

Universität  
Rostock



Traditio et Innovatio



# Windturbinen und alternative Energiequellen WS 2015/16

## **Grundlagen der Aerodynamik**

Prof. Dr. Hendrik Wurm

Lehrstuhl für Strömungsmaschinen

# Wofür brauchen wir die Aerodynamik?

Entwurf des Rotors

Sensoren

Strömungstechnische Optimierung

Verlustminimierung

Geräuschminimierung

Kräfteminimierung

Untersuchung von Zulaufstörungen

Untersuchung gegenseitiger Einfluss der Windturbinen in Windparks

Akustik

# Grundlagen zum Verständnis der aerodynamischen Funktionsweise von WKA



- Wie entsteht der Auftrieb an einem Körper?
- Warum dreht sich der Rotor einer Windkraftanlage?



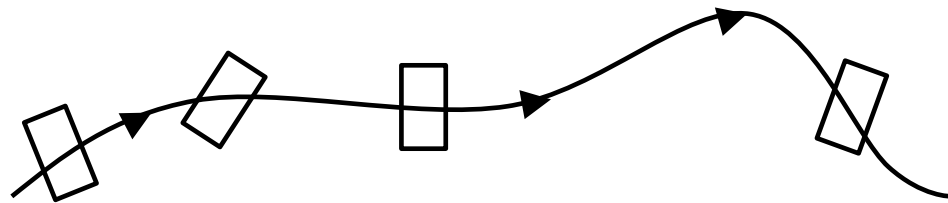
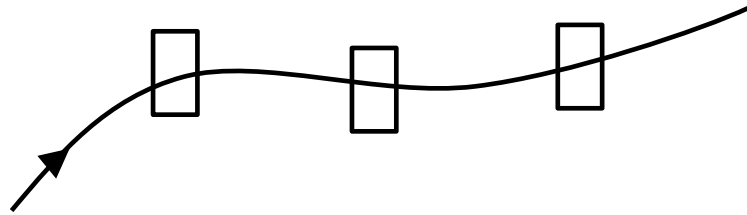
a) Lagrangesche Betrachtungsweise

b) Eulersche Betrachtungsweise

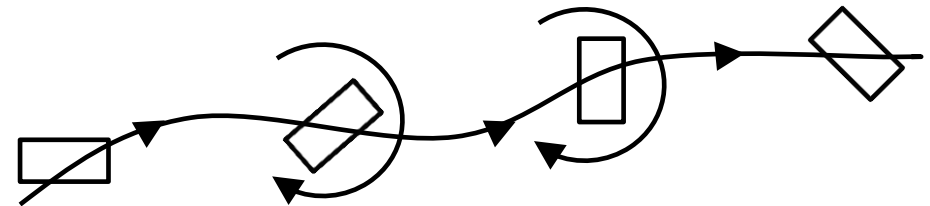
# Grundlagen zum Verständnis der Tragflügelumströmung

- Drehung einer Strömung
- Wirbel und Zirkulation
- Helmholtzsche Wirbelsätze
- Gesetz von Biot-Savart
- Zirkulation am Tragflügel

