

# Entwurf von Schiffspropellern mittels potentialtheoretischer Verfahren

*Lehrstuhl für Strömungsmaschinen*



## Inhaltsverzeichnis

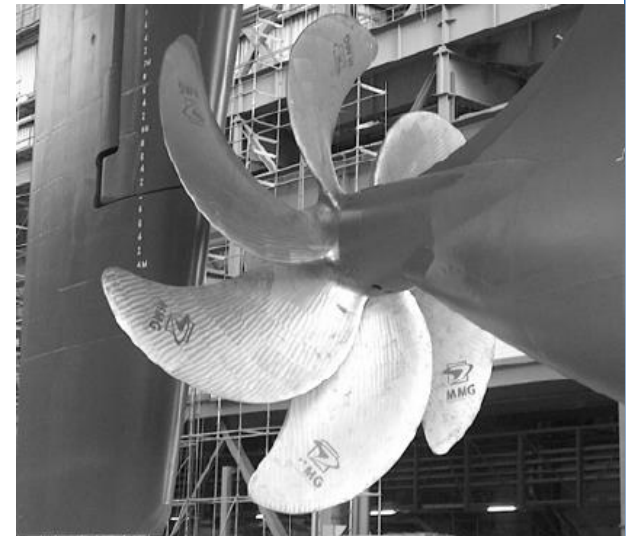
- 1. Der Schiffspropeller**
2. Physikalische Theorien
  - a) Strahltheorie des Propellers
  - b) Profiltheorie des Propellerblattes
  - c) Wirbeltheorie des Propellers
3. Allgemeines Entwurfskonzept
4. ENT-Fix –Entwurfsprogramm

## Der Schiffpropeller

### Allgemeines

- häufigstes Propulsionsorgan bei Schiffen
- verschiedene Typen:
  - Verstellpropeller
  - Düsenpropeller
  - Ruderpropeller
  - **Festpropeller**

Schraubenpropeller – gleiches Wirkprinzip

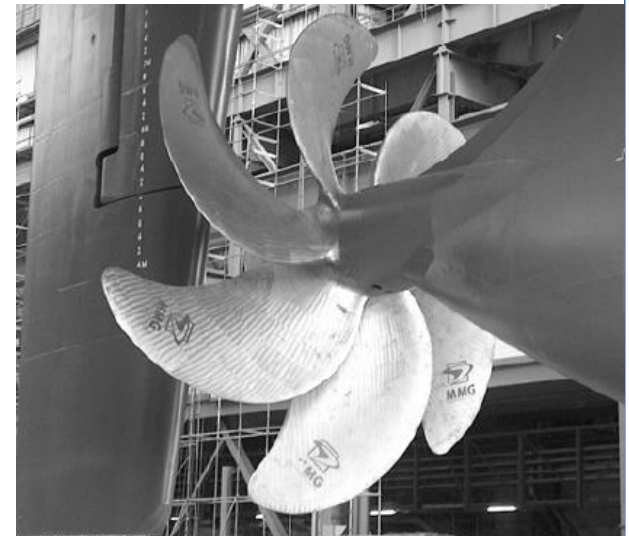


Kornev.: „Propellertheorie“

## Der Schiffpropeller

### Allgemeines

- häufigstes Propulsionsorgan bei Schiffen
  - verschiedene Typen:
    - Verstellpropeller
    - Düsenpropeller
    - Ruderpropeller
    - **Festpropeller**
- Schraubenpropeller – gleiches Wirkprinzip
- Aufgaben bzw. Effekte des Propellers:
    - **Schub für Fahrt → Antriebsorgan**
    - Manövrierorgan
    - Geräusch- und Vibrationsquelle
    - Teil der Maschinenanlage



Kornev.: „Propellertheorie“

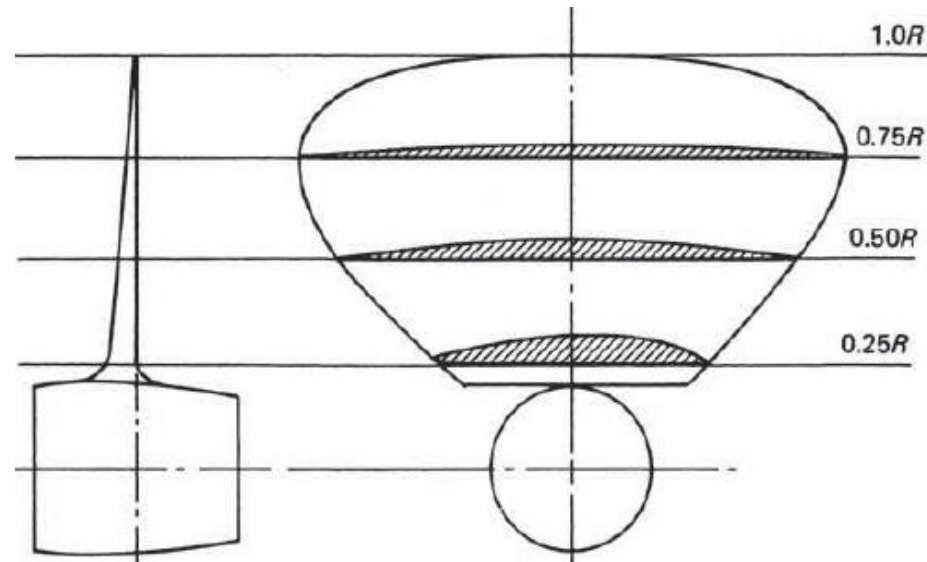
## Geometrie und Kenndaten des Schiffpropellers

### Geometrie

- Durchmesser und Nabendurchmesser
- Flügelzahl
- Steigung
- Profildaten
- Skew
- Rake

### Kenndaten

- Schub
- Drehmoment
- Drehzahl
- Vortriebsgeschwindigkeit
- Wirkungsgrad



Carlton: „Marine Propellers and Propulsion“

# Der Schiffpropeller

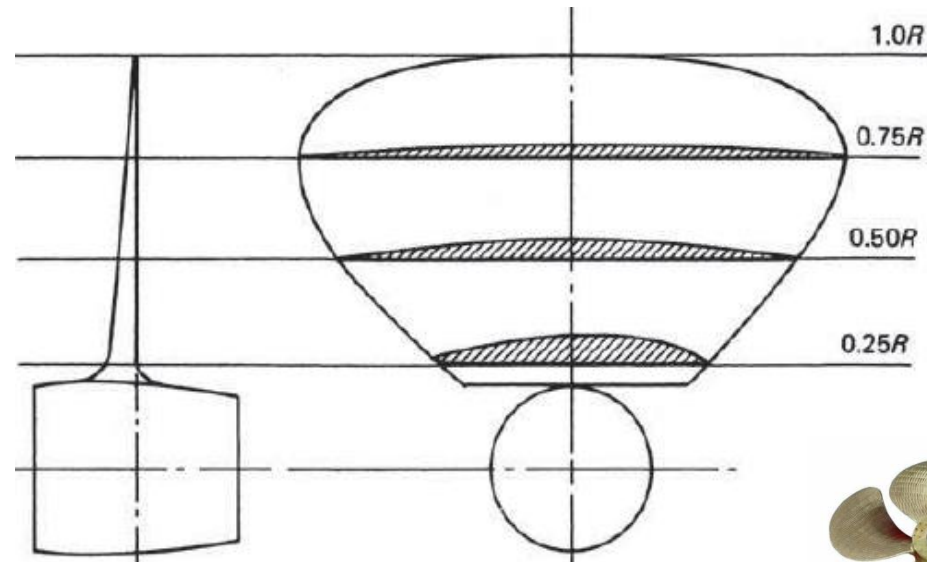
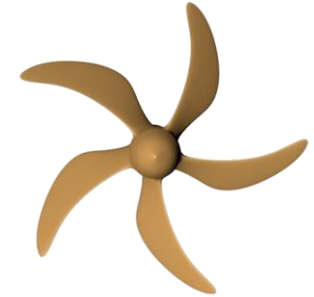
## Geometrie und Kenndaten des Schiffpropellers

### Geometrie

- Durchmesser und Nabendurchmesser
- **Flügelzahl**
- Steigung
- Profildaten
- Skew
- Rake

