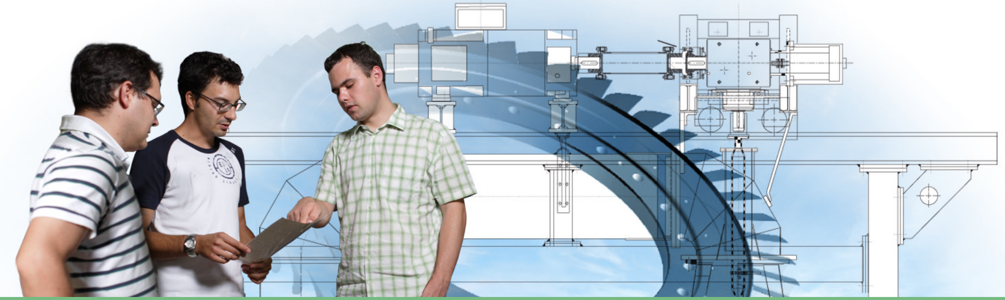
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Laboratory for Energy Conversion



Thermodynamik III

1 - Physikalischer Prozess des Energieaustausches

HS 2021

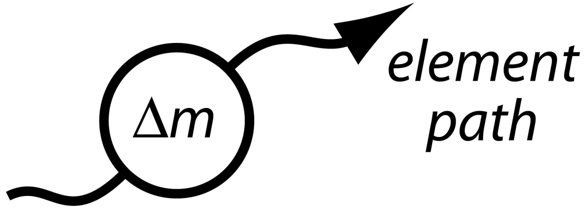
Prof. Reza S. Abhari
Dr. Ndaona Chokani

Overview

Vorlesung		Übung/Beispiel	
Datum	**Thema**	**Datum**	**Thema**
09.11	Prozess des Energieaustausches	09.11	Geschwindigkeitsdreiecke
16.11	Dampfkraftprozesse	16.11	Rankine Zyklus
23.11	Gasarbeitsprozesse - Verbrennungsmotoren	23.11	Diesel / Otto Zyklus
30.11	Gasarbeitsprozesse - Gasturbinenprozesse	30.11	Brayton Zyklus
07.12	Gasarbeitsprozesse - Kombinierten Zyklen	07.12	Kombinierter Zyklus
14.12	Kältemaschinen und Wärmepumpen	14.12	Kältemaschine/Wärmepumpe
21.12	Kältemaschinen Oxyfuel, Carbon Capture and Storage	21.12	Wärmepumpe

1.1 Energieaustausch

- Energieaustausch zum und vom Arbeitsmedium in Rotationsmaschinen
- Betrachte Bewegung eines Flüssigkeitsteilchen:



- Zur Erinnerung: Substantielle Ableitung

$$\frac{D}{Dt}Q = \frac{\partial}{\partial t}Q + \vec{u} \bullet \nabla Q$$

  - Zeitliche Änderung entlang der Teilchenbahn
  - Bezieht sich auf Änderungen im Bezugssystem des Teilchens
  - Q: Beliebige Eigenschaft des Fluids

- Erster Hauptsatz der Thermodynamik

$$\frac{De}{Dt} = \frac{Dq}{Dt} - P \cdot \frac{D}{Dt}\left(\frac{1}{\rho}\right)$$

- Annahme: Adiabat und nicht-viskos

$$\frac{Dq}{Dt} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{De}{Dt} = -P \cdot \frac{D}{Dt}\left(\frac{1}{\rho}\right) \qquad (1)$$

- Newton's Bewegungsgesetz:

$$\vec{F} = -m \cdot \vec{a}$$

$$\vec{u} \bullet \left(\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla P\right)$$

$$\therefore \quad \frac{D}{Dt}\left(\frac{\bar{u}^2}{2}\right) = -\frac{\bar{u} \bullet \nabla P}{\rho} \qquad (2)$$

– Definition der Enthalpie:

$$h = e + \frac{p}{\rho}$$

$$\therefore \quad \frac{Dh}{Dt} - \frac{1}{\rho}\frac{DP}{Dt} - P\frac{D}{Dt}\left(\frac{1}{\rho}\right) = \frac{De}{Dt}$$