# Drehung in einer Strömung



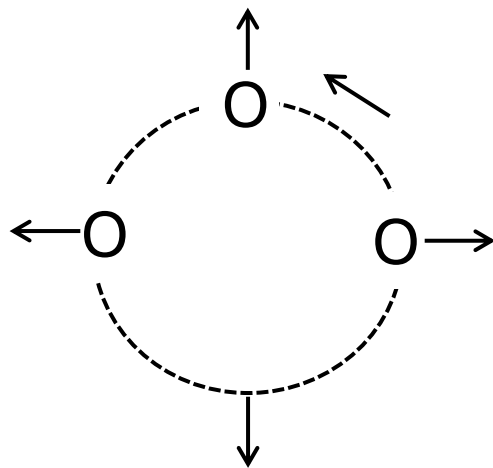
drehungsfreie Strömung



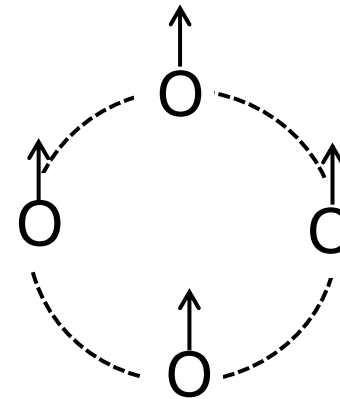
drehungsbehaftete Strömung

Drehung ist das Ergebnis der wirkenden Schubspannungen

Gefäß in einer Flüssigkeit rotiert



drehungsbehaftet



drehungsfrei

Drehung resultiert aus den Schubspannungen an den Rändern (Wänden) oder dem Vorhandensein eines Druckgradienten.

## Wirbelstärke

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

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

Drehvektor  $\vec{\omega}$

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

Tafelbild 1

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.

Tafelbilder 2,3,4



1. Die Wirbelstärke einer Wirbelröhre ist konstant.
2. Wirbelröhren bestehen immer aus denselben materiellen Teilchen.
3. Die Zirkulation einer Wirbelröhre bleibt zeitlich konstant.

