

Universität  
Rostock



Traditio et Innovatio



# Windturbinen und alternative Energiequellen WS 2015/16

## **Grundlagen für den Rotorentwurf**

Prof. Dr. Hendrik Wurm

Lehrstuhl für Strömungsmaschinen



- **Einführung / industrieller Hintergrund (Vorlesung 1)**
- Energieinhalt im Wind und Aufbau von Windkraftanlagen (Vorlesung 2)
- Windentstehung und Messung der Windgeschwindigkeit (Vorlesung 3)
- Grundlagen der Aerodynamik (Vorlesung 4)
- Grundlagen für den Rotorentwurf (Vorlesung 5)



- Entwurf und aerodynamische Optimierung des Rotors (Vorlesung 5,6)
- Anpassung an veränderte Windverhältnisse und Verluste (Vorlesung 7)
- Grundlagen der Aeroelastik, Fluid-Struktur-Wechselwirkungen (Vorlesung 8,9)
- Schallquellen an Windkraftanlagen und Maßnahmen zur Lärmreduzierung (Vorlesung 10)



- spezielle Herausforderungen an offshore-Windparks (Vorl. 11)
- Gezeitenturbinen (Vorlesung 12)
- Solarthermie und Photovoltaik (Vorlesung 13)
- Geothermie (Vorlesung 14)
- Zusammenfassung (Vorlesung 14)

# Strömungsmodellierung, Entwurf und Optimierung

Universität  
Rostock



Traditio et Innovatio

Tafelbild

## Wirbelstärke

$\vec{\omega} = 0$       *für drehungsfreie Strömung*

$\vec{\omega} \neq 0$       *für drehungsbehaftete Strömung*

Drehvektor  $\vec{\omega}$

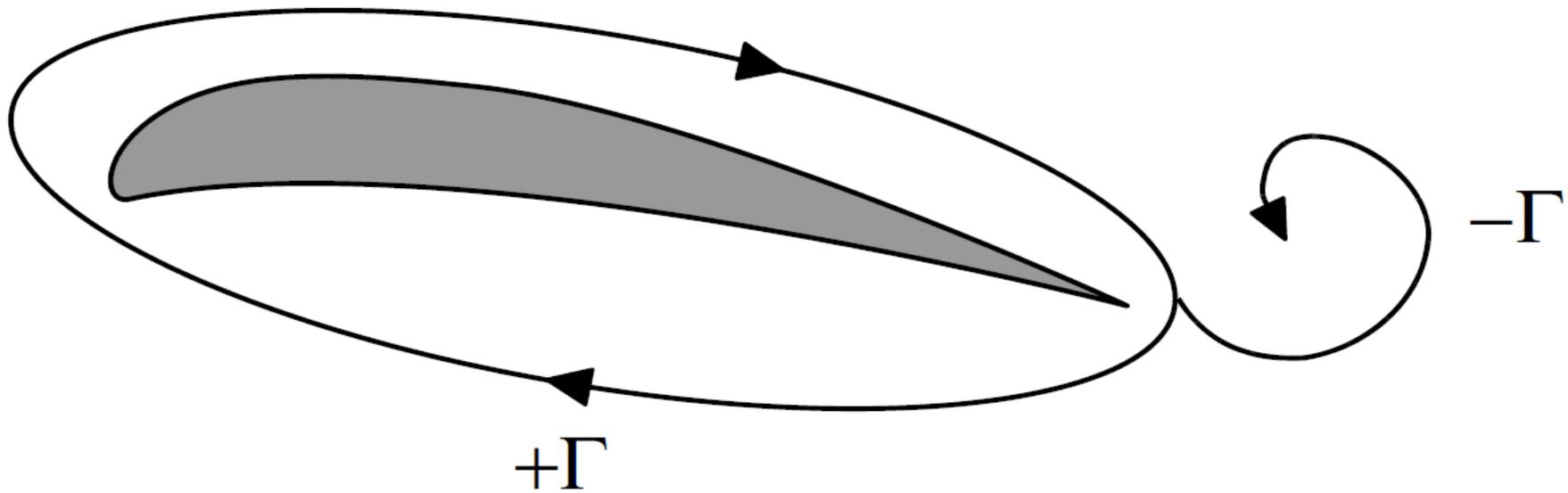
$$\vec{\omega} = \frac{1}{2} \operatorname{rot} \vec{c}$$

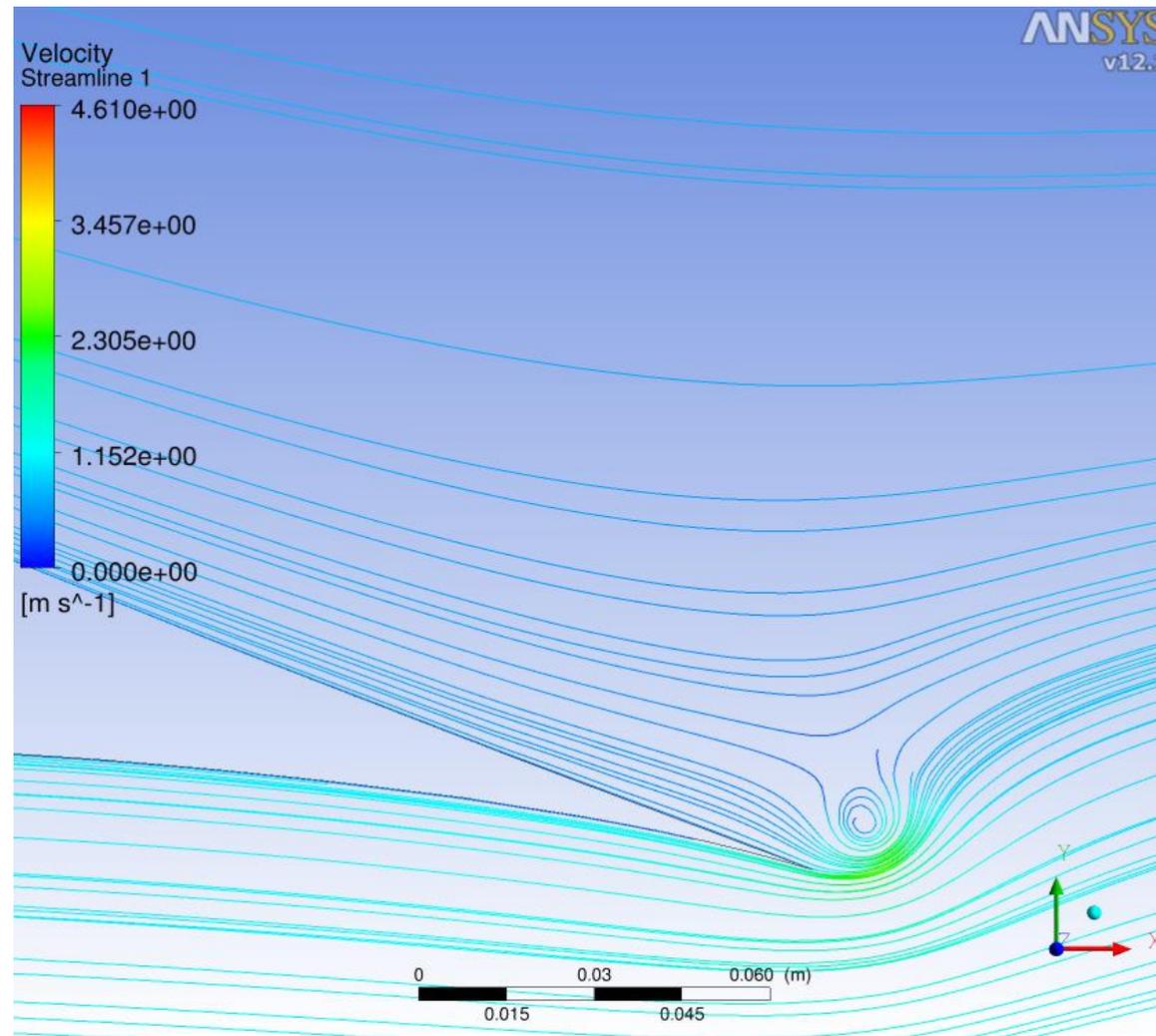
Zirkulation: Gesamtaussage über die Drehung in einem großen Bereich

für geschlossene Kurve  $\Gamma$  bilden wir das skalare Produkt: Wegelement  $\times$  Geschwindigkeit und integrieren über die geschlossene Kurve bei festgehaltener Zeit in Richtung des Weges  $= \oint_{\Gamma} \mathbf{c} \cdot d\mathbf{l}$

Zusammenhang Drehung und Zirkulation wird über den Stokesschen Satz hergestellt.