### Kenndaten

- Schub
- Drehmoment
- Drehzahl
- Vortriebsgeschwindigkeit
- Wirkungsgrad



Carlton: „Marine Propellers and Propulsion“



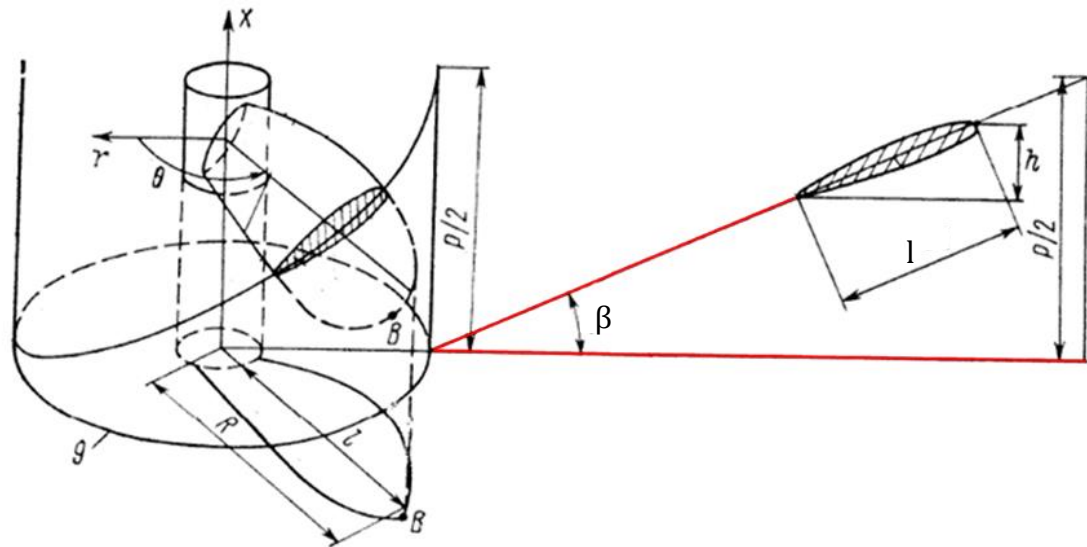
## Geometrie und Kenndaten des Schiffspropellers

### Geometrie

- Durchmesser und Nabendurchmesser
- Flügelzahl
- **Steigung**
- Profildaten
- Skew
- Rake

### Kenndaten

- Schub
- Drehmoment
- Drehzahl
- Vortriebsgeschwindigkeit
- Wirkungsgrad



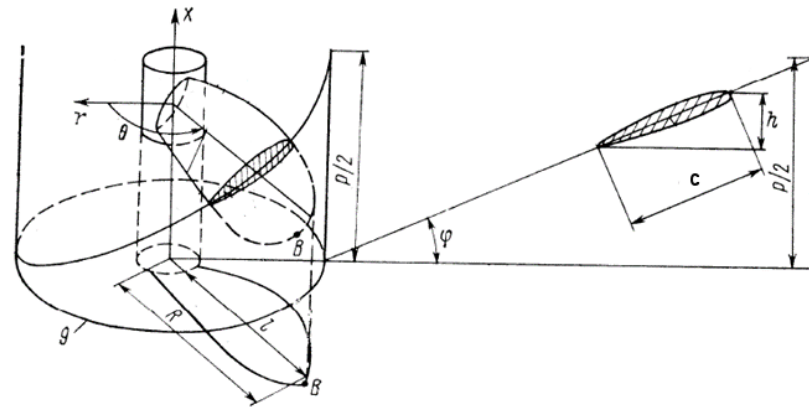
Kornev.: „Propellertheorie“

# Der Schiffpropeller

## Geometrie und Kenndaten des Schiffpropellers

### Geometrie

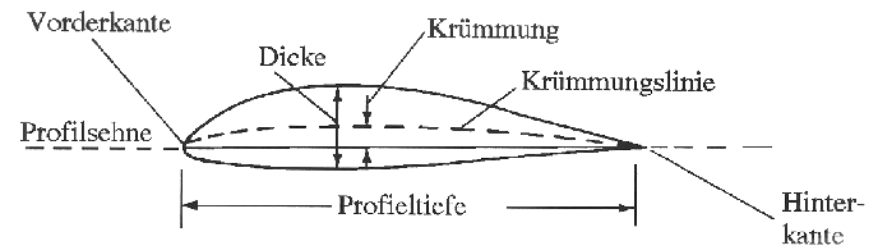
- Durchmesser und Nabendurchmesser
- Flügelzahl
- Steigung
- Profildaten (Länge, Dicke, Wölbung über Radius)
- Skew
- Rake



### Kenndaten

- Schub
- Drehmoment
- Wirkungsgrad
- Drehzahl
- Vortriebsgeschwindigkeit

Kornev.: „Propellertheorie“



Rill.: „Aerodynamik des Flugzeuges“

# Der Schiffpropeller

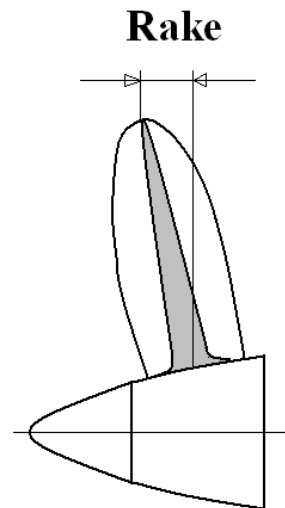
## Geometrie und Kenndaten des Schiffpropellers

### Geometrie

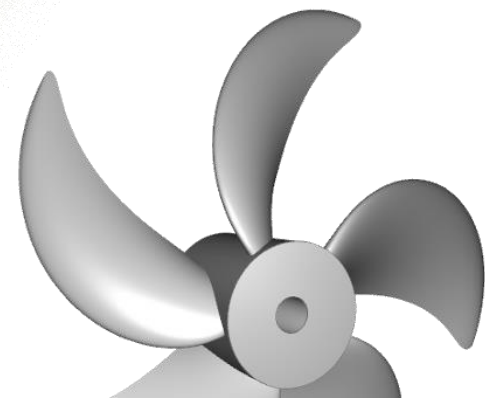
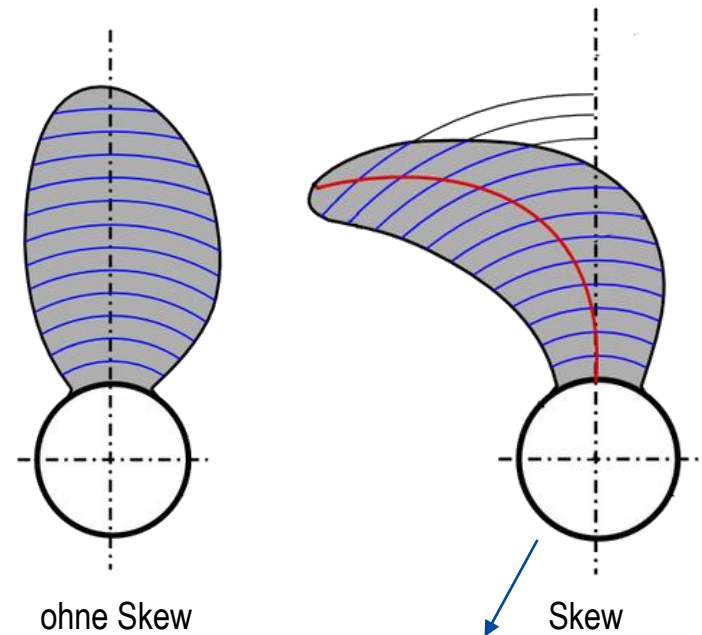
- Durchmesser und Nabendurchmesser
- Flügelzahl
- Steigung
- Profildaten (Dicke, Wölbung, Länge über Radius)
- **Skew**
- **Rake**