– Mittels (1) folgt:

$$\frac{Dh}{Dt} - \frac{1}{\rho}\frac{DP}{Dt} - P\frac{D}{Dt}\left(\frac{1}{\rho}\right) + P\frac{D}{Dt}\left(\frac{1}{\rho}\right) = 0$$

$$\therefore \quad \frac{Dh}{Dt} = \frac{1}{\rho}\frac{DP}{Dt} \qquad (3)$$

- Summierung von (2) und (3)

$$\frac{D}{Dt}\left(h + \frac{u^2}{2}\right) = \frac{1}{\rho}\frac{DP}{Dt} - \frac{\overline{u} \bullet \nabla P}{\rho}$$

- Totale Enthalpie

$$h_T = h + \frac{u^2}{2}$$

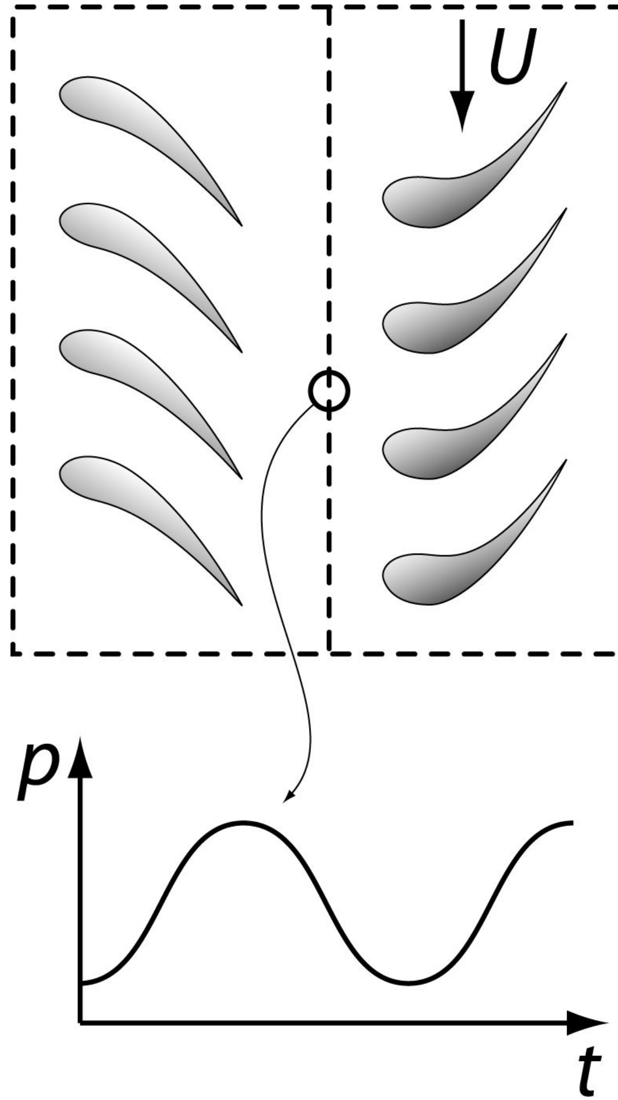
- Einsetzen und Ausschreiben der substantiellen Ableitung ergibt:

$$\frac{Dh_T}{Dt} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\overline{u} \bullet \nabla P}{\rho} - \frac{\overline{u} \bullet \nabla P}{\rho}$$

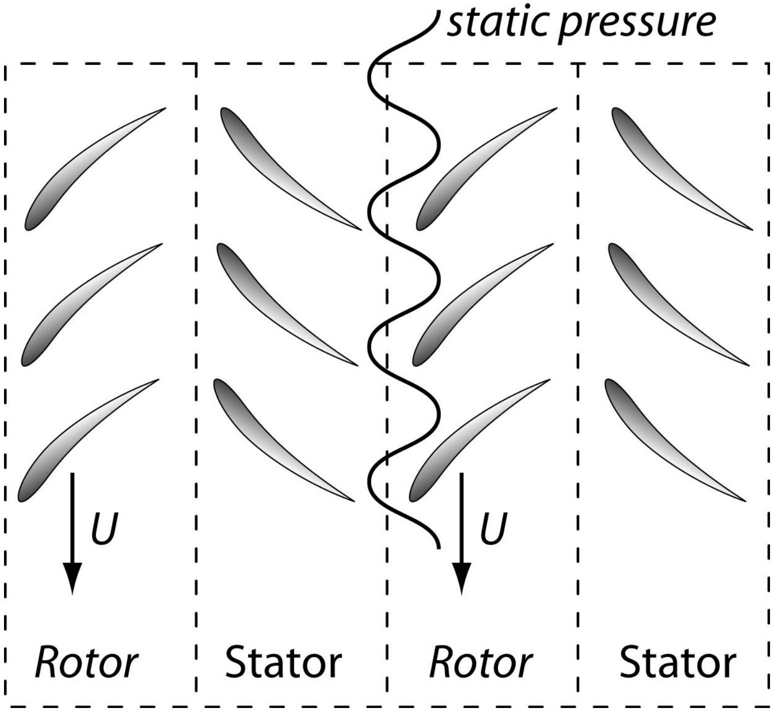
$$\therefore \quad \rho\frac{Dh_T}{Dt} = \frac{\partial P}{\partial t}$$