# Profilumströmung - Anfahrwirbel





gerechneter Anfahrwirbel hinter einem umströmten Profil nach 0.015 s bei einem Anstellwinkel von 8 Grad

Die Zirkulation ist das Integral der Geschwindigkeit entlang einer geschlossenen Kurve.

Zirkulation

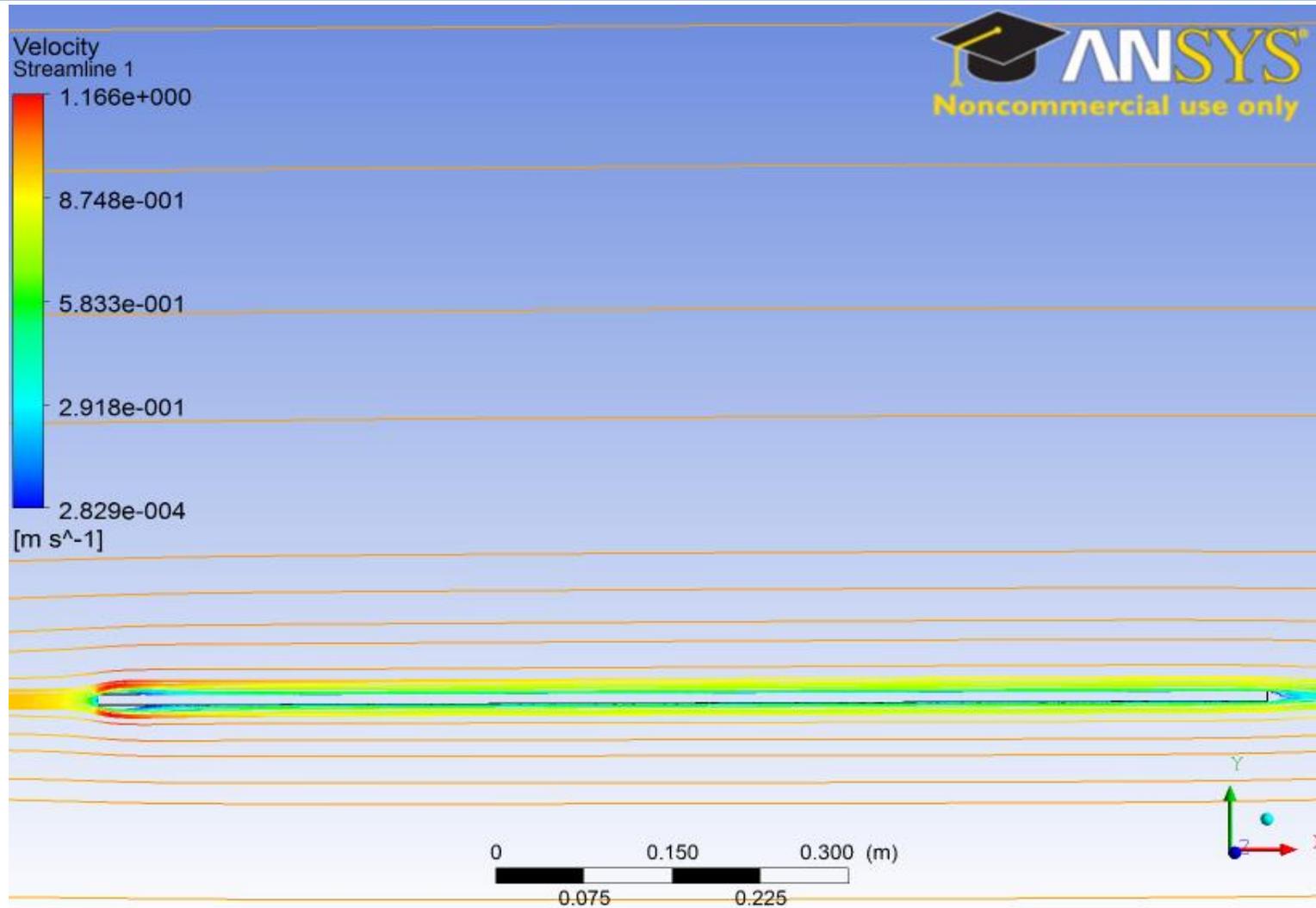
$$\Gamma = \oint c_{\text{tan}} dl$$

Auftriebskraft

(Satz von Kutta, Joukowski)

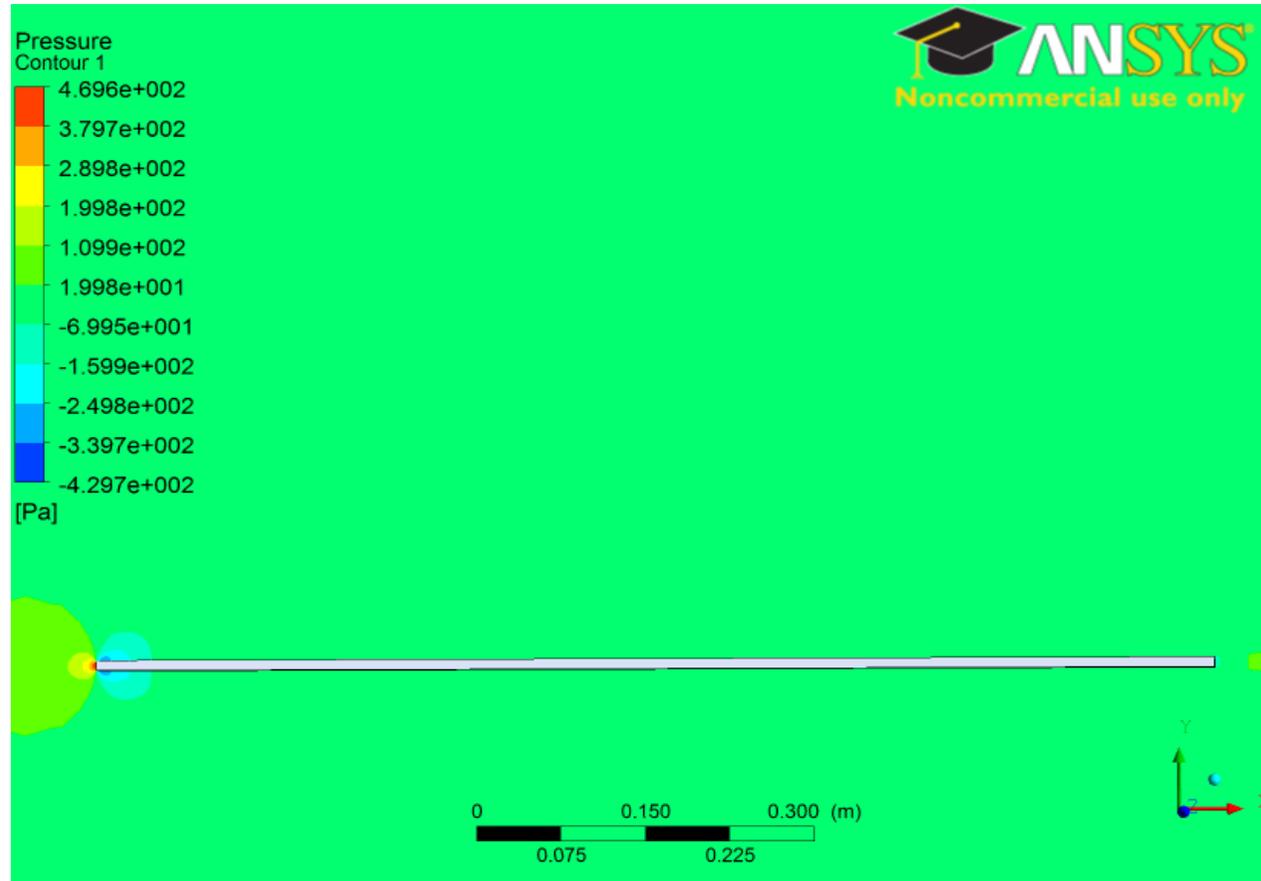
$$F_A = \rho \cdot c_{\infty} \cdot \Gamma \cdot b$$