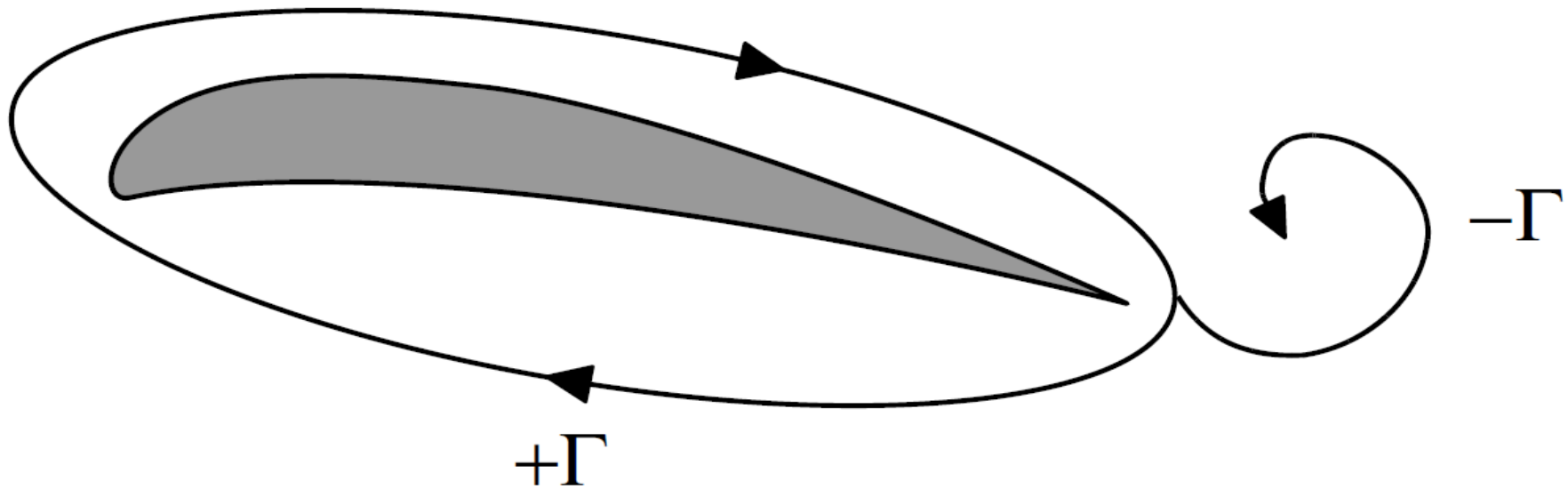
Tafelbilder



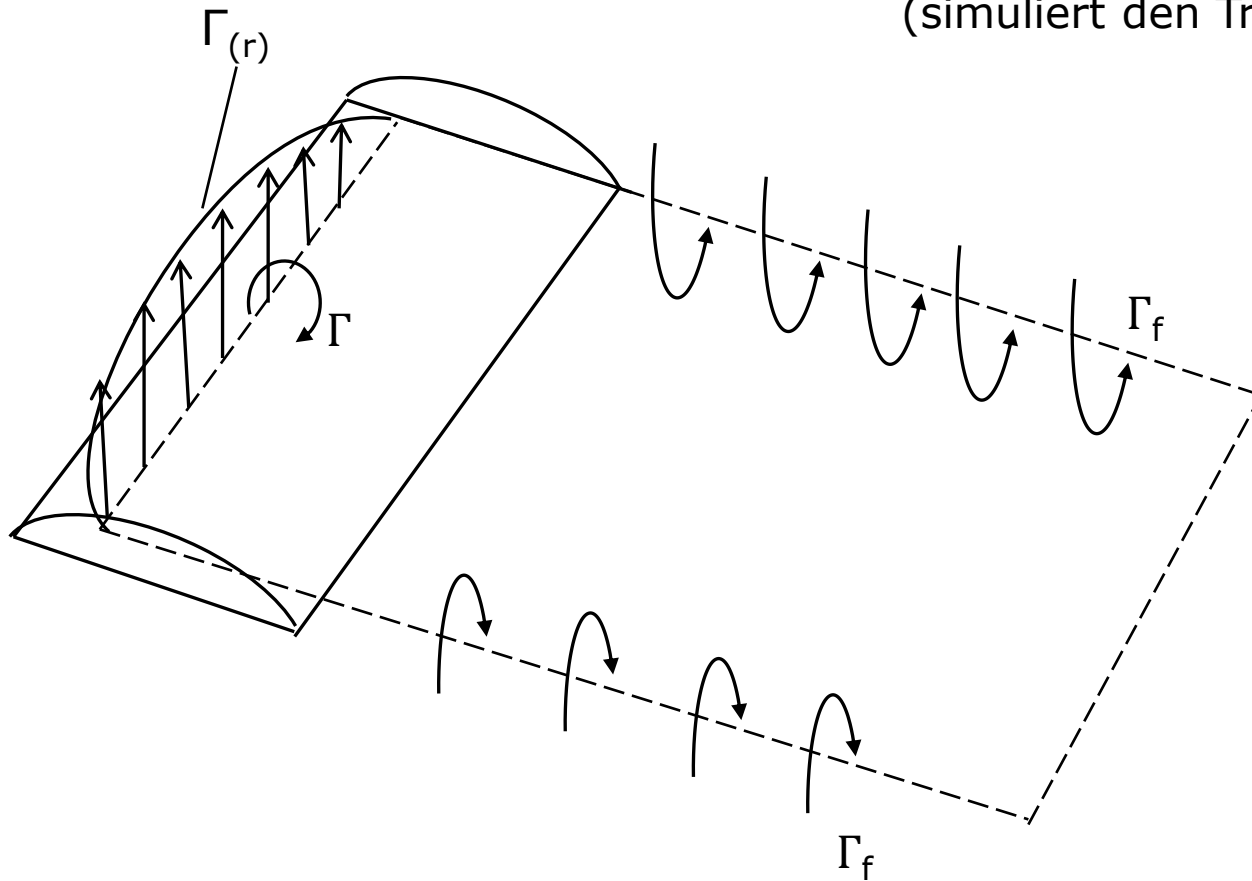
Die Ableitung des Biot-Savartschen Gesetzes erfolgte eigentlich, um einen Zusammenhang zwischen der magnetischer Feldstärke  $H$  und der Stromdichte  $J$  herzustellen.

Angewandt auf die Strömungsmechanik folgt aus dem Biot-Savartschen Gesetz, dass ein Wirbelelement in einem Fluid an der Stelle  $P$  eine Geschwindigkeit  $\mathbf{c}$  induziert.

