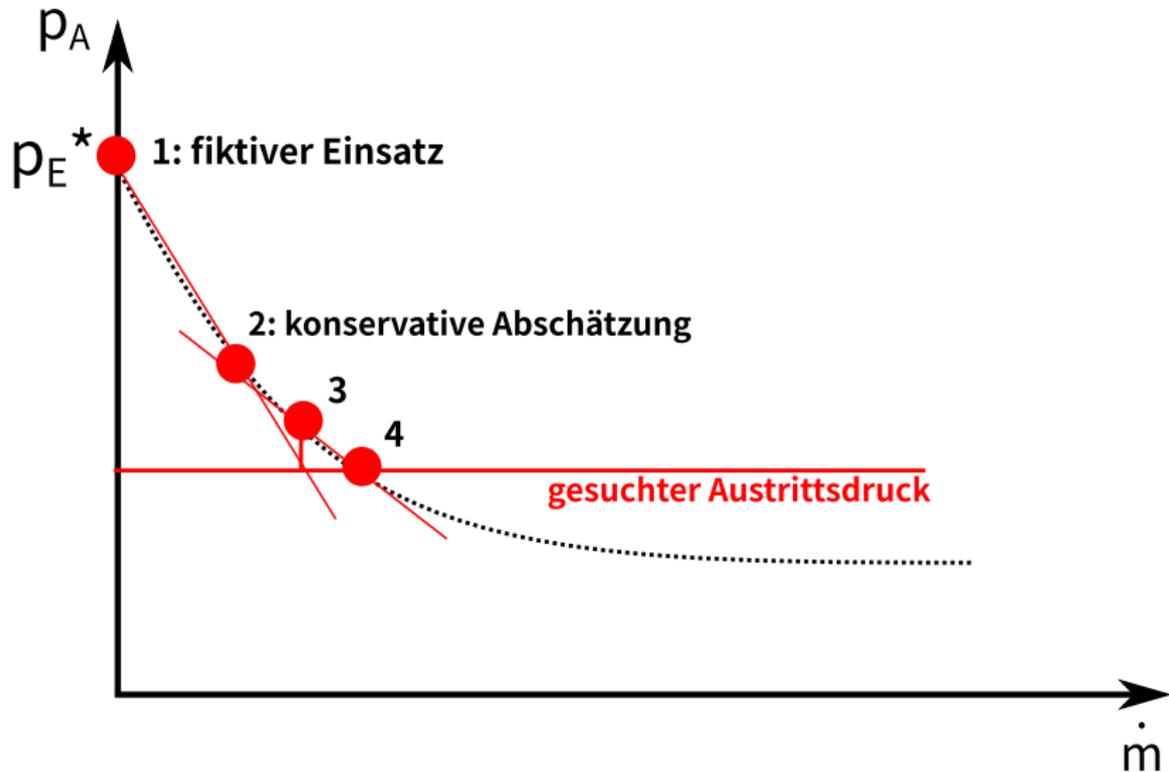
- Bei Feststellung von möglichem Überschallbetrieb:
  - Austrittsgeschwindigkeit  $c_3 = a_3$  festgesetzt.
  - Massenstrombilanz endet an der Druckwelle (Halspassage)
  - Ermittlung von Austrittszuständen erfordert zusätzliche Eingabe über Gegendruck
  - Ohne diese Eingabe:
    - Bereich vom Gegendruck ermittelt
    - Fehlermeldung nach Außen, Abbruch der Berechnung

- Berechnung vom Eintritt nach Austritt: Probleme
  - am Eintritt:  $p_E^*$ ,  $T_E^*$  und  $\dot{m}_E$  ständig vorzugeben
  - aber:
    - $\dot{m}_E$  immer praktisch?
    - Austrittsdruck  $p_A$  berücksichtigt?
    - Überschallbetrieb:  $\dot{m}_E$  begrenzt, zusätzliche Behandlung nötig!
- Randbedingungen
  - 1 keine Voraussetzung am Austritt: einfache Berechnung
  - 2  $\dot{m}_E$  vorgegeben: prüft, ob  $\dot{m}_E$  praktisch ist.
    - JA: endet wie (1)
    - NEIN: Überschallbetrieb, wie ist der Maximalwert (Stopfgrenze) von  $\dot{m}_E$ ?
  - 3  $p_A$  vorgegeben:
    - wie ist  $\dot{m}_E$  und ggf. die Gegendrücke aller verstopften Komponenten, die den Austrittsdruck  $p_A$  bilden?

# Randbedingung II: orientieren nach $\dot{m}$



# Randbedingung III: orientieren nach $p_A$



## Randbedingung III: orientieren nach $p_A$

- 1. Punkt:  $\dot{m} = 0$ ,  $p_A = p_E^*$
- 2. Punkt:  $\dot{m}$  aus Geometrie konservativ abgeschätzt
  - Stelle: Austritt vom Leitgitter
  - mit  $c_3 = 0.5a_3$
- weitere Punkte durch Newton-Verfahren

$$f(\dot{m}) \rightarrow p_A$$

- Vorgabe von  $\dot{m}$  in Randbedingung II
  - auf Überschallbetrieb beachtet!