### Kenndaten

- Schub
- Drehmoment
- Drehzahl
- Vortriebsgeschwindigkeit
- Wirkungsgrad



Kornev.: „Propellertheorie“



## Geometrie und Kenndaten des Schiffpropellers

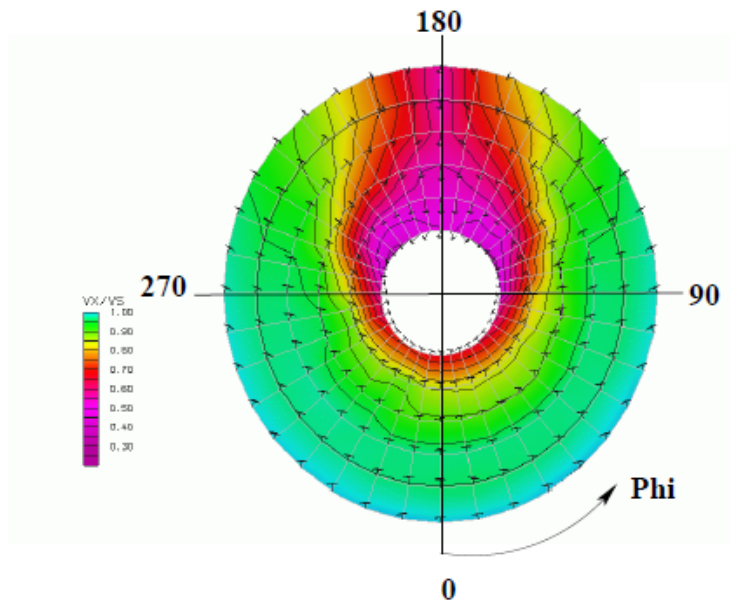
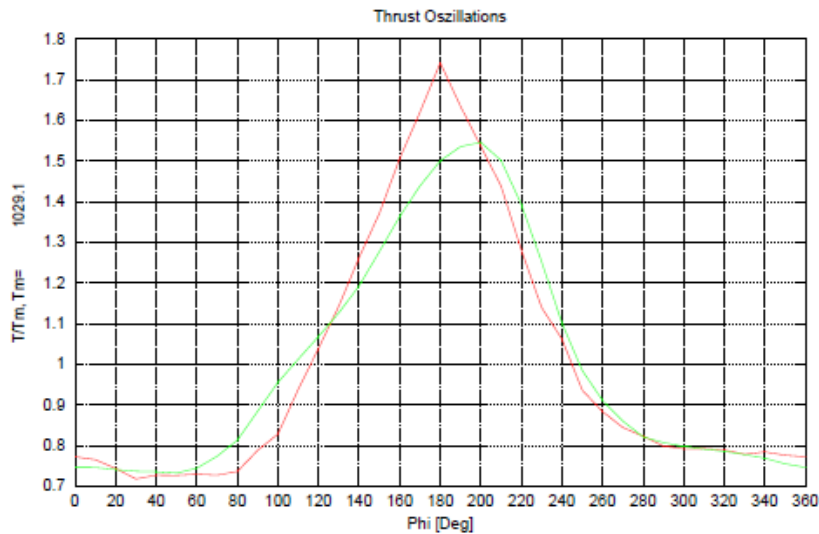


Abbildung 7: Veranschaulichung der Abminderung von Schub- und Momentenschwankungen eines Propellers mit (gruen) und ohne Skew (rot) im Nachstrom eines Einschraubers (rechts).

Krüger.: „Schiffspropeller“

# Der Schiffpropeller

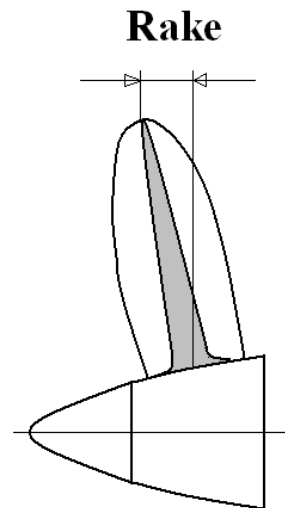
## Geometrie und Kenndaten des Schiffspropellers

### Geometrie

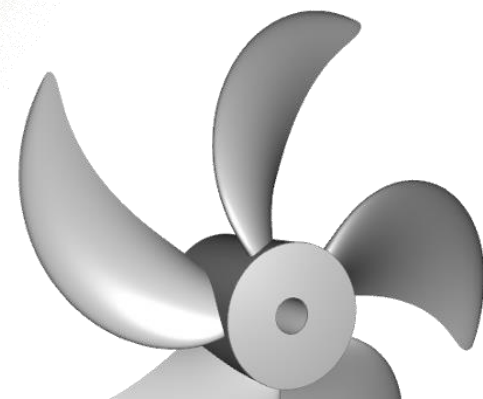
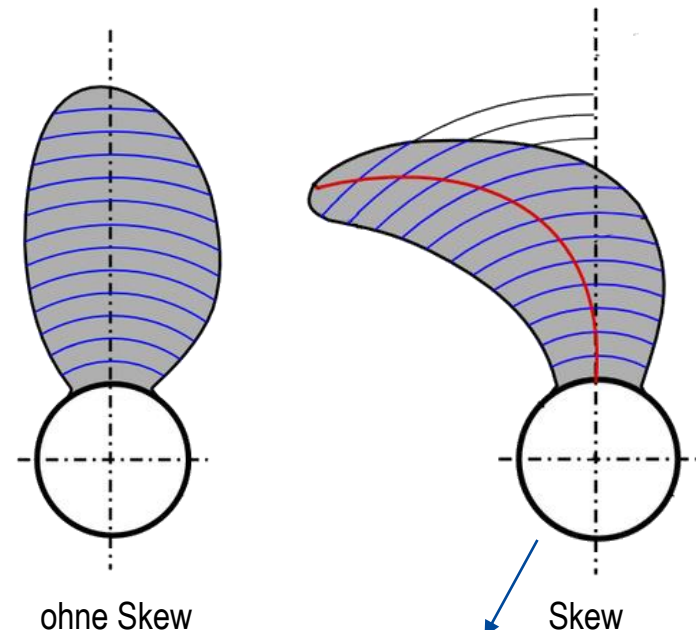
- Durchmesser und Nabendurchmesser
- Flügelzahl
- Steigung
- Profildaten (Dicke, Wölbung, Länge über Radius)
- **Skew**
- **Rake**

### Kenndaten

- Schub
- Drehmoment
- Drehzahl
- Vortriebsgeschwindigkeit
- Wirkungsgrad



Kornev.: „Propellertheorie“



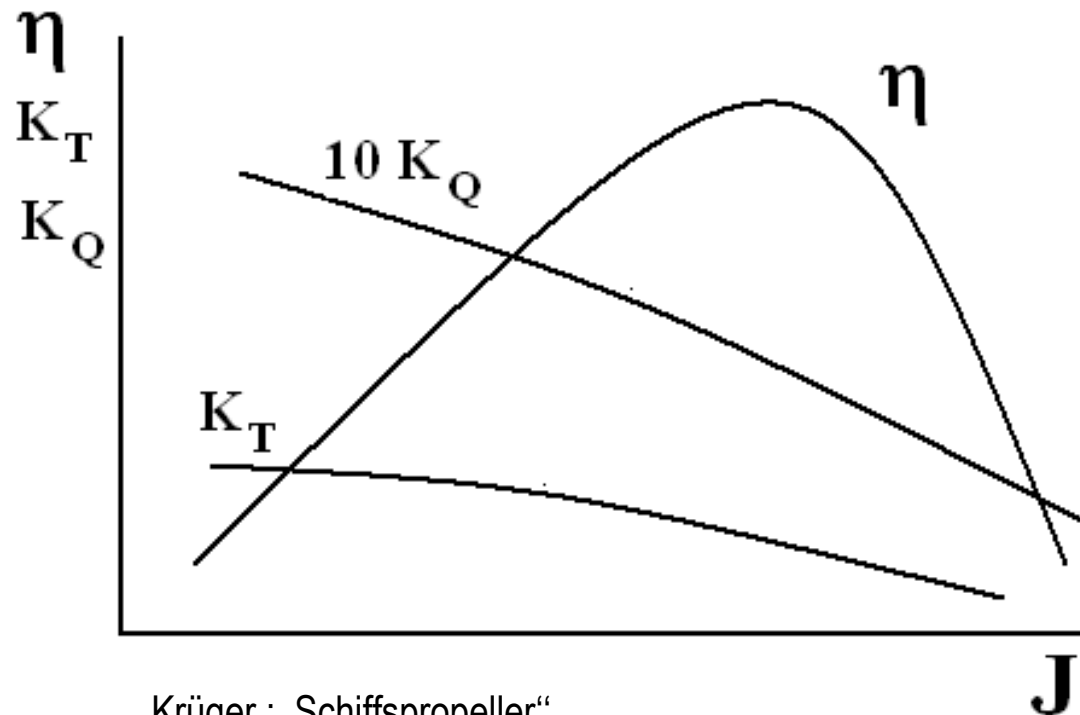
## Geometrie und Kenndaten des Schiffpropellers

### Geometrie

- Durchmesser und Nabendurchmesser
- Flügelzahl
- Steigung
- Profildaten
- Skew
- Rake

### Kenndaten

- Schub
- Drehmoment
- Wirkungsgrad
- Drehzahl
- Vortriebsgeschwindigkeit





## Inhaltsverzeichnis

1. Der Schiffspropeller
- 2. Physikalische Theorien**
  - a) Strahltheorie des Propellers**
  - b) Profiltheorie des Propellerblattes
  - c) Wirbeltheorie des Propellers
3. Allgemeines Entwurfskonzept
4. ENT-Fix – Entwurfsprogramm