Die Enthalpie einer adiabaten, nicht-viskosen Strömung kann nur verändert werden, wenn sich ihr statischer Druck zeitlich ändert.

- Instationäre Berechnungen sind schwierig und unpraktisch für tägliches Design
- Lösung: Behandle einen instationären Prozess mit zwei stationären Prozessen und einer ‚Mischungsebene'
- Annahme: Instationäre Strömung ist in der Mischungsebene konzentriert



- In Turbomaschinen:
  - Reihe stationärer Schaufeln gefolgt von Reihe rotierender Schaufeln
  - Relative Bewegung der Schaufeln erzeugt instationären Druckverlauf
  - Dieser erhöht (Kompressor) oder verringert (Turbine) die Enthalpie der Luft
- Für mehrere Reihen wird der Prozess wiederholt

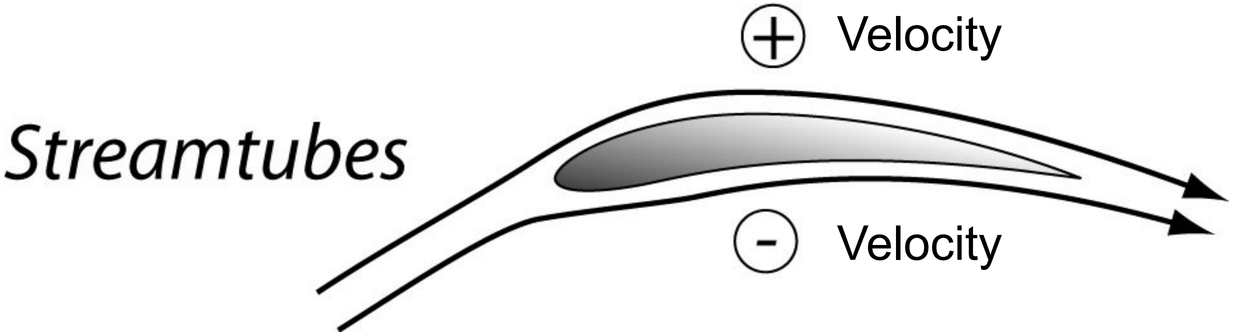


Instationäre Strömung in der Mischungsebene (LEC Prüfstand LISA)