# Strömung um eine ebene Platte

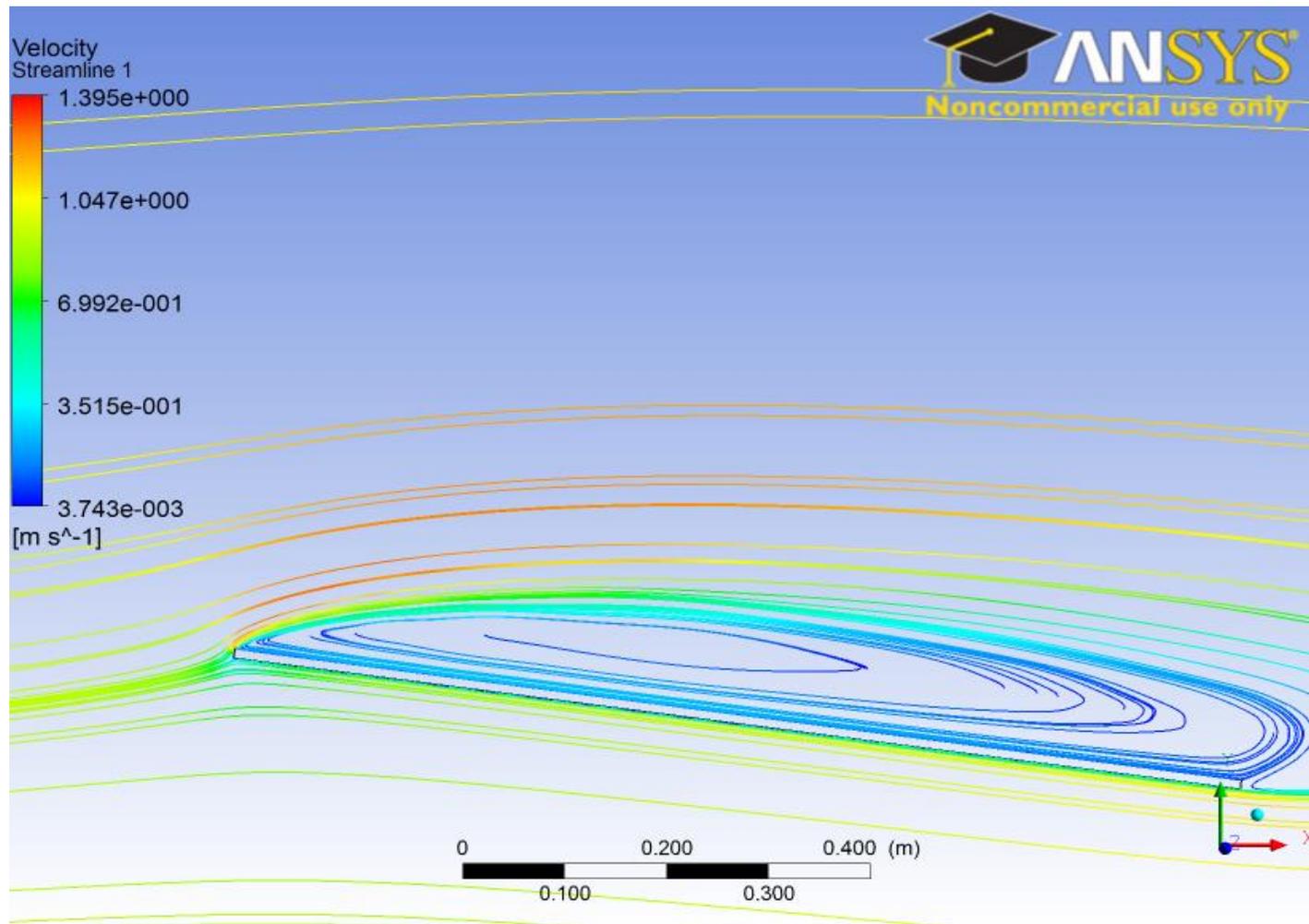


Stromlinien Anstellwinkel= 0 Grad

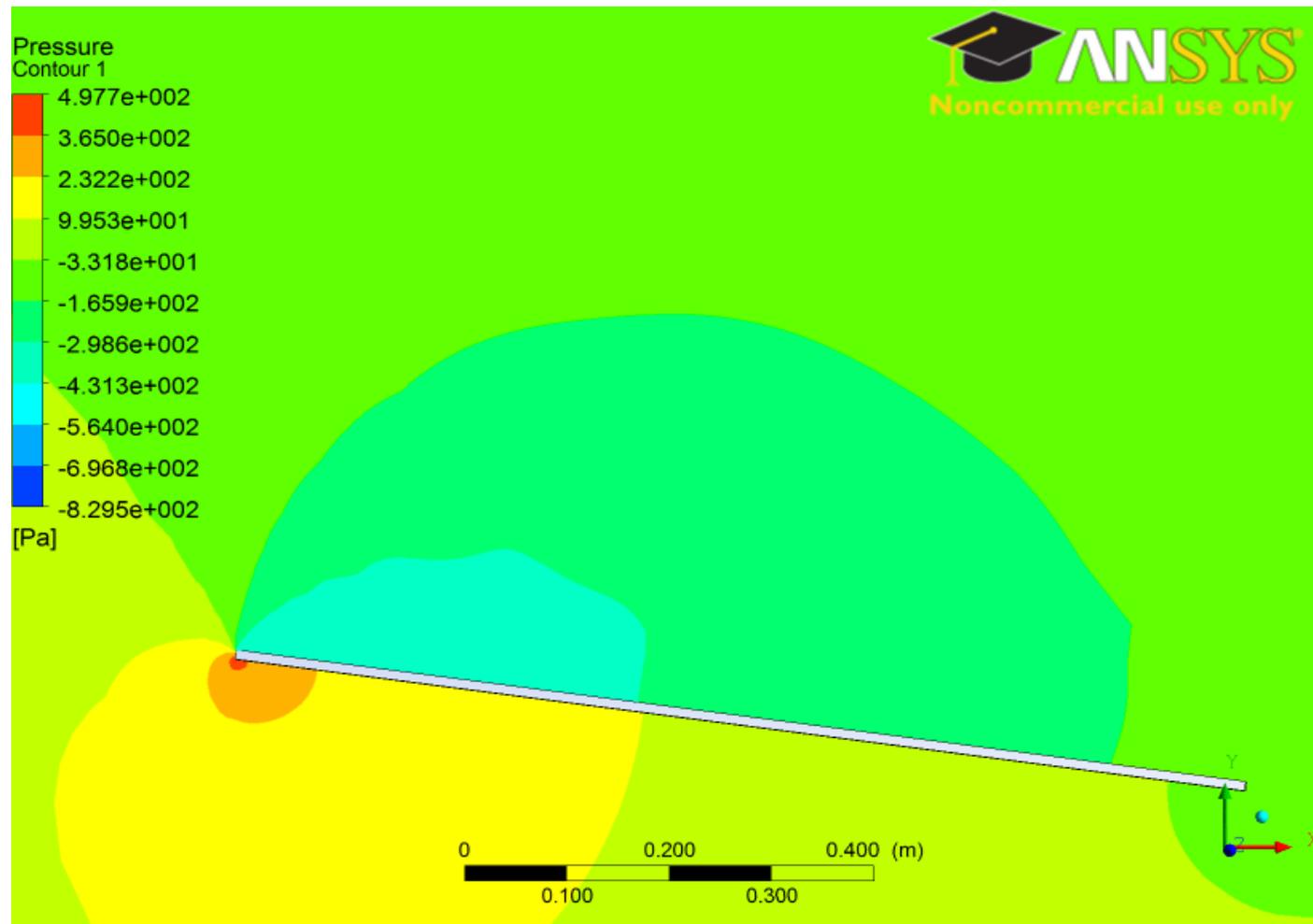
# Strömung um eine ebene Platte



Statischer Druck Anstellwinkel= 0 Grad

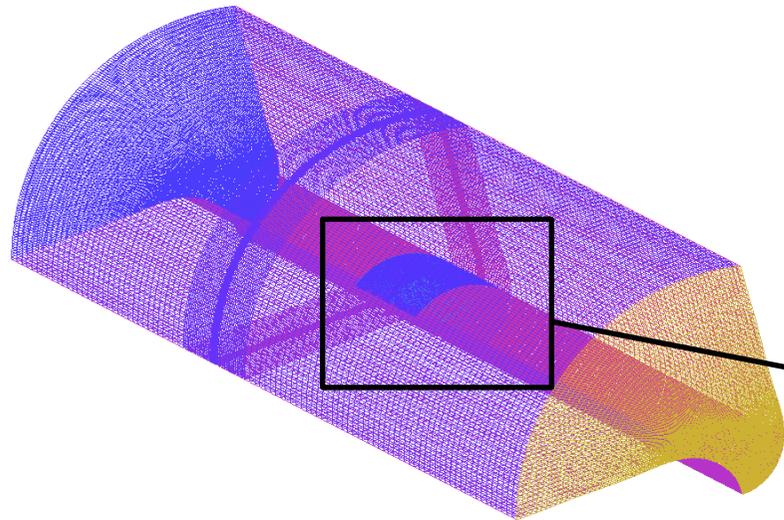


Stromlinien Anstellwinkel= 8 Grad