# Behandlungen im Überschallbereich

- Problem:  $\geq 1$  Komponente(n) verstopft
  - Weitere Erhöhung von  $\dot{m}$  unmöglich!
  - zusätzliche Behandlung von Gegendrücken verstopfter Komponenten!
- Suchbereich vom Gegendruck  $p_3$ 
  - $p_{3,\max}$ : Druck am Halspassage
  - $p_{3,\min}$ : wenn Austrittsquerschnitt verstopft
- Systematische Verringerung vom Suchbereich

$$p_A = f(p_3) \rightarrow p_{A,\text{Vorgabe}} \quad p_3 \in [p_{3,\min}, p_{3,\max}]$$

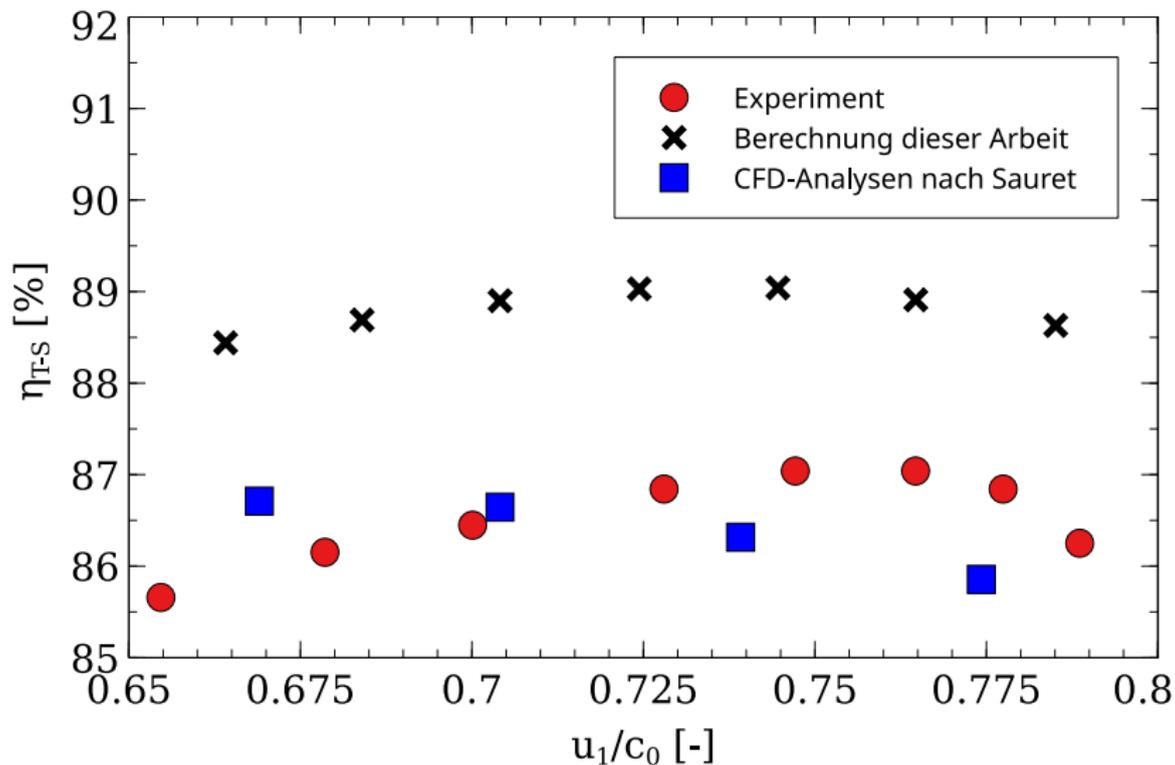
- Berechnung an einem Betriebspunkt erneut gestartet
  - mit  $p_3$  wird die Berechnung bis zum Austritt fortgeföhren
  - solange keine nachfolgende Komponente verstopft ist!
- Beendigung:  $|p_{3,\max}/p_{3,\min} - 1| < \varepsilon$

- ein Program in Python
- Realstoffdaten: CoolProp
- Ergebnisbericht als Webseite