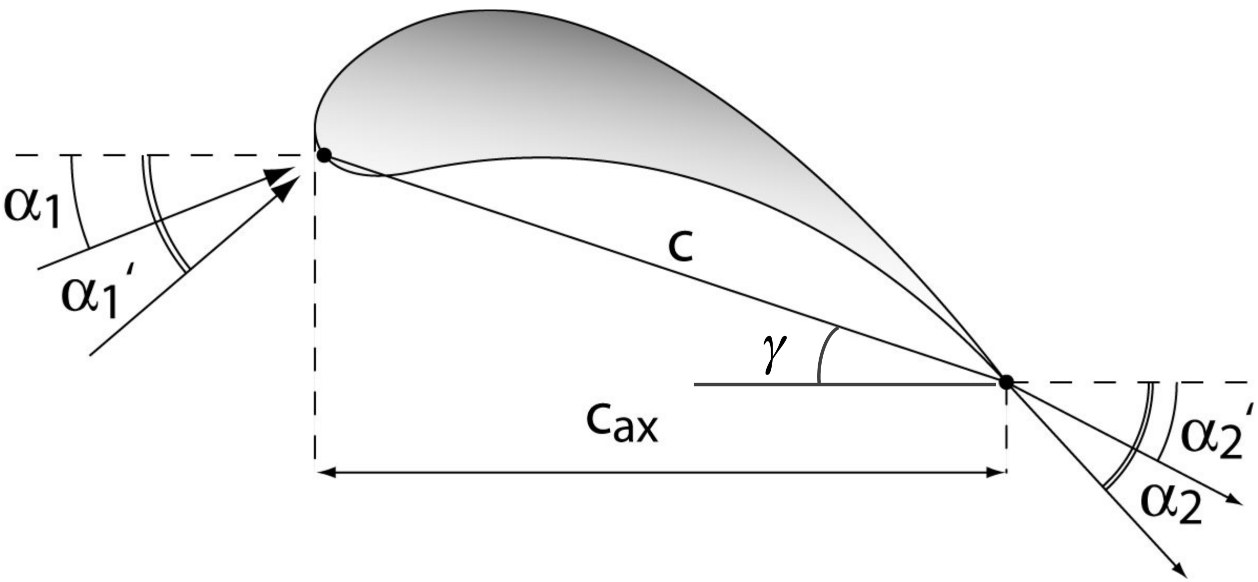
1.2 Flügelprofile

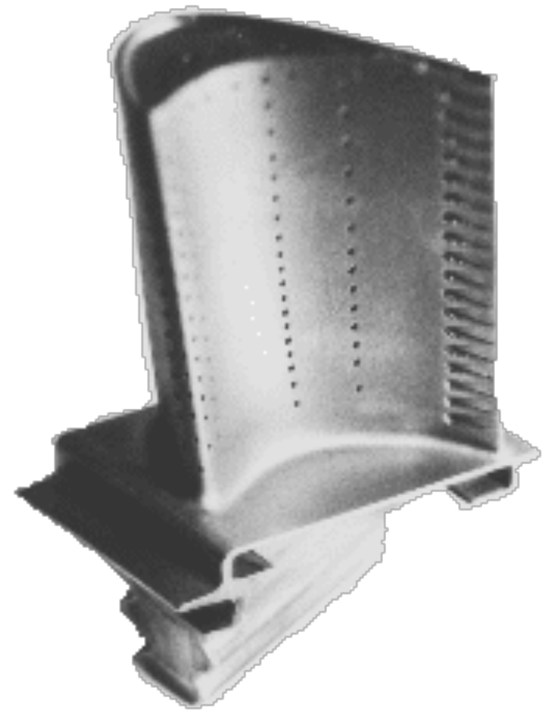
- Flügelprofile übertragen Energie:
  - Kompressor: Erhöhung der Enthalpie von der Welle zum Fluid
  - Turbine: Verringerung der Enthalpie vom Fluid zur Welle

- Wie funktioniert ein Flügelprofil? Erzeugung von Auftrieb durch Umlenken (Drehen) der Strömung



- Gedachte Stromröhre um das Profil herum: Massenstrom ist konstant





C_{ax} *axial chord*

γ *stagger angle*

α_1 *inlet blade angle*

α_2 *outlet blade angle*

α_1' *inlet flow angle*

α_2' *outlet flow angle*

$\theta = \propto_1 + \propto_2$ *camber angle*

$i = \alpha_1' - \propto_1$ *incidence angle*

$\delta = \propto_2 - \alpha_2'$ *deviation angle*

$\varepsilon = \alpha_1' - \alpha_2'$ *turning angle*

- Kaskade von Flügelprofilen

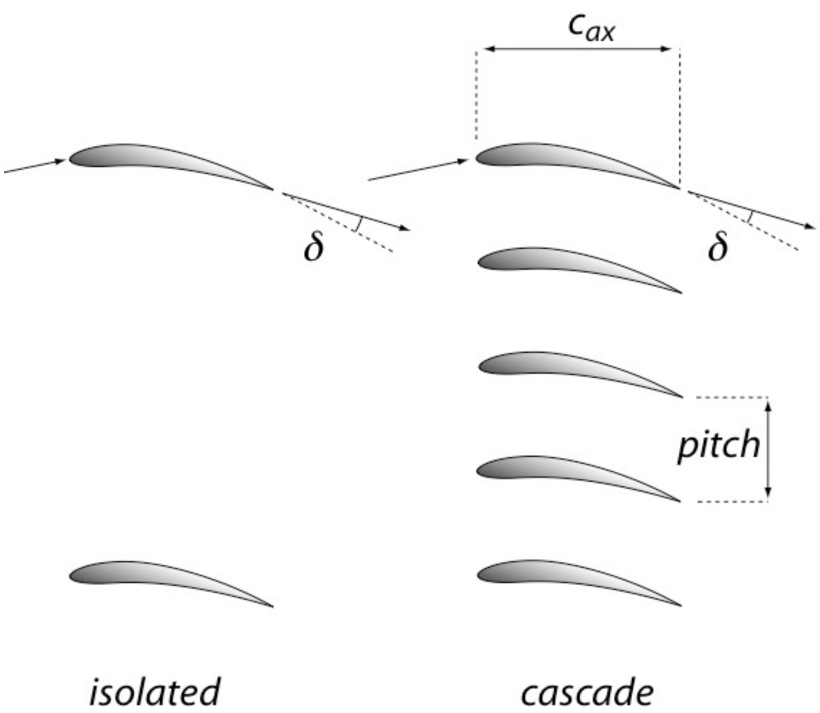
- Strömung wird beeinflusst vom danebenliegenden Profil