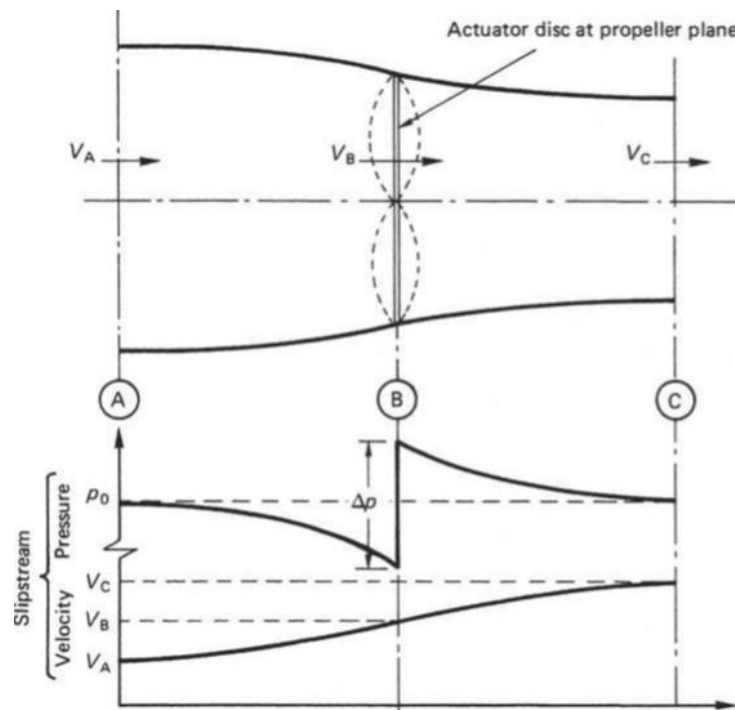
## Physikalische Theorien

### Antriebsorgan

- Aufgabe: Drehleistung  $2\pi Qn$  optimal in Schubleistung  $S_{v_a}$  umwandeln

## Antriebsorgan

- Aufgabe: Drehleistung  $2\pi Qn$  optimal in Schubleistung  $Sv_a$  umwandeln
- Wirkweise durch zwei Anschauungen:
  - **Impulsbetrachtung** → Strahltheorie

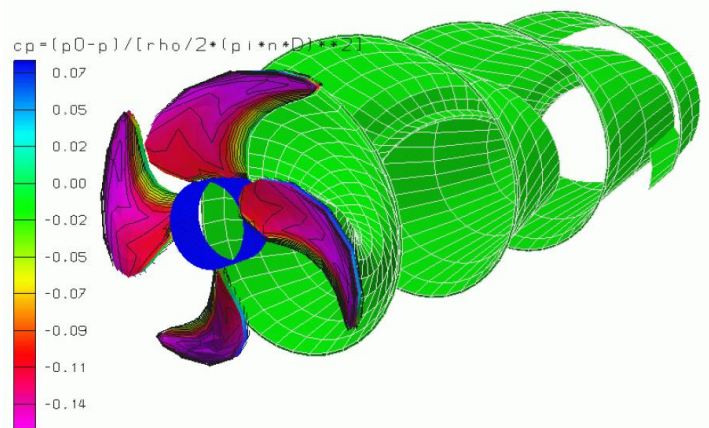


- Propeller = Kreisscheibe
- Propellerwirkung auf Geschwindigkeit und Druck im Strömungsfeld (Stromröhre)
- Berechnung Schub, Schubleistung, Drall, Vortriebswirkungsgrad, ...

Carlton: „Marine Propellers and Propulsion“

## Antriebsorgan

- Aufgabe: Drehleistung  $2\pi Qn$  optimal in Schubleistung  $Tv_a$  umwandeln
- Wirkweise durch zwei Anschauungen:
  - Impulsbetrachtung  $\rightarrow$  Strahltheorie
  - **Tragflügelbetrachtung  $\rightarrow$  Profil- (2D) & Wirbeltheorie (3D)**



Krüger: „Schiffspropeller“



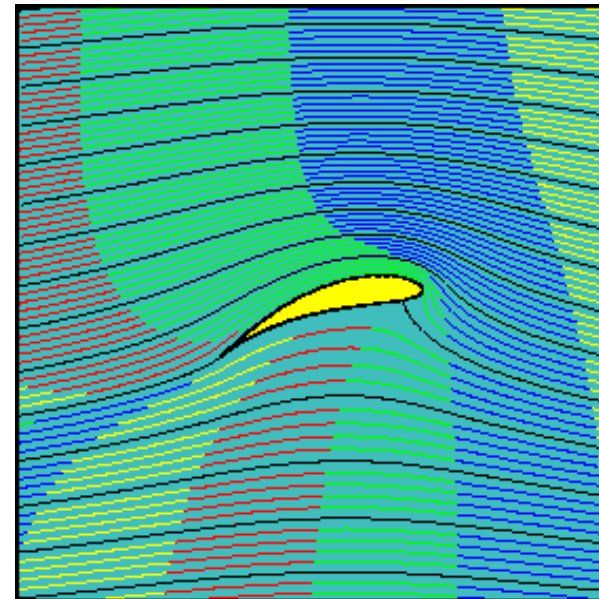
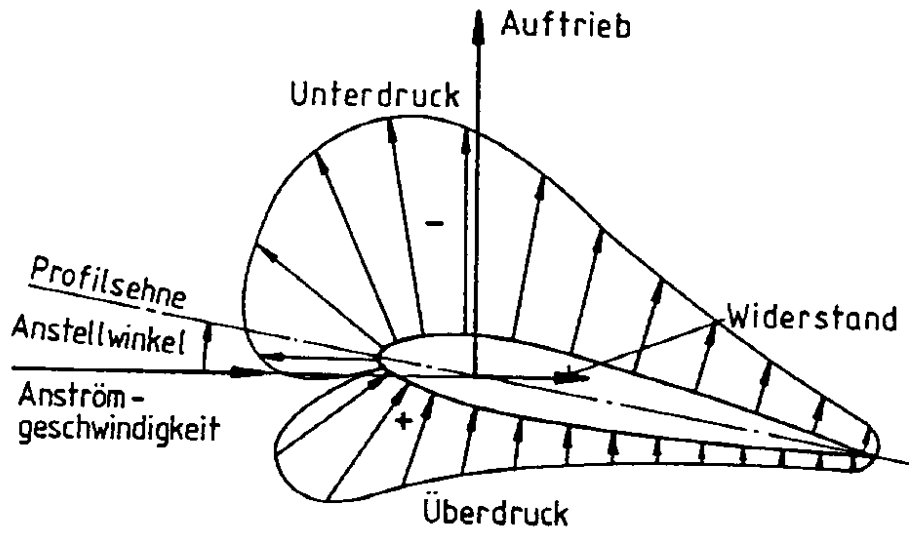
## Inhaltsverzeichnis

1. Der Schiffspropeller
2. Physikalische Theorien
  - a) Strahltheorie des Propellers
  - b) Profiltheorie des Propellerblattes**
  - c) Wirbeltheorie des Propellers
3. Allgemeines Entwurfskonzept
4. ENT-Fix – Entwurfsprogramm

## Physikalische Theorien

### Profiltheorie

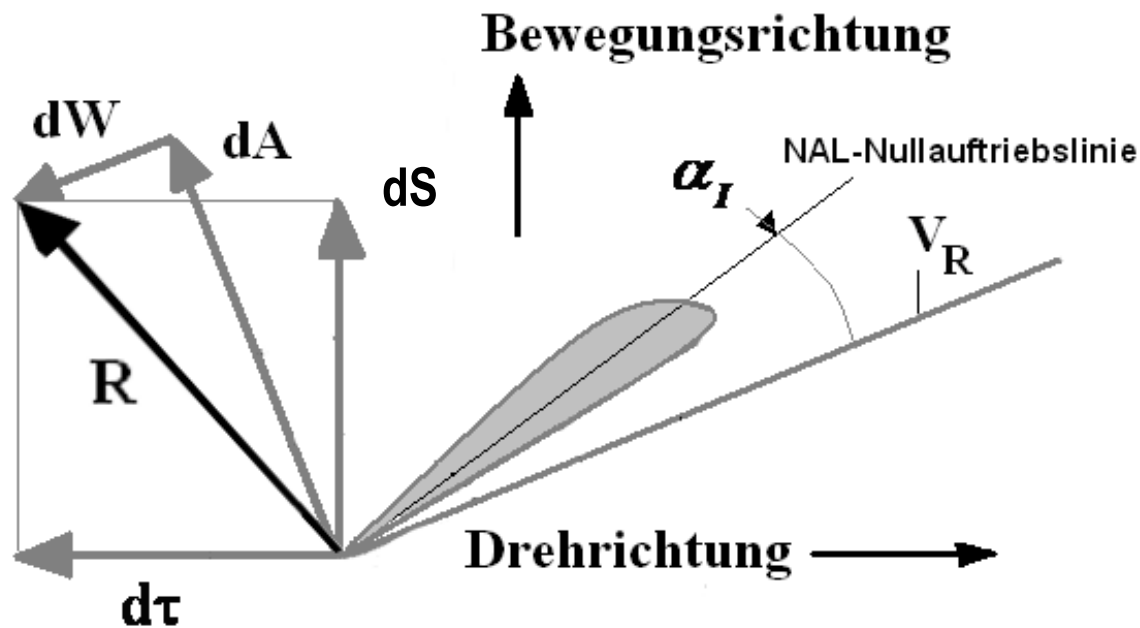
- Propellerflügel = Tragflügelprofile mit variabler Geometrie in radialer Richtung
    - **Druckverteilung entlang der Körperoberfläche**
    - Verteilung der Scherspannungen auf der Körperoberfläche
- } Entstehung:  
hydrodynamische Kräfte