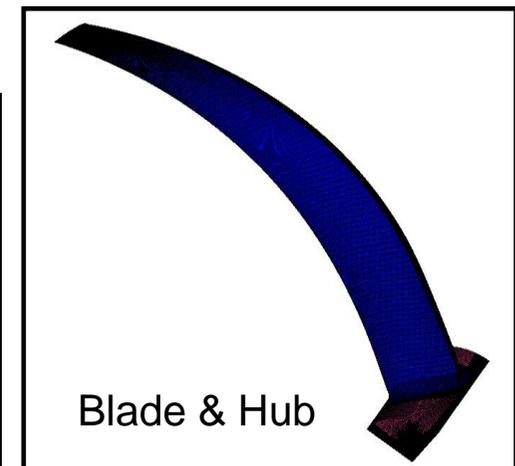
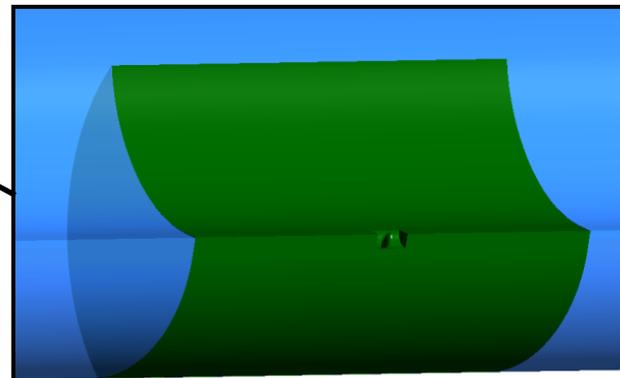
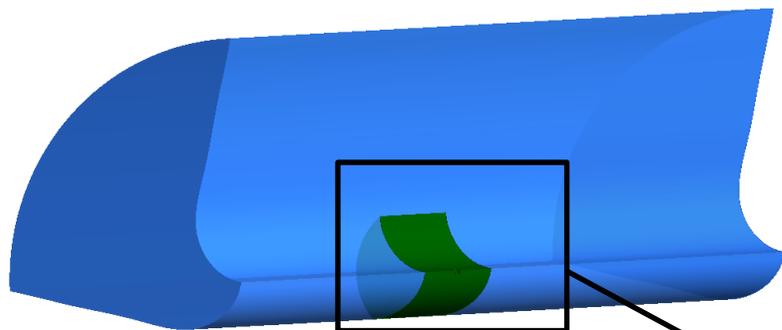
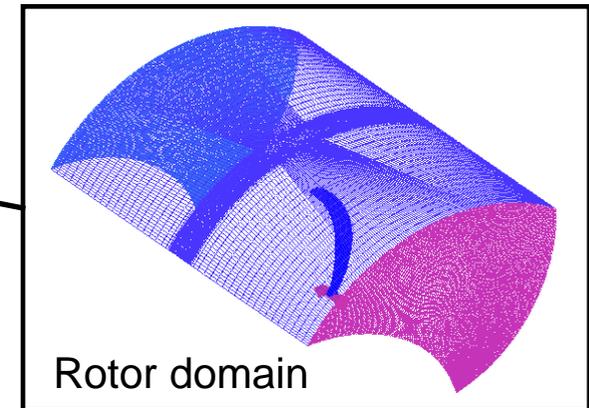


Statische Druck Anstellwinkel= 8 Grad

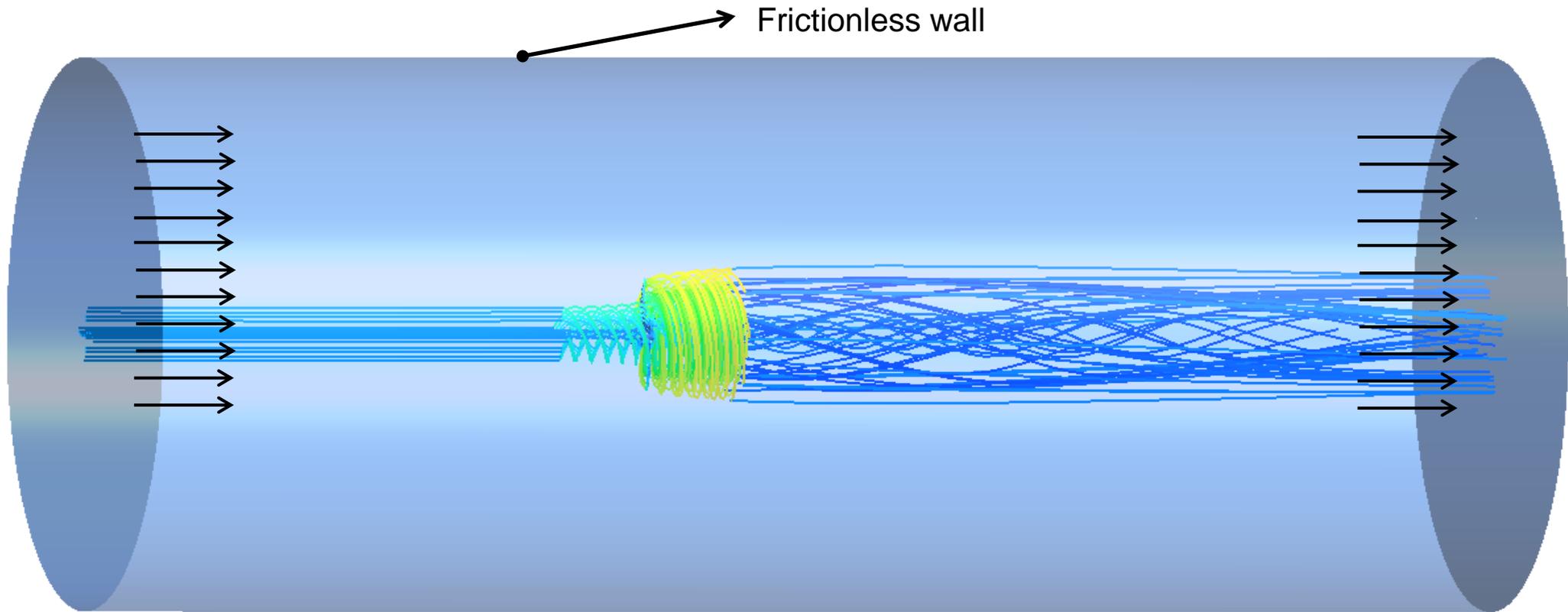
# Veranschaulichung des Wirbelsystems mit Simulationsdaten