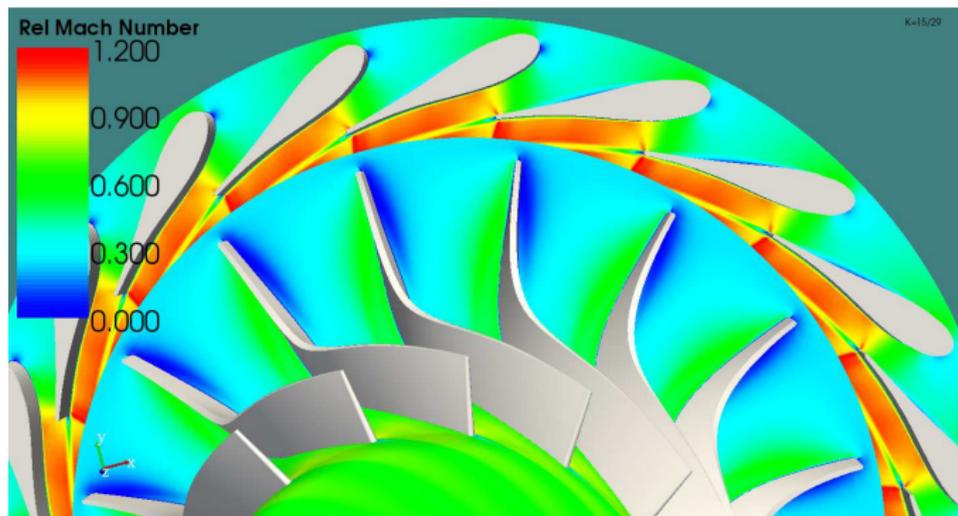
- SAURET, Emilie, 2012. Open Design of High Pressure Ratio Radial-inflow Turbine for Academic Validation. In: ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition. Houston(USA), 9-15. November 2012. New York: ASME Press.
  - JONES, A.C., 1996. Design and Test of a Small, High Pressure Ratio Radial Turbine. In: Journal of Turbomachinery. 118(2), S. 362-370.
- Analysen:
  - Leitgitter im Überschallbetrieb
  - CFD-Rechnungen für  $\eta_{T-S}$

- Feststellungen mit der Methode von Aungier
  - Grenzschichtberechnung im Impeller führt zu numerischer Instabilität
    - muss deaktiviert werden
  - Wirkungsgrad 2% höher als CFD-Rechnungen
  - richtige Erkennung von Überschallbetrieb im Leitgitter, gute Abschätzung an Mach-Zahl

# Testfall: Analysen von Sauret



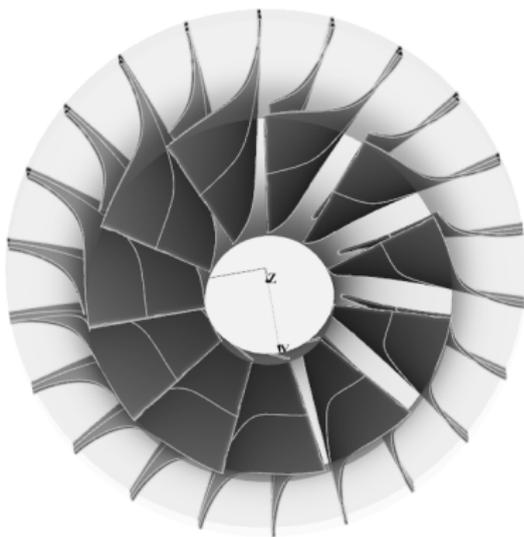
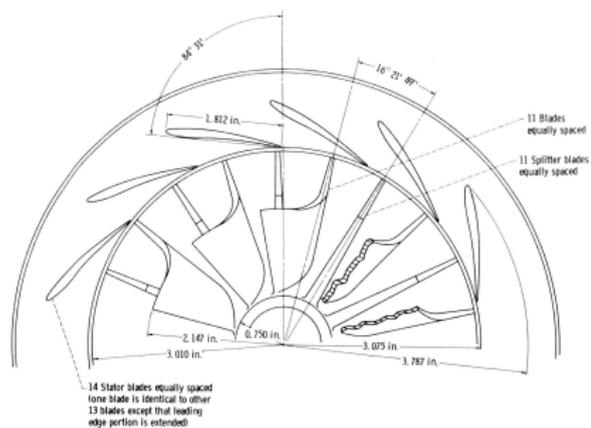
# Testfall: Analysen von Sauret



- CFD-Ergebnis nach Sauret
- Methode von Aungier:  $c_3 = 463.2 \text{ m/s}$ ,  $a_3 = 386.6 \text{ m/s}$ 
  - relative  $Ma = 1.2$

- Systematische Untersuchung von Radialturbinen an NASA in 1960er Jahren
- Experimenten mit verschiedenen Größen
- auch als Testfall im Buch von Aungier beschrieben
- Mangel an Daten meridionaler Abmessungen
  - mit CAD-Software aus Skizzen gemessen
  - in CFTurbo nährungsweise rekonstruiert

# Testfall: NASA 6,02"-Turbine



- NASA Experimenten:
  - konstante Eintrittszustände
  - Austrittsdruck nach Bedarf geregelt, Massenstrom gemessen
- daher:
  - einfache Berechnung reicht
  - oder Randbedingung II mit Massenstrom-Vorgabe
- Genaue Abmessungen in Eingaben sehr wichtig.
  - (S. 75 der Diplomarbeit)
- Stopfgrenze und Pumpgrenze können ermittelt werden.
  - (S. 76)

- Besonderheiten:
  - Details über jeden Komponenten
  - Berechnung in Überschallbereich
  - Stopf- und Pumpgrenze
- Schwierigkeiten:
  - Genaue Abmessungen: wichtig
  - erfordert Kenntnisse über Halspassage
  - Grenzschichtberechnung, insbesondere in Off-Design Punkten
- Dauer der Berechnungen:
  - pro Betriebspunkt: je nach Randbedingung, einige Sekunden.
  - pro Kennfeld: einige Minuten.

- modularer Aufbau des Programms
  - abweichende Kombination von Komponenten
    - mehrerer Stufe
    - unbeschauelter Stator