Rill: „Aerodynamik des Flugzeuges“

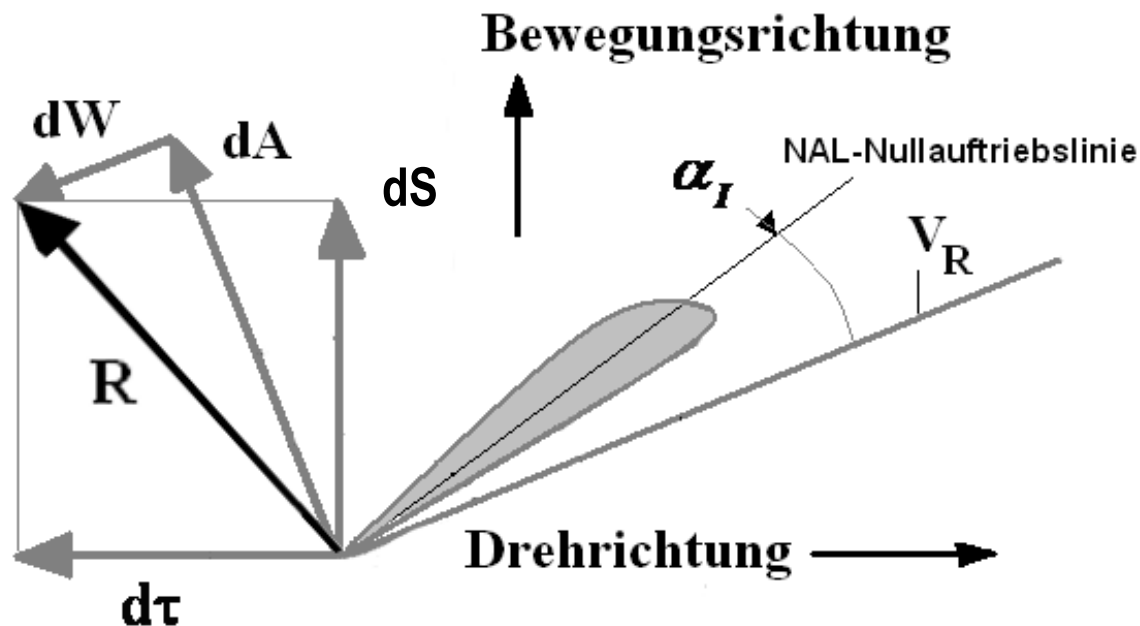
## Profiltheorie

- Integration der Verteilung von Druck und Scherspannung:
  - Resultierende hydrodynamische Kraft  $R$



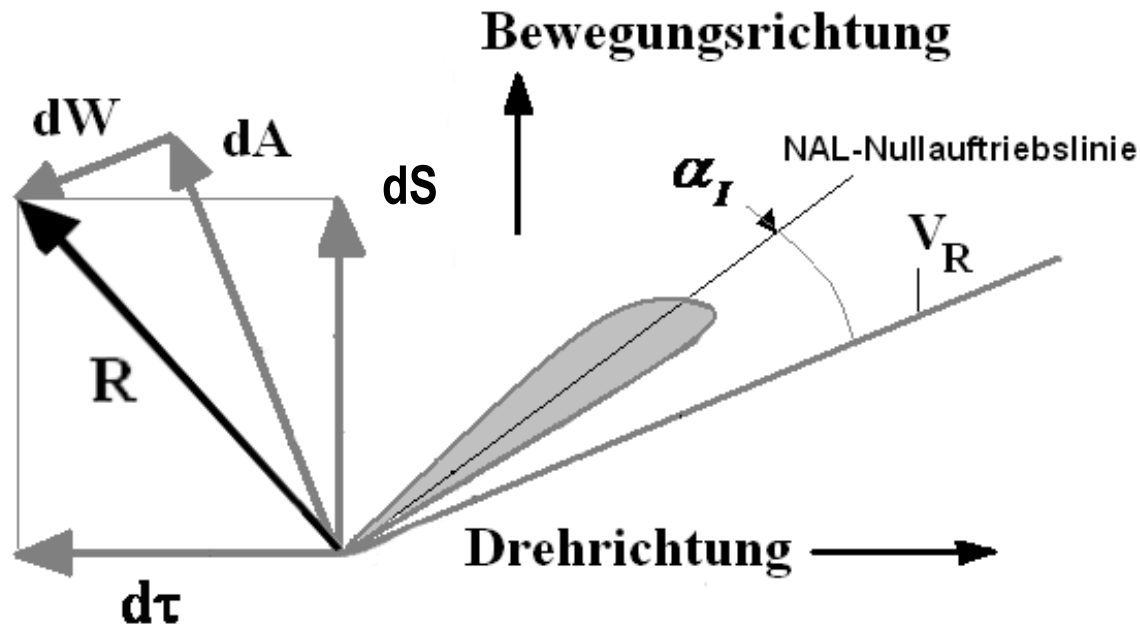
## Profiltheorie

- Integration der Verteilung von Druck und Scherspannung:
  - Resultierende hydrodynamische Kraft  $\mathbf{R}$
  - Auftrieb  $\mathbf{A}$  = Komponente v.  $\mathbf{R}$  senkrecht zu  $\mathbf{V}_R$



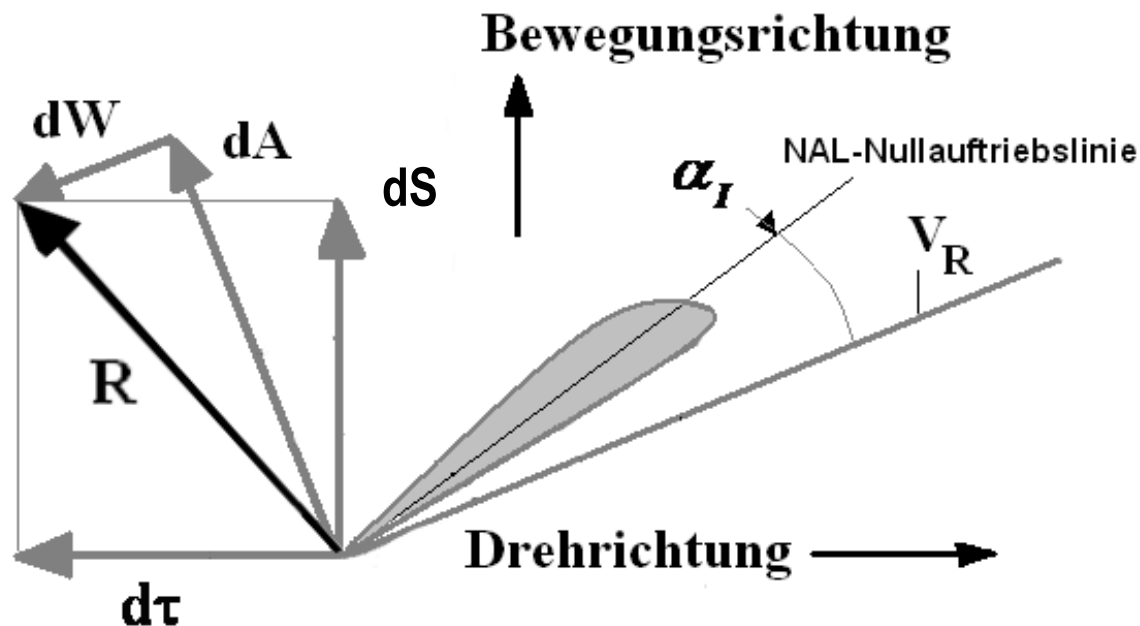
## Profiltheorie

- Integration der Verteilung von Druck und Scherspannung:
  - Resultierende hydrodynamische Kraft  $\mathbf{R}$
  - Auftrieb  $\mathbf{A}$  = Komponente v.  $\mathbf{R}$  senkrecht zu  $\mathbf{V}_R$
  - Schub  $\mathbf{S}$  = Komponente v.  $\mathbf{A}$  (und  $\mathbf{W}$ ) in axialer Richtung



## Profiltheorie

- Integration der Verteilung von Druck und Scherspannung:
  - Resultierende hydrodynamische Kraft  $\mathbf{R}$  → Entstehung des Auftriebs durch Zirkulation erklärbar
  - Auftrieb  $\mathbf{A}$  = Komponente v.  $\mathbf{R}$  senkrecht zu  $\mathbf{V}_R$  → **Wirbeltheorie**
  - Schub  $\mathbf{S}$  = Komponente v.  $\mathbf{A}$  (und  $\mathbf{W}$ ) in axialer Richtung