- In der Kaskade können viel höhere Drehwinkel erreicht werden als mit einem einzelnen Profil

- Solidity:

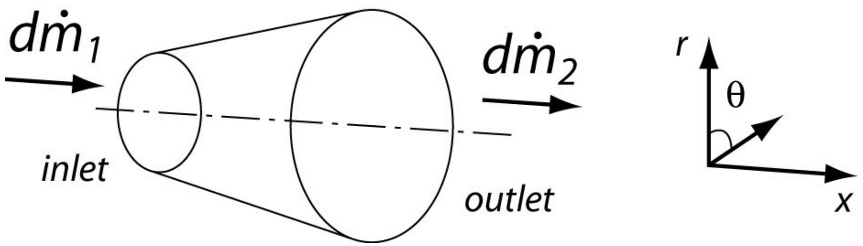
Typischerweise 0.5 < σ < 1.5

$$\sigma = \frac{C_{ax}}{pitch}, \quad wenn \;\; \sigma\uparrow \;\; \rightarrow \;\; \delta\downarrow$$



1.3 Euler Gleichung

- Impulsaustausch in einer Kaskade von Rotor- und Stator-Schaufelreihen



- Gerät mit Massenströmen 1 und 2
- Momenterhaltung

$$\int_{outlet} r_2 C_{\theta 2}\, d\dot{m}_2 - \int_{inlet} r_1 C_{\theta 1}\, d\dot{m}_1 = Torque\ T$$

- Multipliziere beide Seiten mit der Umdrehungsgeschwindigkeit

$$T\omega = \int_{outlet} (r_2\omega) C_{\theta 2}\, d\dot{m}_2 - \int_{inlet} (r_1\omega) C_{\theta 1}\, d\dot{m}_1$$

$$Power = \int_{outlet} U_2 C_{\theta 2}\, d\dot{m}_2 - \int_{inlet} U_1 C_{\theta 1}\, d\dot{m}_1$$

– Falls die Massenströme am Ein- und Ausgang gleich sind, gilt

$$Power = \dot{m}(U_2 C_{\theta 2} - U_1 C_{\theta 1})$$

$$h_{T2} - h_{T1} = \Delta h_T = \frac{Power}{\dot{m}}$$

$$\boxed{\Delta h_T = U_2 C_{\theta 2} - U_1 C_{\theta 1}} \quad \textit{Turbine Euler Equation}$$