Tafelbild

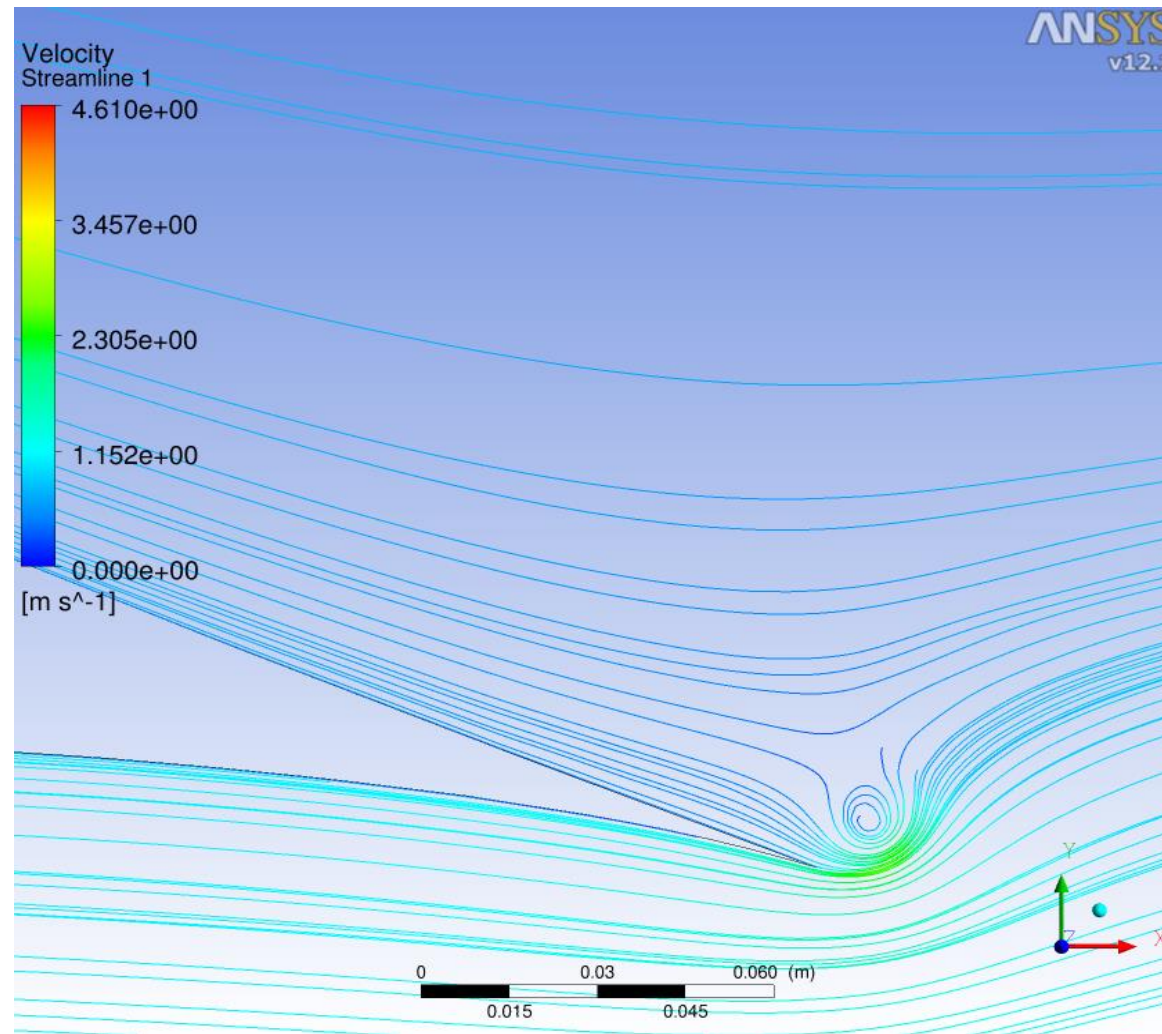


$\Gamma_{(r)}$  ...Zirkulation des gebundenen Wirbels  
(simuliert den Tragflügel)