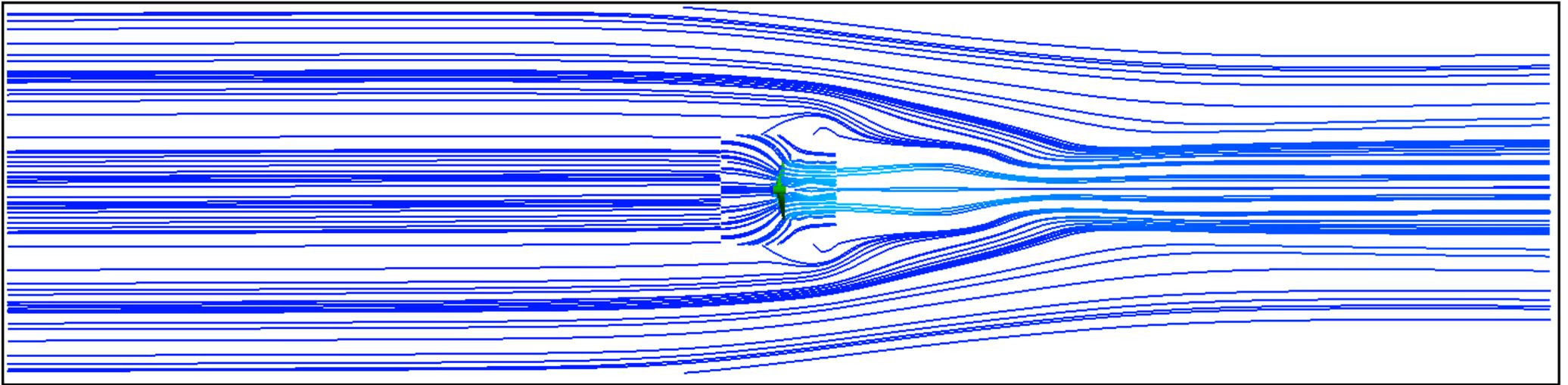
Nodes: 6267292  
Elements: 6093488  
Min Angle: 20 degree



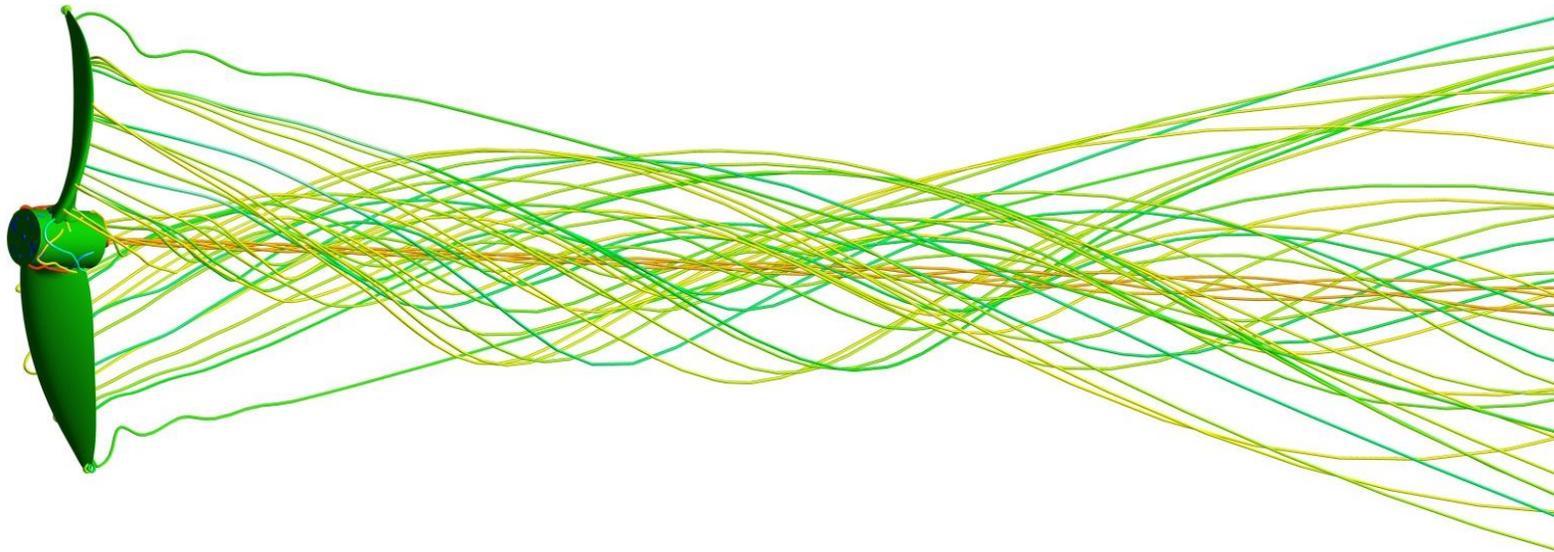
# Simulationsergebnis - Turbinenströmung



# Simulationsergebnisse (in diesem Fall Rotor zur Schuberzeugung)

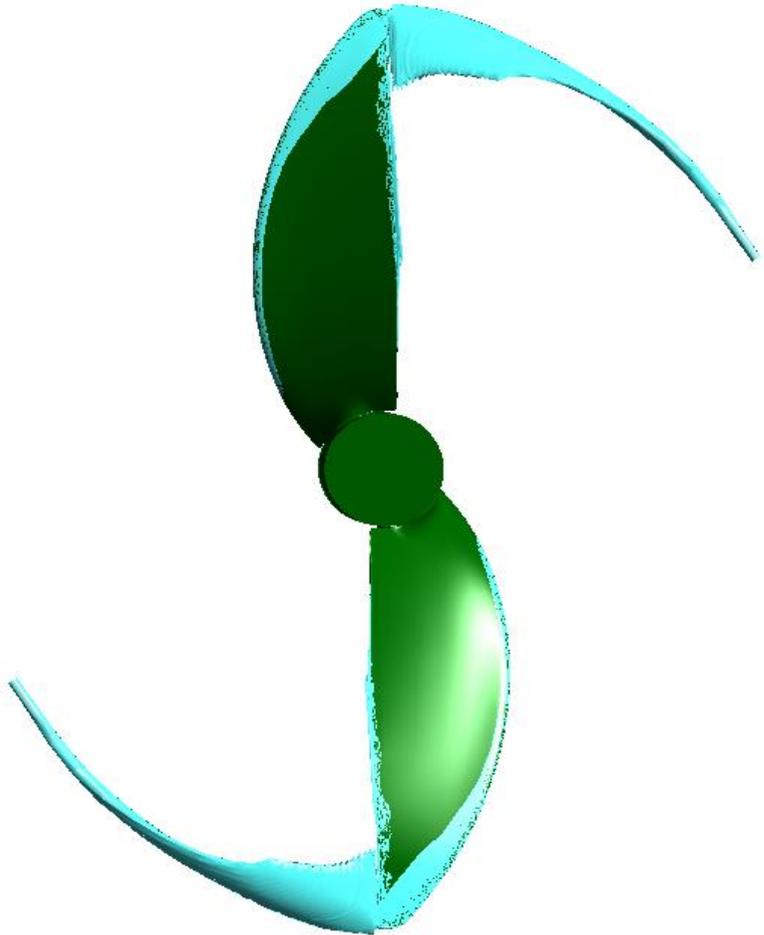


Velocity in stationary frame (Surface streamlines)