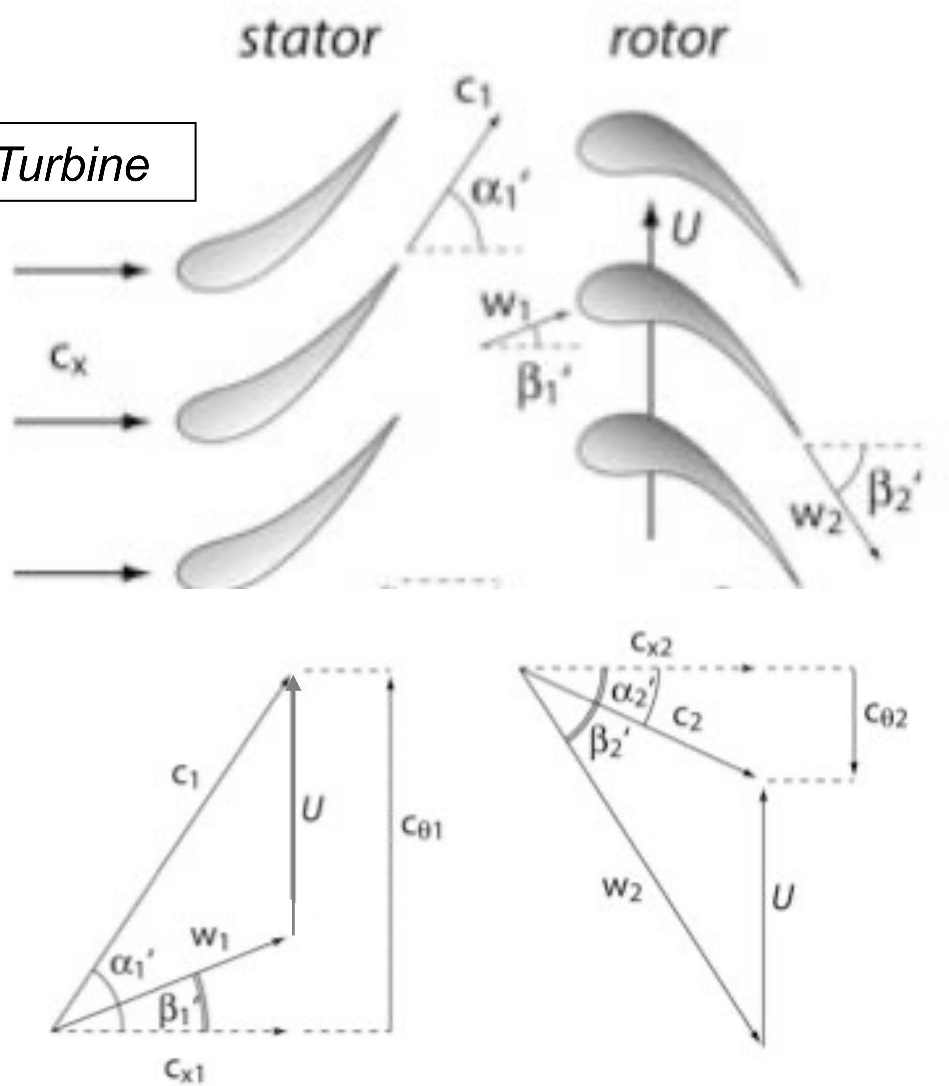
– Wobei

C_θ Absolute Umfangsgeschwindigkeit, Swirl

U Geschwindigkeit der Schaufel

1.4 Geschwindigkeitsdreiecke

Turbine



Annahme:
Massenerhaltung angewendet auf inkompressible Strömung

$C_{x1}=C_{x2}=C_x$

$U = r\omega$

w_1 *rotor relative inlet vel.*

w_2 *rotor relative outlet vel.*

$\alpha_1' = \alpha_1 - \delta_1$

$\beta_1' = \beta_1 + i_2$

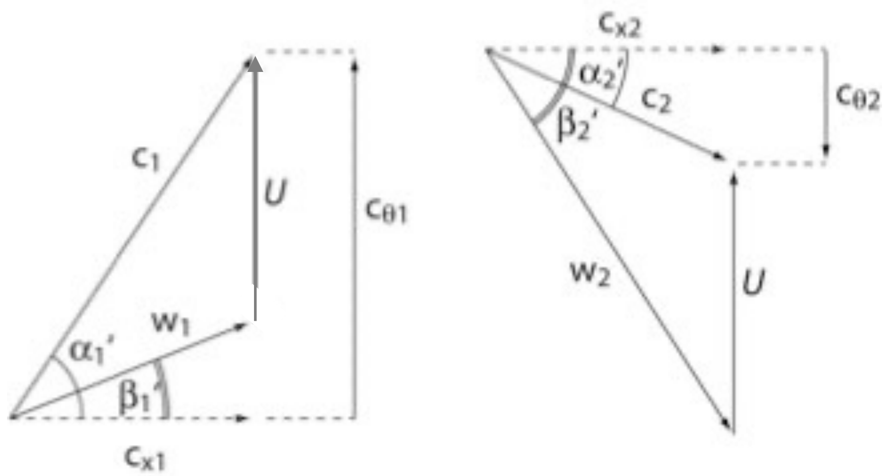
$\beta_2' = \beta_2 - \delta_2$

α_1 = exit stator angle
β_1 = inlet rotor angle
β_2 = outlet rotor angle

– Inlet Swirl

$$C_{\theta 1} = C_x \cdot \tan \alpha_1'$$

$$C_{\theta 2} = r_2 \omega - C_x \cdot \tan \beta_2'$$