$\Gamma_{(f)}$  ...freie Wirbel

Tafelbild: Randwirbel



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

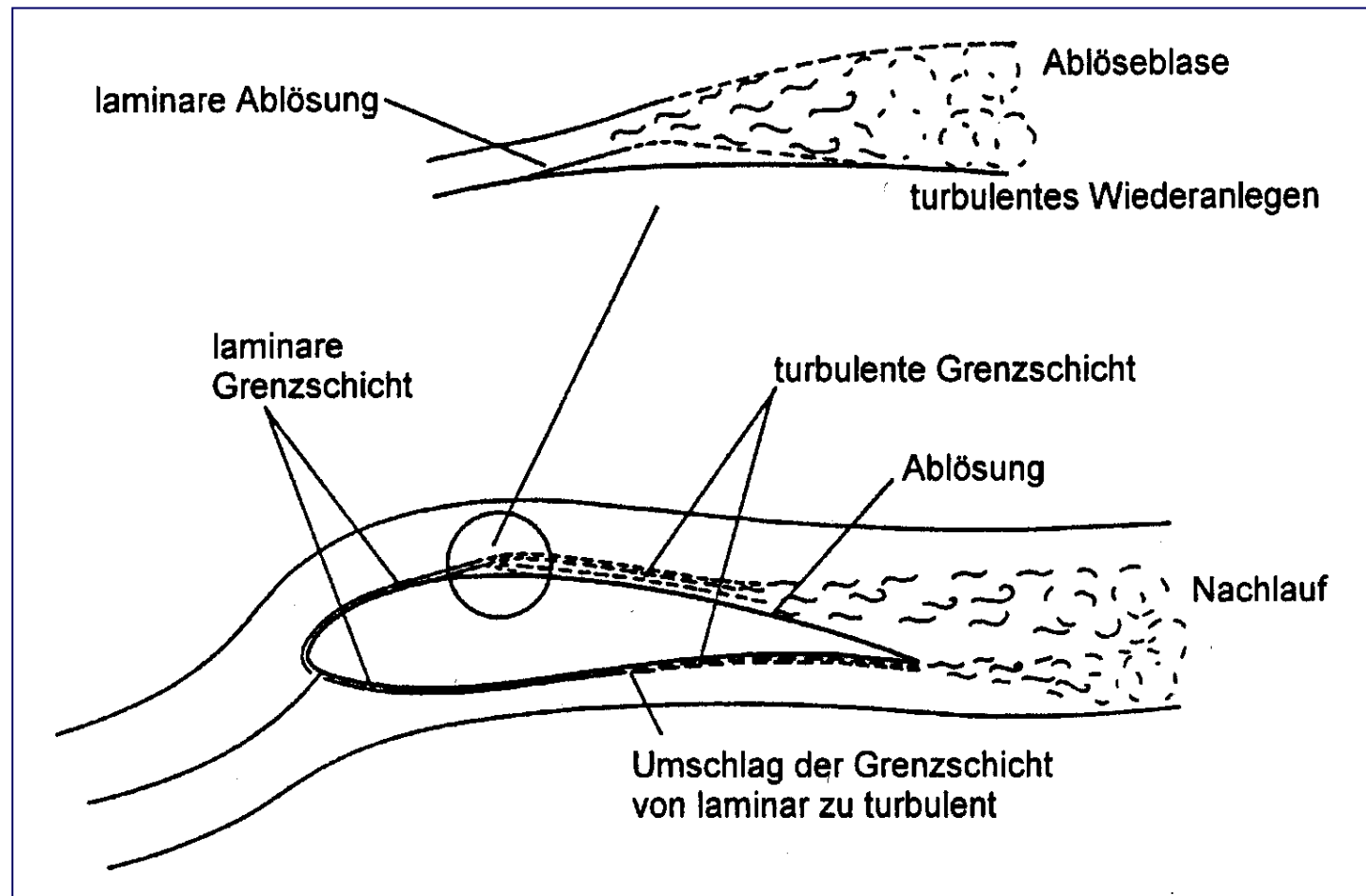
(Satz von Kutta, Joukowski)