## Inhaltsverzeichnis

1. Der Schiffspropeller
2. Physikalische Theorien
  - a) Strahltheorie des Propellers
  - b) Profiltheorie des Propellerblattes
  - c) Wirbeltheorie des Propellers**
3. Allgemeines Entwurfskonzept
4. ENT-Fix – Entwurfsprogramm

## Wirbeltheorie

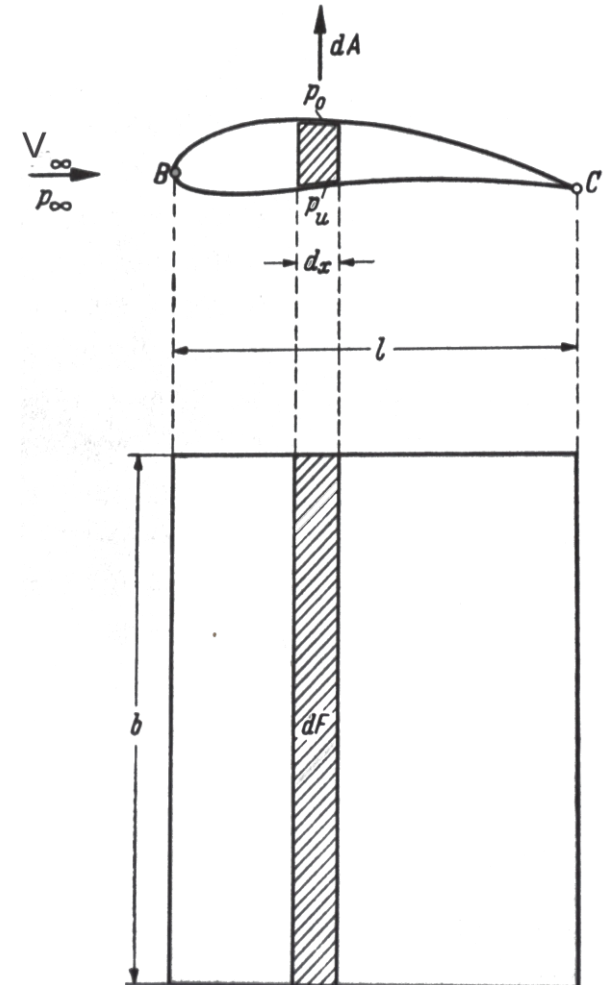
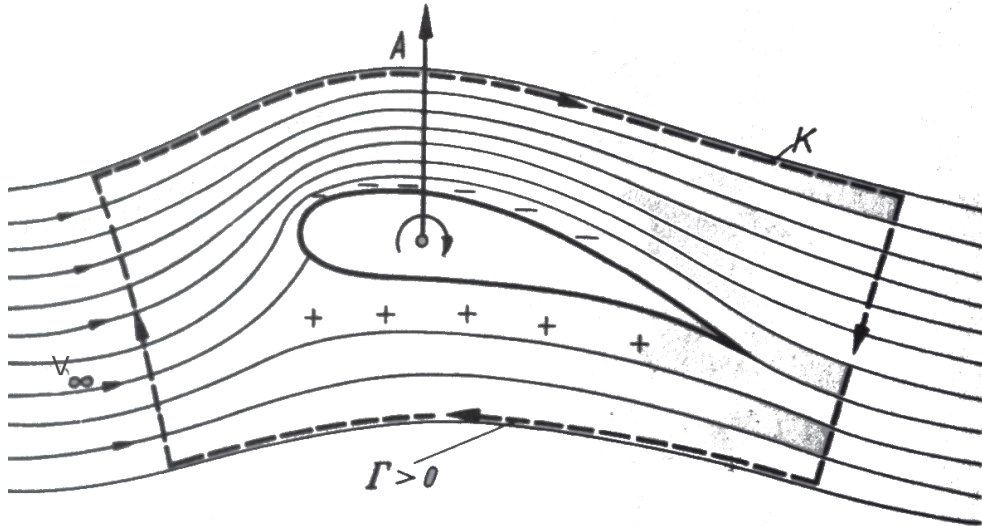
- Erklärung der Entstehung des Auftriebs **A** durch Zirkulation  $\Gamma$

- **Zirkulation  $\Gamma$ :**

- Linienintegral von  $\vec{V}$  längs einer geschlossenen Kurve

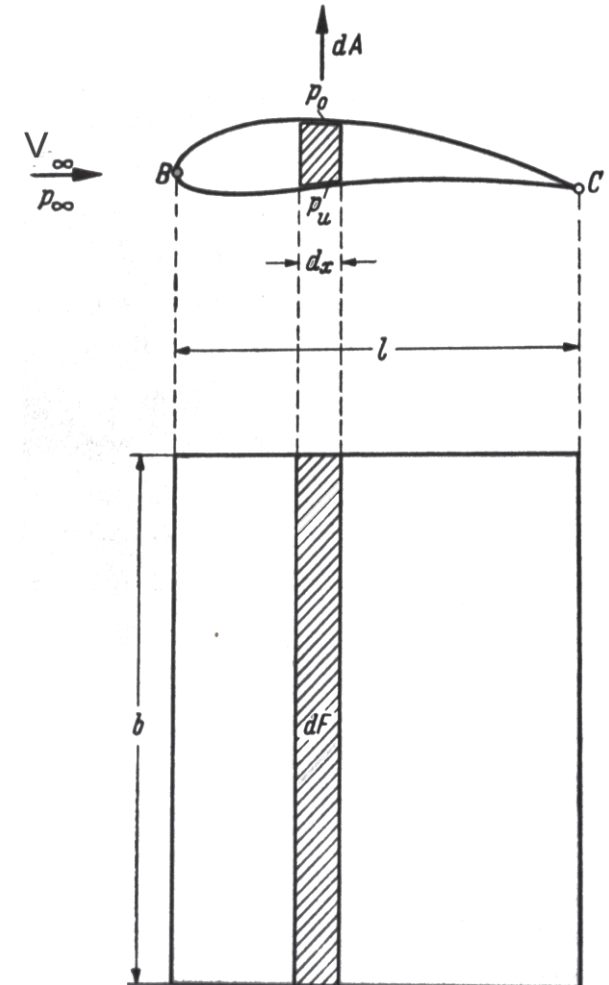
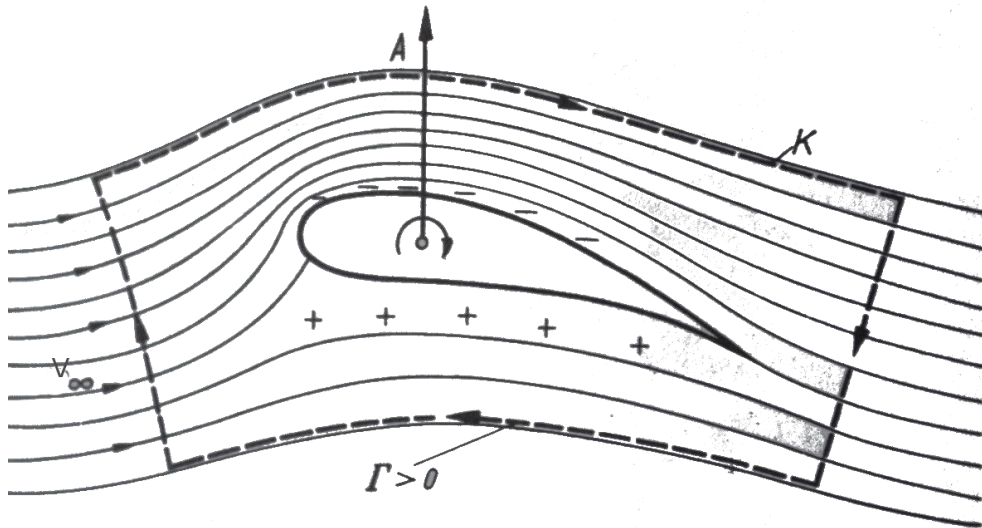
$$\Gamma = \oint_{(K)} \vec{V} \circ d\vec{s}$$

- Auftriebserzeugung  $\rightarrow$  Zusammenhang mit Zirkulation des Geschwindigkeitsfeldes