$$\dot{m} = \rho C_x A$$

$$C_x = \frac{\dot{m}}{\rho A}$$

Annahme: *i=δ=0*
Profile mit Strömung ausgerichtet

$$\Delta h_T = r_2 \omega C_{\theta 2} - r_1 \omega C_{\theta 1}$$

Euler Equation

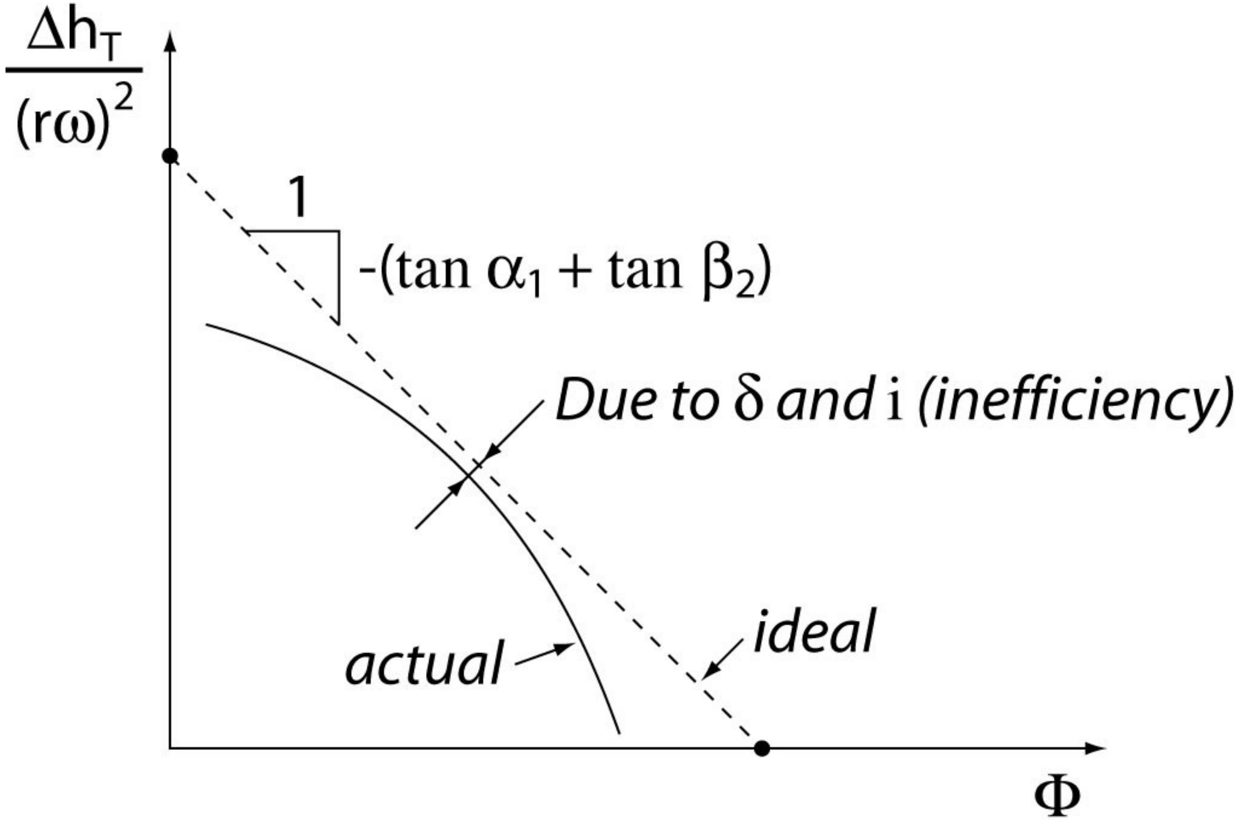
– Weitere Annahme: $r_2 = r_1 = r$

$$\Delta h_T = r\omega \cdot (r\omega - C_x \cdot \tan \beta_2 - C_x \cdot \tan \alpha_1)$$

$$\Delta h_T = (r\omega)^2 \left[1 - \frac{C_x}{r\omega} (\tan \alpha_1 + \tan \beta_2) \right]$$

$$\therefore \quad \frac{\Delta h_T}{(r\omega)^2} = 1 - \Phi \cdot (\tan\alpha_1 + \tan\beta_2)$$

– Wobei $\Phi = \dfrac{C_x}{U} = \dfrac{C_x}{r\omega}$, $\Phi =$ *flow coefficient*