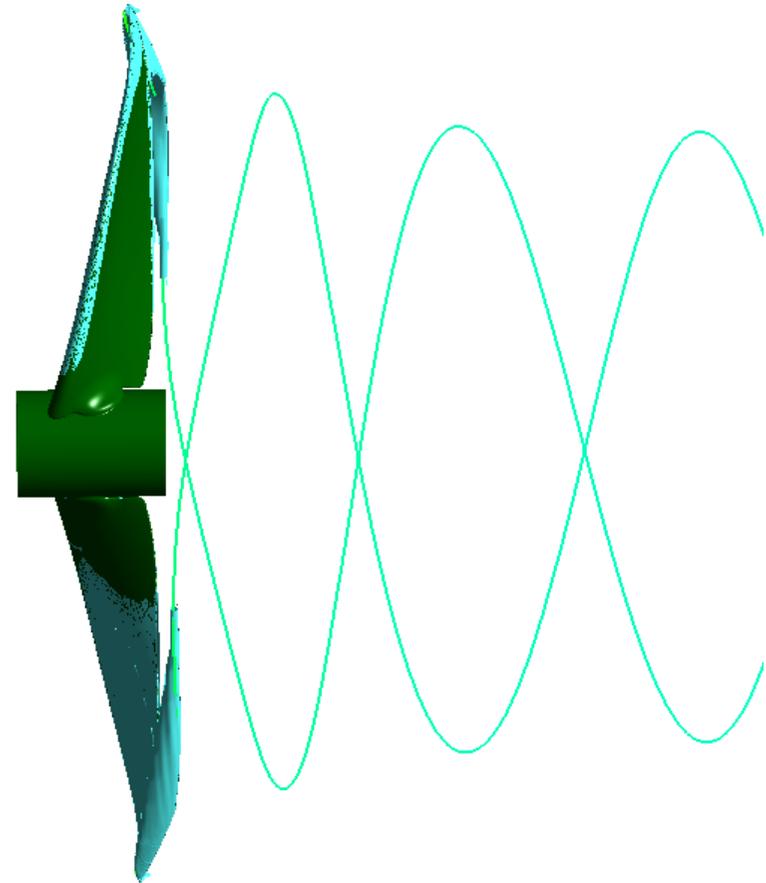


Velocity in stationary frame (3D streamlines)

# Spitzenwirbel aus der Simulation einer Propulsionseinrichtung



Absolute Helicity



Streamlines for tip vortex



Kräfte, die vom Fluid auf einen umströmten Körper ausgeübt werden:

- Kraft parallel zur Anströmrichtung – Widerstandskraft
- Kraft senkrecht zur Anströmrichtung - Auftriebskraft

üblicherweise werden die Widerstands- und die Auftriebskraft auf den Staudruck bezogen, es folgen

- für den Widerstandsbeiwert: 
$$c_w = \frac{F_w}{0.5 \cdot \rho \cdot c^2 \cdot A}$$

und für den Auftriebsbeiwert: 
$$c_a = \frac{F_A}{0.5 \cdot \rho \cdot c^2 \cdot A}$$

## Beispiel: Kreisplatte in Drehung

$$F_w = c_w \frac{\rho}{2} A c^2$$

$$c_w = 1,11$$

$$c = v_w - u \quad u = \omega \cdot r_M$$

$$F_w = 0,5 \cdot c_w \cdot \rho \cdot A \cdot (v_w - u)^2$$

$$P = 0,5 \cdot c_w \cdot A \cdot (v_w - u)^2 \cdot u$$

$$c_p = \frac{P}{P_0} = \frac{\rho/2 c_w A(v_w - u)^2 u}{\rho/2 v_w^3 A}$$

$$c_{p,\max} \quad \text{bei ca.} \quad \frac{u}{v_w} = \frac{1}{3}$$

$$c_{p,\max} = \frac{4}{27} c_w = 0,148 \cdot c_w$$

$$c_{p,\max} \approx 0,17$$



- Ziel ist es, eine möglichst hohe Auftriebskraft bei möglichst kleiner Widerstandskraft zu erreichen
- ein Maß hierfür ist die Gleitzahl

Tafelbild



- Flügel von Vögeln
- Flugzeug
- Strömungsmaschinen
- Abtriebsflügel Formel1- Autos
- usw.



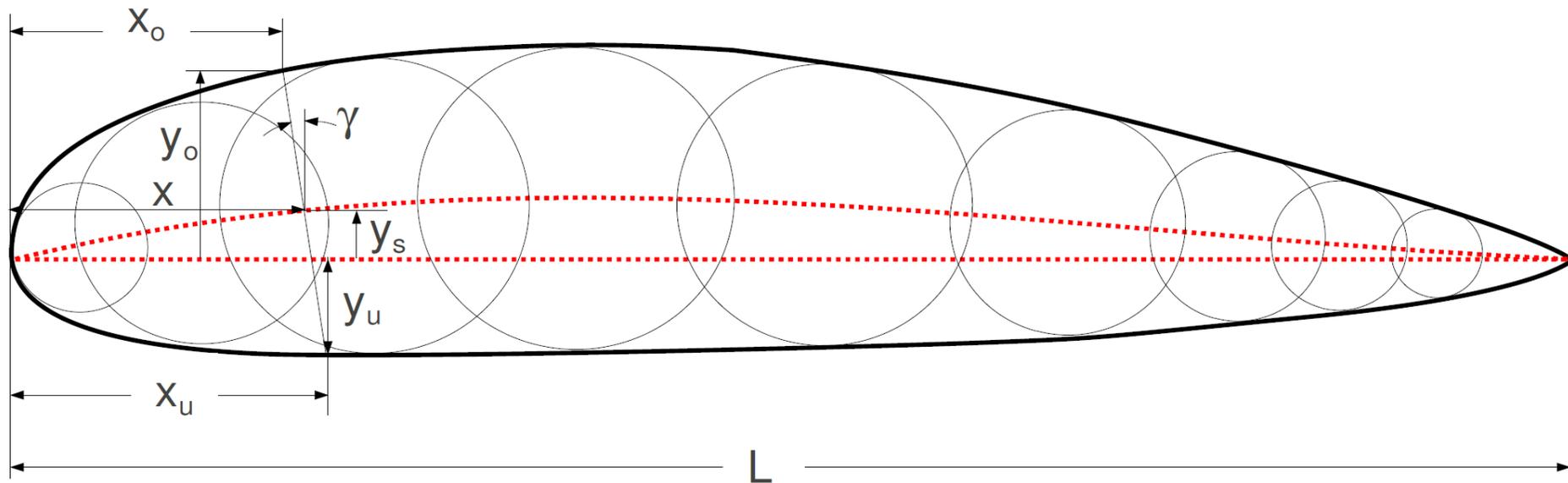
- Beschreibung der Geometrie
- Beschreibung der strömungstechnischen Eigenschaften



- freie Kontur (Erzeugung über Singularitätenverfahren oder völlig beliebig z.B. nach Vorgabe einer Belastungsverteilung)
- Katalogprofile
  - NACA
  - Göttinger Profile
  - Eppler Profile
  - usw.



- Das gewölbte Profil entsteht durch eine Überlagerung eines symmetrischen Tropfens mit einer Skelettlinie.