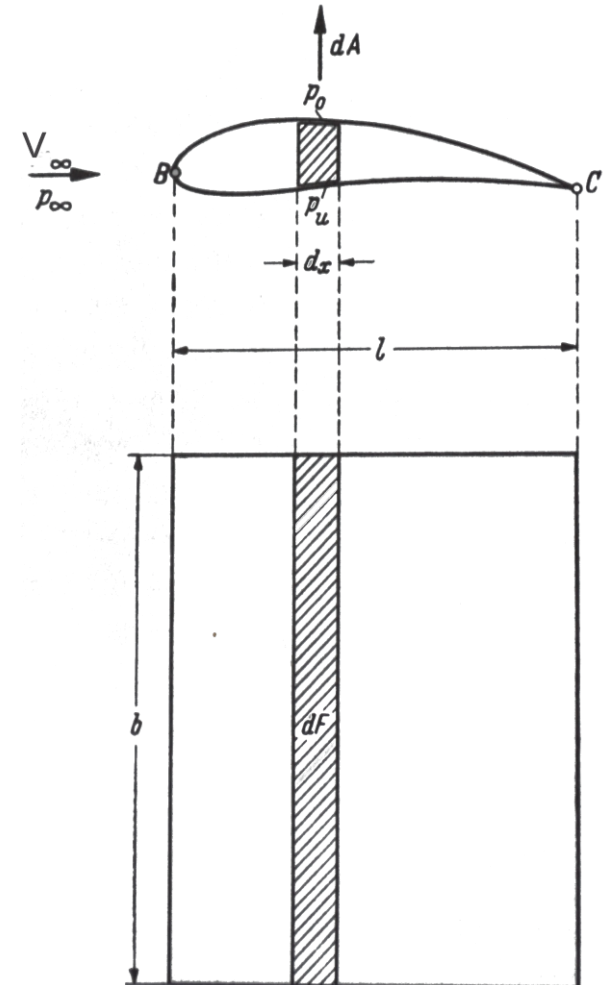
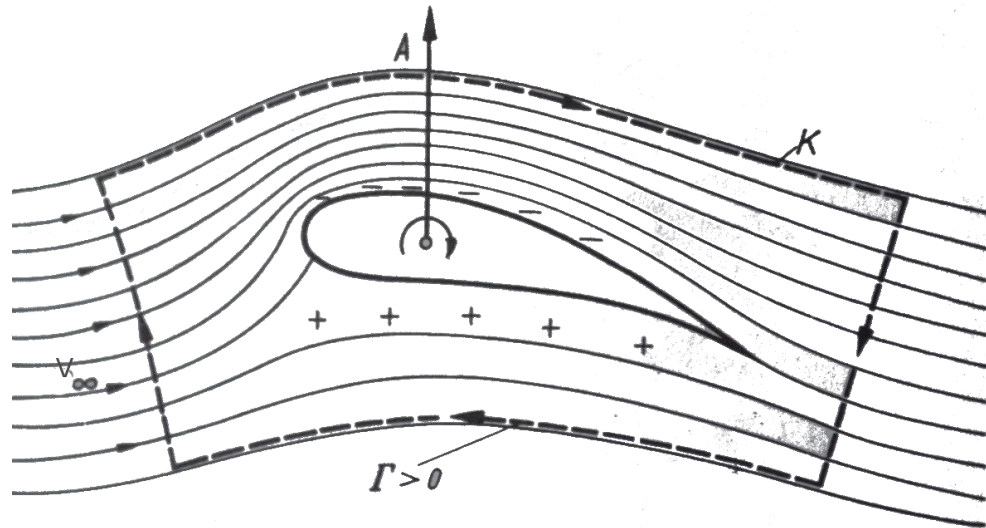
## Zirkulation $\Gamma$ und Auftrieb $A$

- Kutta – Joukowski – Theorem:
  - Auftrieb des Teilabschnittes:  $dA = (p_u - p_o)dF$



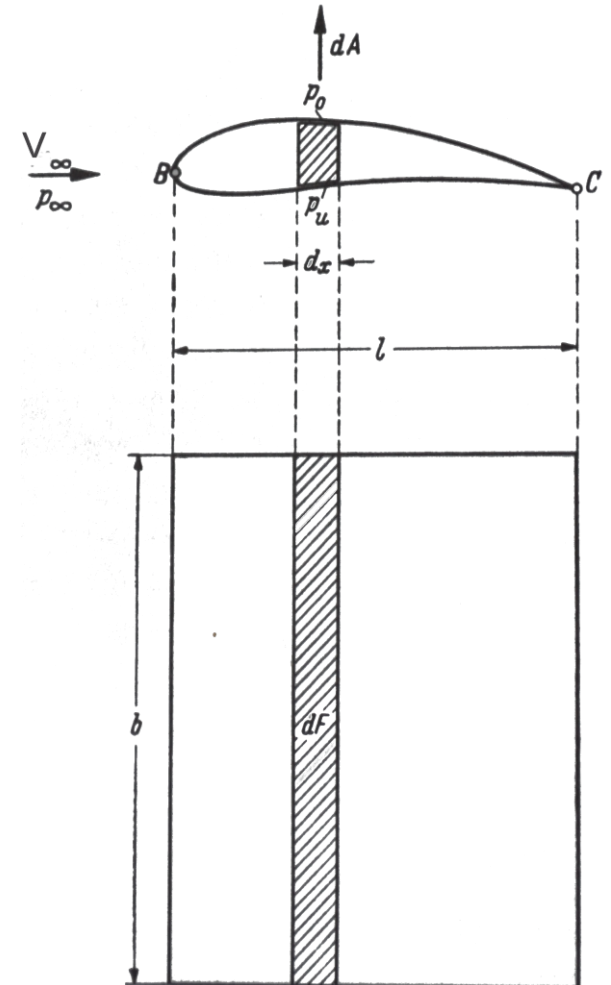
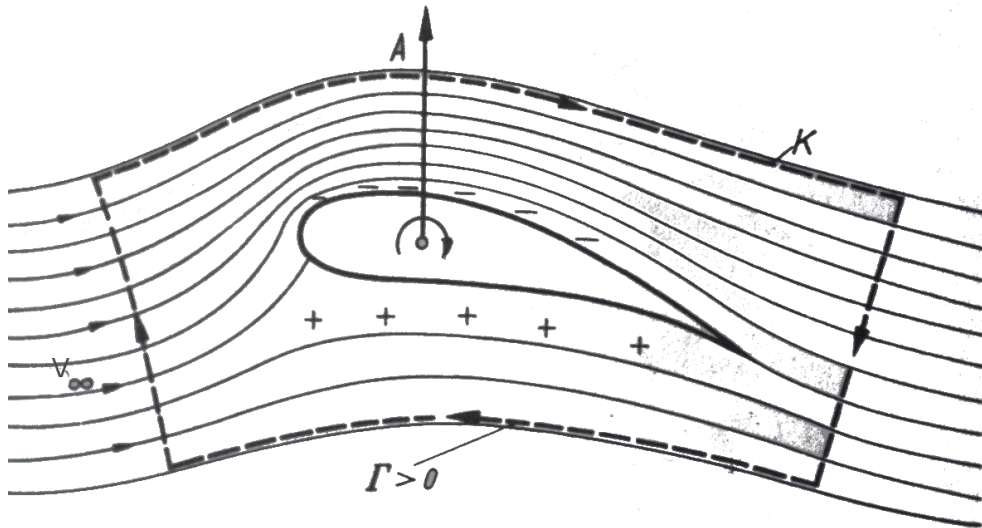
## Zirkulation $\Gamma$ und Auftrieb $A$

- Kutta – Joukowski – Theorem:
  - Auftrieb des Teilabschnittes:  $dA = (p_u - p_o)dF$
  - Gesamtauftrieb:  $A = \int_{(F)} (p_u - p_o)dF = b \int_B^C (p_u - p_o)dx$