- 2. Hauptsatz der Thermodynamik

$$Tds = dh - \frac{dP}{\rho}$$

Isentrop: *ds=0*

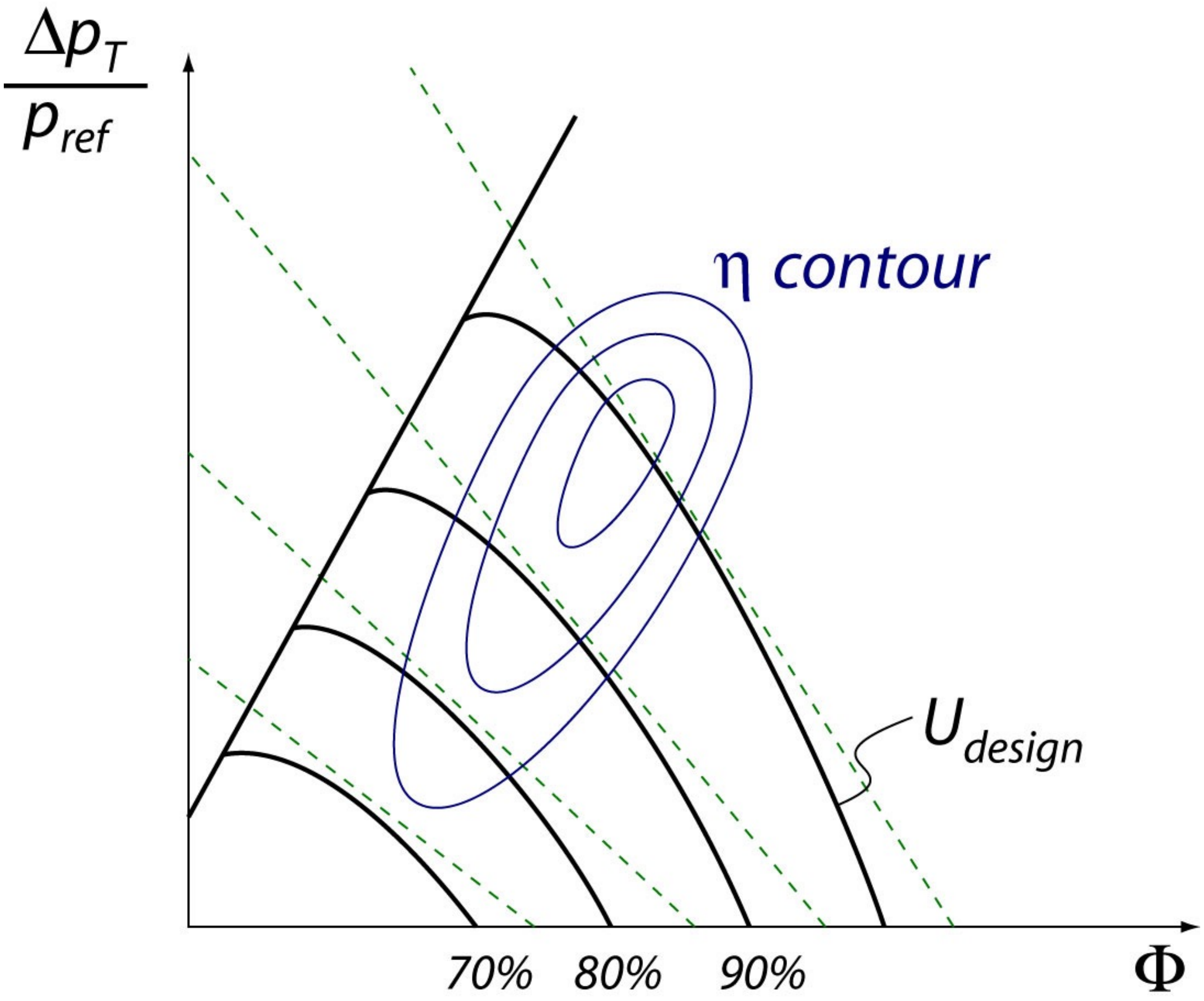
$$\partial h = \frac{\partial P}{\rho}$$

- Für inkompressible Fälle gilt

$$\Delta h_T \cong \frac{1}{\rho} \Delta P_T$$

$$\therefore \quad \frac{\Delta P_T}{\rho (r\omega)^2} \cong 1 - \Phi \cdot (\tan\alpha_1 + \tan\beta_2)$$

Kompressorkennfeld



Reales Kompressorkennfeld (LEC Radialkompressor RIGI)