Oberseite (Saugseite):

$$x_{ob} = x - y^{(t)} \sin \gamma \quad , \quad y_{ob} = y^{(s)} + y^{(t)} \cos \gamma$$

Unterseite (Druckseite):

$$x_u = x + y^{(t)} \sin \gamma \quad , \quad y_u = y^{(s)} - y^{(t)} \cos \gamma$$

<b>Geometrie</b>	$A_{fl}$ Fläche: $A_{fl} = L b$ , $b = \text{konst.}$	<p>                     NA = Nullauftriebsrichtung                      Winkel sind vorzeichenbehaftet                 </p>
	$b$ Breite (Spannweite)	
	$\beta_s$ Staffelungswinkel	
	$d$ maximale Dicke	
	$f$ Wölbung	
	$L$ Länge	
	$r_k$ Kopfradius	
	$x_d$ Dickenrücklage	
	$x_f$ Wölbungsrücklage	
	$y_o$ Koordinaten: Oberseite	
$y_u$ Koordinaten: Unterseite		

Quelle: J.F. Gülich "Kreiselumpen"

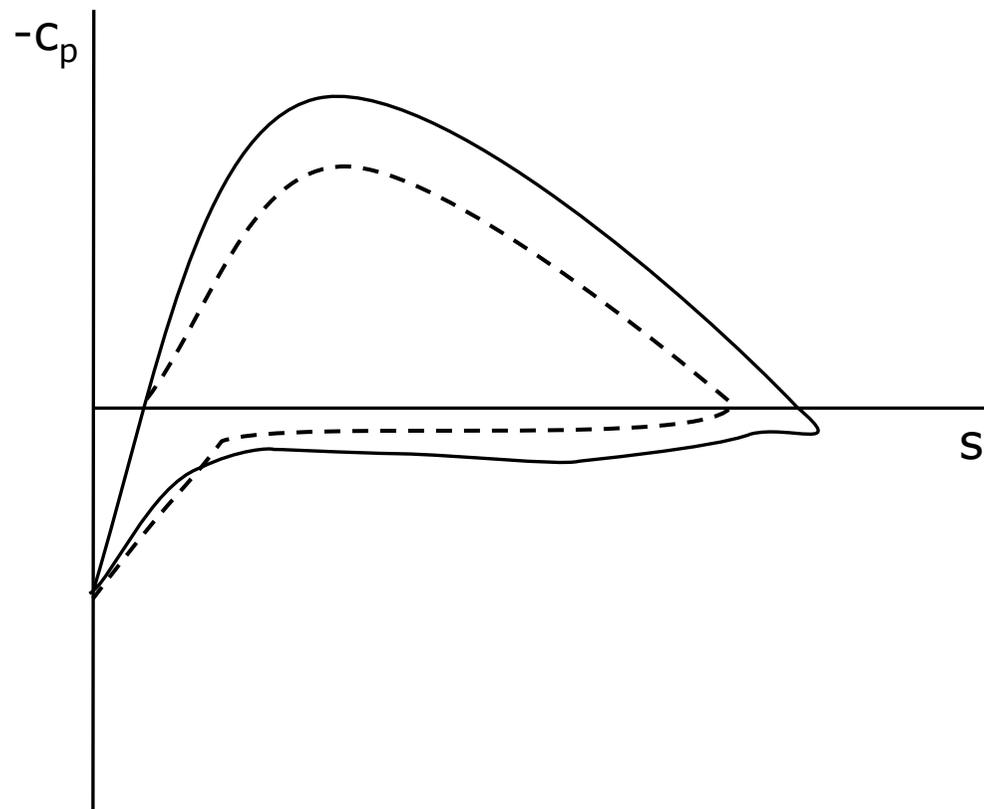
- Druckverteilung um das Profil
- Auftrieb als integraler Wert
- Widerstand als integraler Wert
- Moment
- Gleitzahl

**Messung dieser Werte im Windkanal am Einzelprofil  
oder im Gitterverband.  
Alternative wäre/ist die Berechnung aus Simulationen.**

Die dimensionslose Darstellung der Druckverteilung erfolgt üblicherweise durch Bezug auf den Staudruck. Der dimensionslose Druckbeiwert wird im allg. mit dem Symbol  $c_p$  belegt. Diese Symbol ist in der Windenergietechnik bereits durch den Leistungsbeiwert belegt. Deshalb wird im Rahmen dieser Vorlesung der Druckbeiwert mit dem Index *Druck* versehen.

$$c_{Druck} = \frac{p - p_{\infty}}{0.5 \cdot \rho_{\infty} \cdot c_{\infty}^2}$$

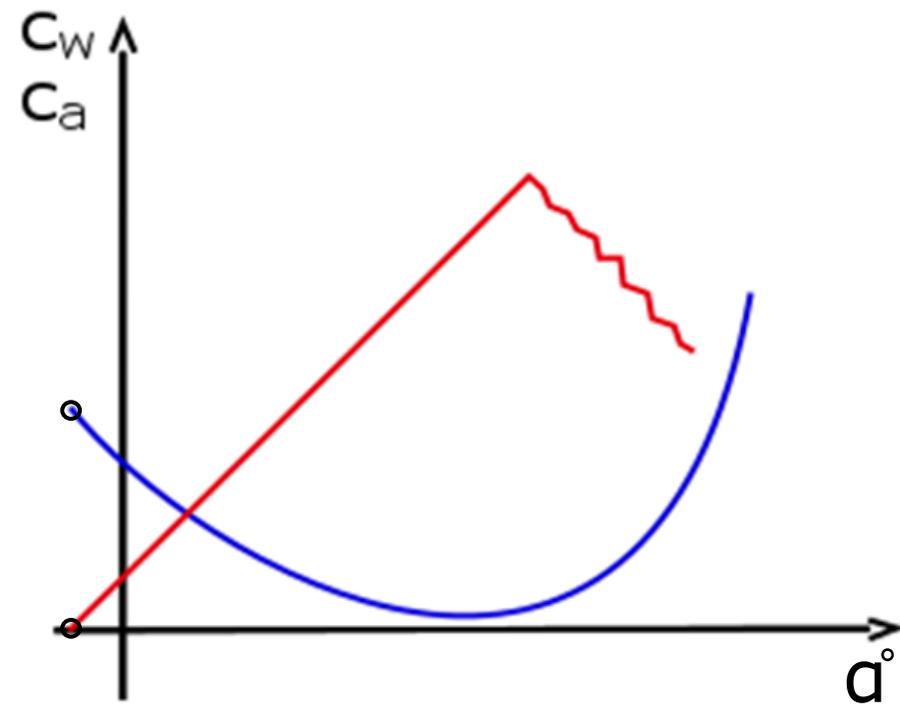
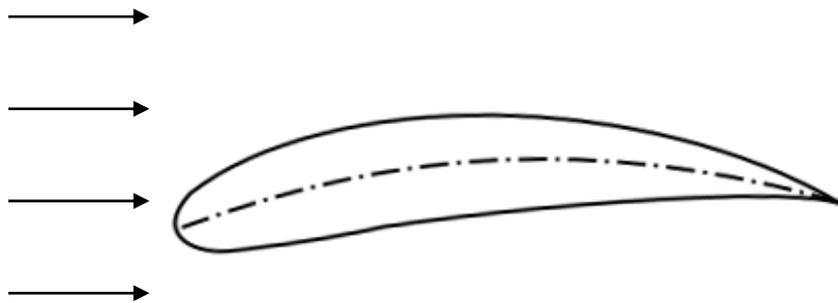
Tafelbild: Druckverteilung am symmetrischen und am unsymmetrischen Profil