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



- ▶ Analyse des gesamten Strömungsfeldes an einem Rotor
- ▶ Strömungsfelder können mit unterschiedlichen Methoden modelliert werden.
- ▶ Die Auswahl einer Methode setzt die Kenntnis der Annahmen bei der Ableitung der Methode voraus!

# Beispiel: Strömungsablösung am Tragflügel



Strömungen um  
einen Tragflügel



- ▶ dreidimensional
- ▶ instationär
- ▶ turbulent
- ▶ teilweise mit Transition

Mathematische Beschreibung durch ein System partieller DGLn.

## **Turbulenz in Strömungen führt zu:**

- ▶ erhöhten Reibungsverlusten
- ▶ Verschiebung des Ablösezeitpunktes
- ▶ Lärm
- ▶ Intensivierung von Vermischungsvorgängen



Für die Ableitung der beschreibenden Differentialgleichungen werden die Erhaltungsgrößen an einem Volumenelement bilanziert:

Masse

Impuls

Energie

Zu Details der Ableitung der Differentialgleichungen wird auf die Vorlesung „Hydraulische Strömungsmaschinen“ verwiesen.

Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$$

Navier - Stokes - Gleichungen

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \rho f_i - \frac{1}{\partial x_i} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

4 unbekannte Größen :

$$u_1, u_2, u_3, p$$

4 Gleichungen und geeignete Anfangs- und Randbedingungen

Lösung: a) Direkte Numerische Simulation

b) Large Eddy Simulation

b) Zeitliche Mittelung  $\Rightarrow$  mittlere Strömungskräfte  
mittlere Drücke  
mittlere Geschwindigkeiten  
Statische Behandlung der Turbulenz



- Die Anwendung dieser bzw. vereinfachter Gleichungen zur strömungstechnischen Optimierung von Rotoren wird in der Vorlesung 6 „Aerodynamische Optimierung“ besprochen.



Wann muss bei der Analyse einer Strömung das strömende Fluid als kompressibel betrachtet werden?



- 1) subsonische Strömung  $c < a$
- 2) transsonische Strömung  $c \sim a$
- 3) supersonische Strömung  $c > a$

Kategorisierung mit Hilfe der Machzahl  $Ma = c/a$  (örtliche Machzahl)

# Fortpflanzungsgeschwindigkeit kleiner Druckstörungen (Wellenausbreitungsgeschwindigkeit)

## Schallgeschwindigkeit

$$a^2 = \frac{dp}{d\rho}$$

Für isentrope Zustandsänderungen gilt:

$$\frac{dp}{d\rho} = \kappa \frac{p}{\rho}$$

$$a = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}}$$

$$p = \rho \cdot R \cdot T$$

$$a = \sqrt{\kappa R T}$$

→ a wird mit kleiner werdender Temperatur kleiner

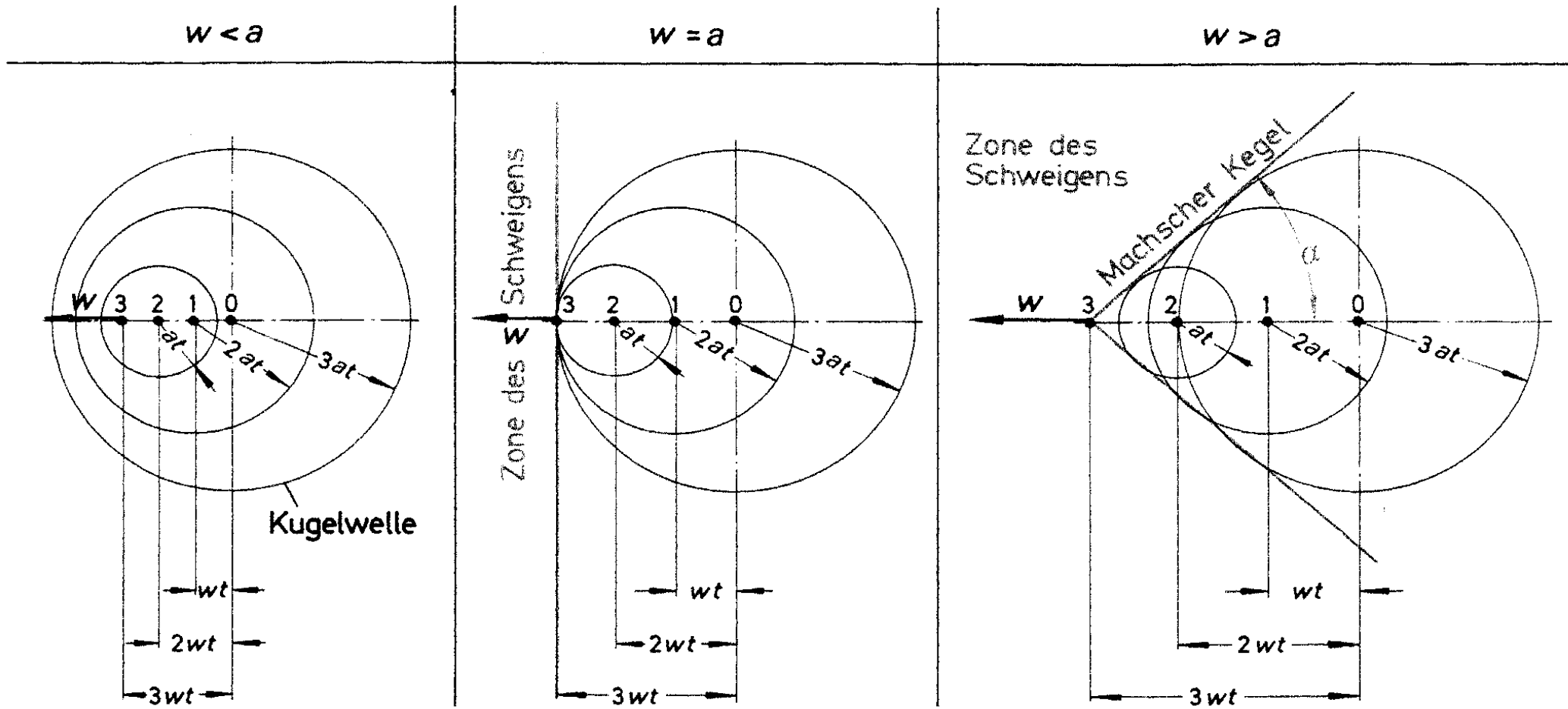
## Schallgeschwindigkeit bei 25°C

Luft  $a = 347 \text{ [m/s]}$

zum Vergleich

$a_{\text{Stahl}} = 5100 \text{ m/s}$

$a_{\text{Wasser}} = 1400 \text{ m/s}$



Für Machzahlen  $Ma < 0,4$  können Kompressibilitätseffekte in der Regel vernachlässigt werden.

Beispiel:

Windturbine: Siemens SWT-2,3-101

Rotordurchmesser: 101 m , Drehzahl: bis 16 1/Min

$$u_{\text{außen}} = 85 \text{ m/s} \quad Ma = 0,24$$

Vision für Weiterentwicklung: Rotordurchmesser: 200 m , Drehzahl: 32 1/Min

$$u_{\text{außen}} = 335 \text{ m/s} \quad Ma = 0,96 \text{ geht das???}$$