Vergleich verschiedener Druckverteilungen um Tragflügel

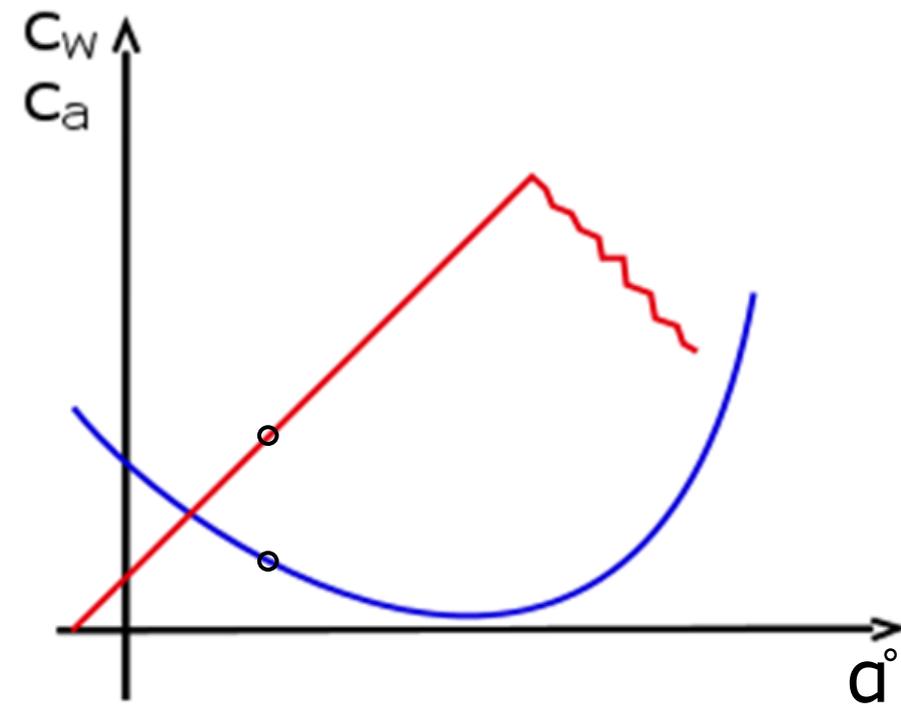
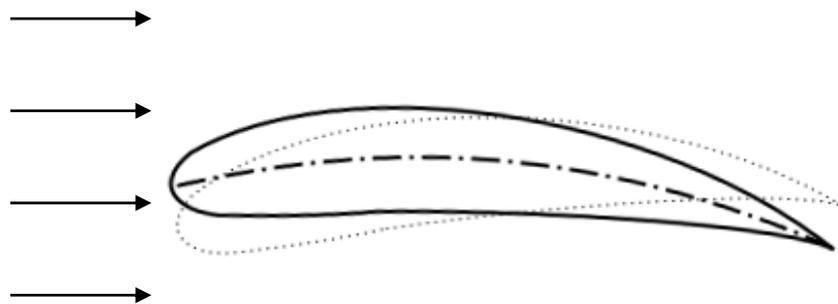
Anstellung  $-3^\circ$

Wind



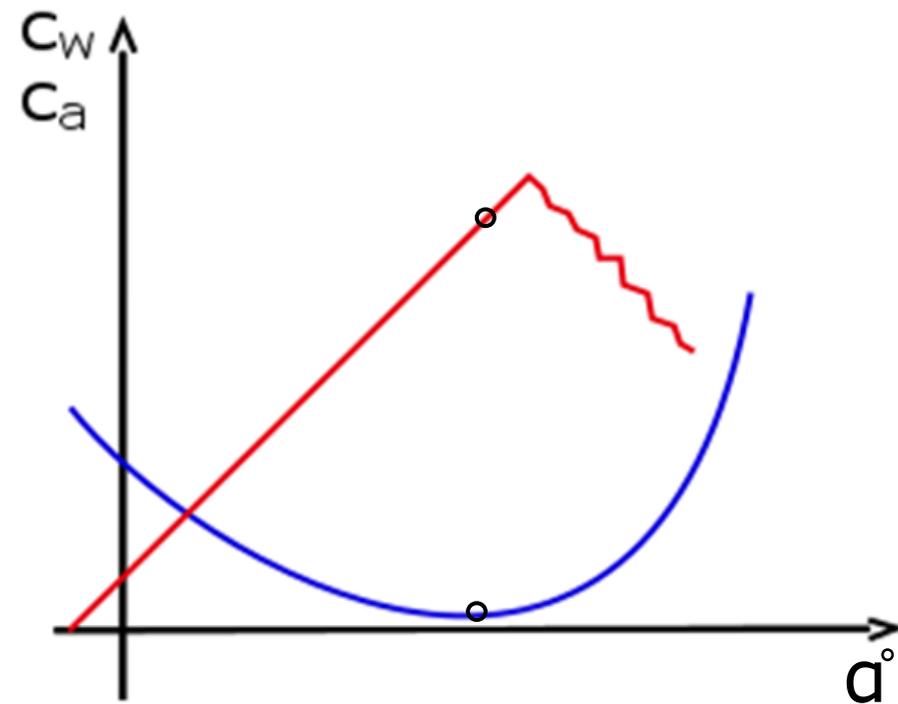
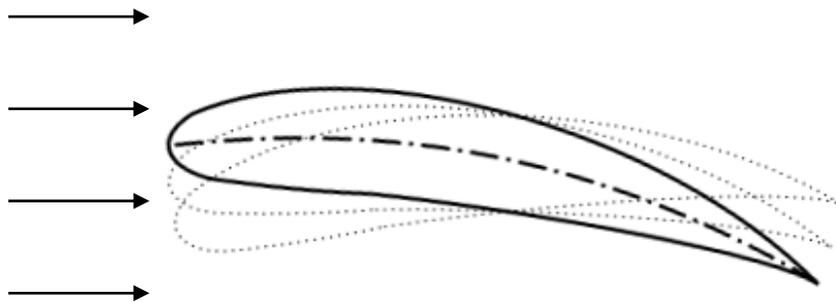
## Anstellung $5^\circ$

Wind



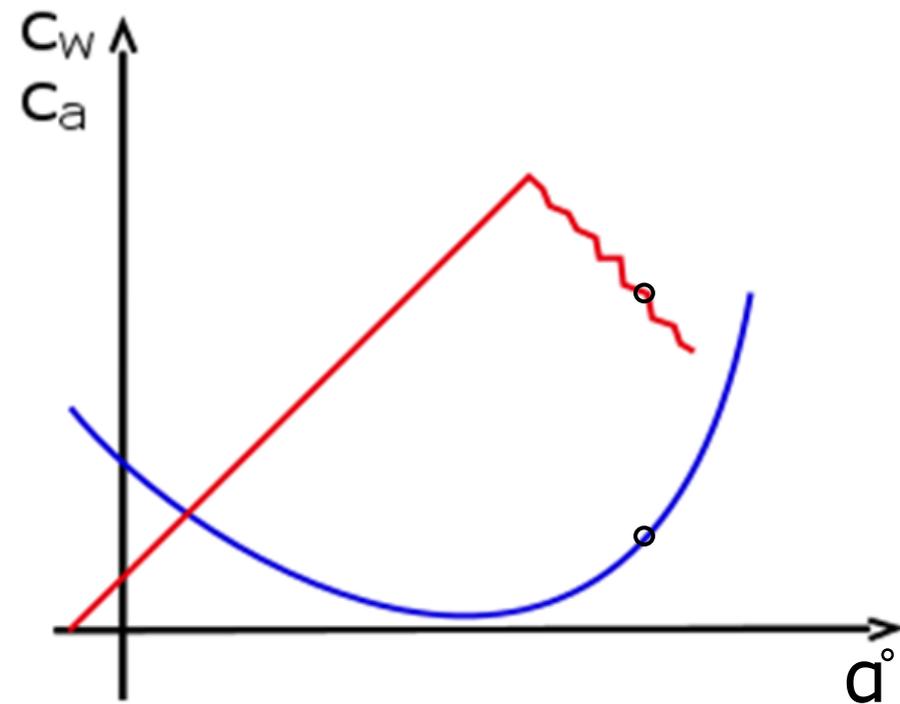
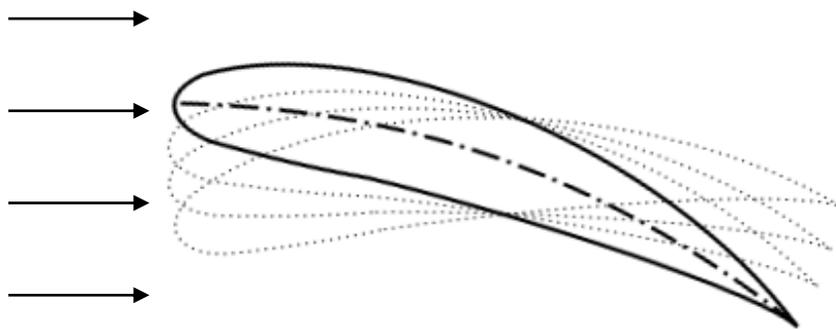
## Anstellung $12^\circ$

Wind



## Anstellung $20^\circ$

Wind



- ▶ Nutzung des Singularitätenverfahrens (Potentialtheorie)
- ▶ Beschreibung der Wirkung eines Tragflügels durch freie und gebundene Wirbel und ggf. durch weitere Singularitäten

Tafelbilder: Singularitätenverfahren