## Zirkulation $\Gamma$ und Auftrieb $A$

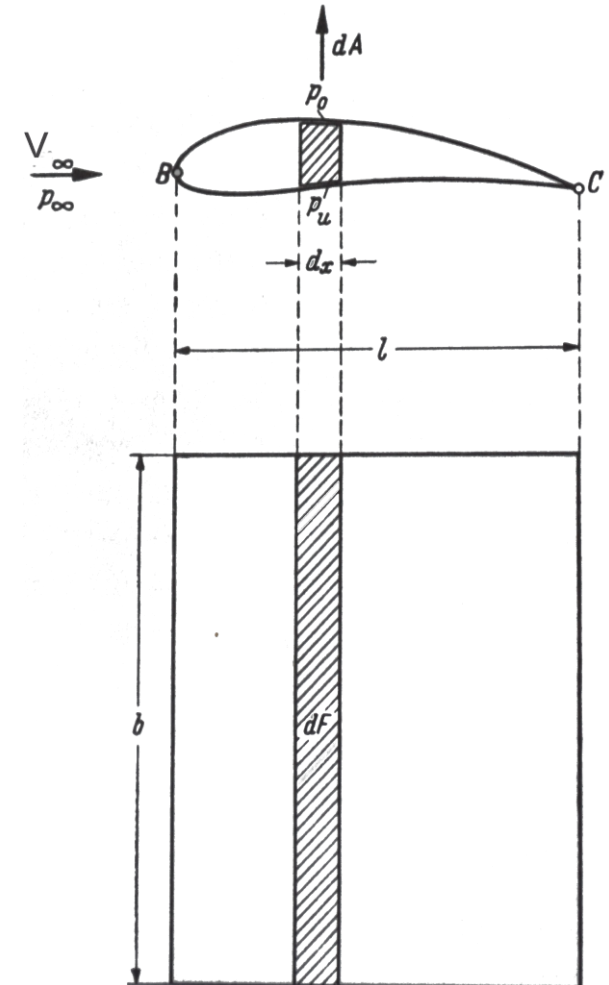
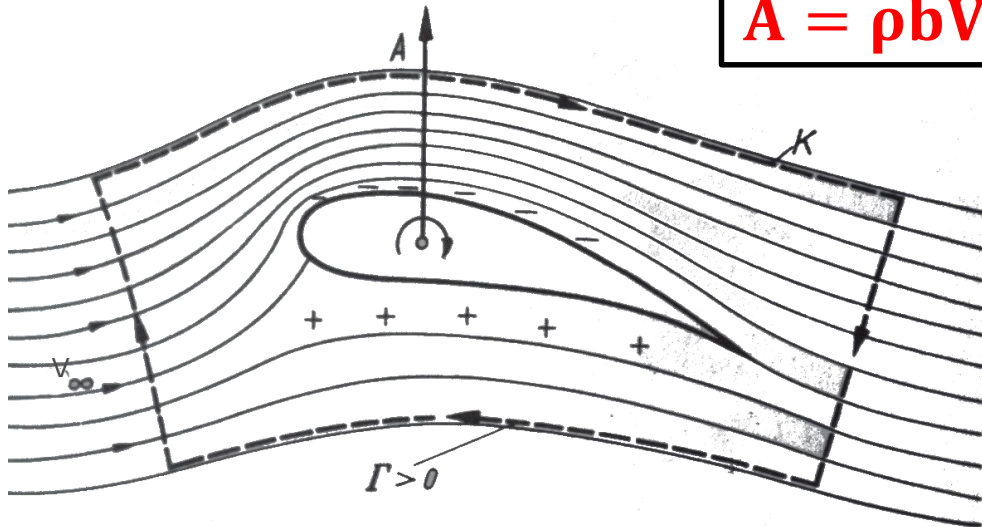
- Kutta – Joukowski – Theorem:
  - Auftrieb des Teilabschnittes:  $dA = (p_u - p_o)dF$
  - Gesamtauftrieb:  $A = \int_{(F)} (p_u - p_o)dF = b \int_B^C (p_u - p_o)dx$
  - mit Bernoulli:  $p_u - p_o = 2\rho V_\infty \Delta V \rightarrow A = 2\rho b V_\infty \int_B^C \Delta V dx$



## Zirkulation $\Gamma$ und Auftrieb $A$

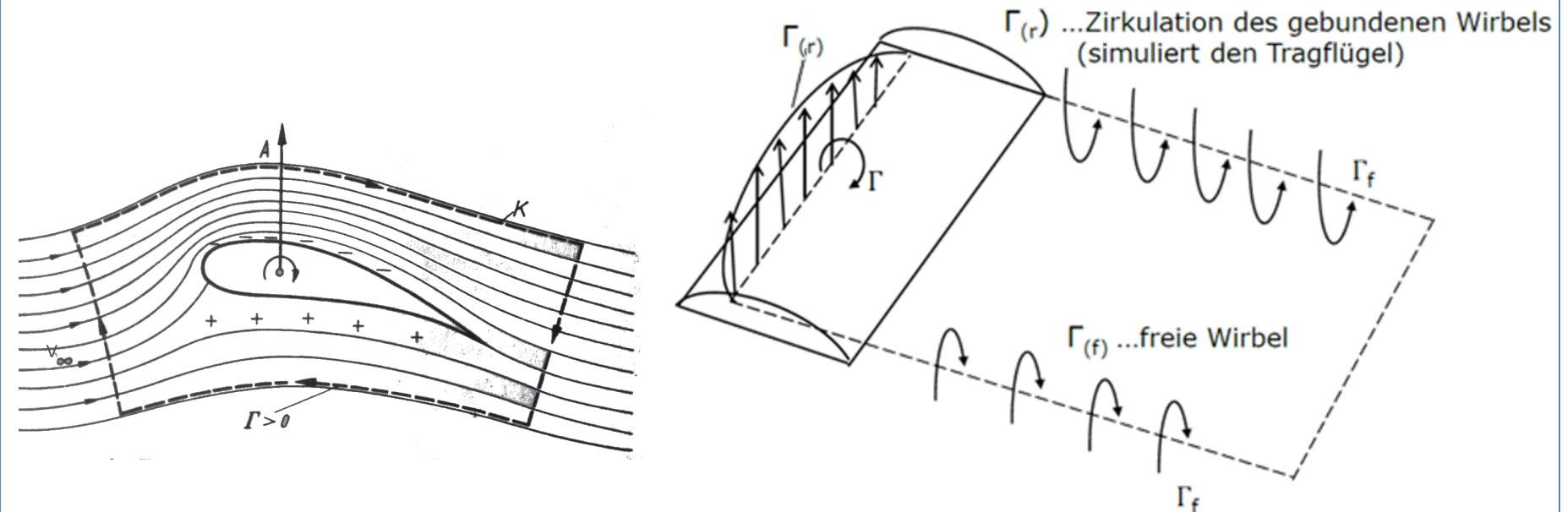
- Kutta – Joukowski – Theorem:
  - Auftrieb des Teilabschnittes:  $dA = (p_u - p_o)dF$
  - Gesamtauftrieb:  $A = \int_{(F)} (p_u - p_o)dF = b \int_B^C (p_u - p_o)dx$
  - mit Bernoulli:  $p_u - p_o = 2\rho V_\infty \Delta V \rightarrow A = 2\rho b V_\infty \int_B^C \Delta V dx$

$$A = \rho b V_\infty \Gamma$$



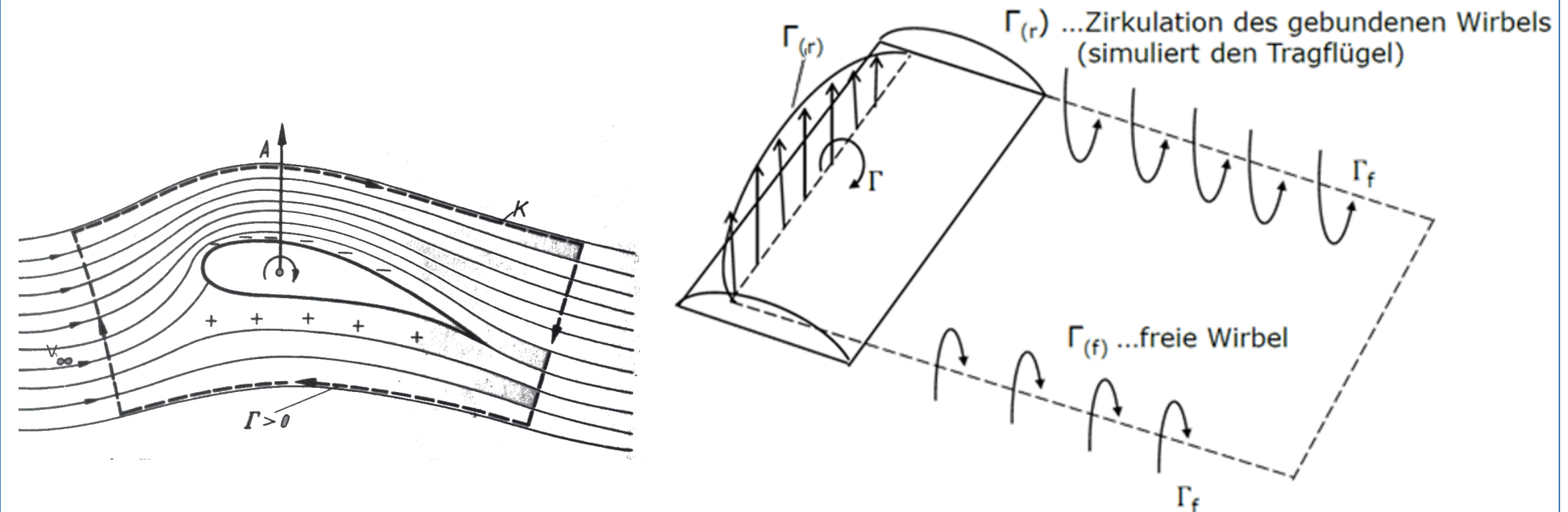
## Zirkulation $\Gamma$ und Wirbelsätze

- Zirkulation: Eigenschaft eines Potentialwirbels
- Auftriebserzeugung  $\rightarrow$  gebundener Wirbel mit variabler Zirkulation
- Wirbelerhaltung  $\rightarrow$  2 freie Wirbel an Flügelenden
- Wirbelsystem = Hufeisenwirbel



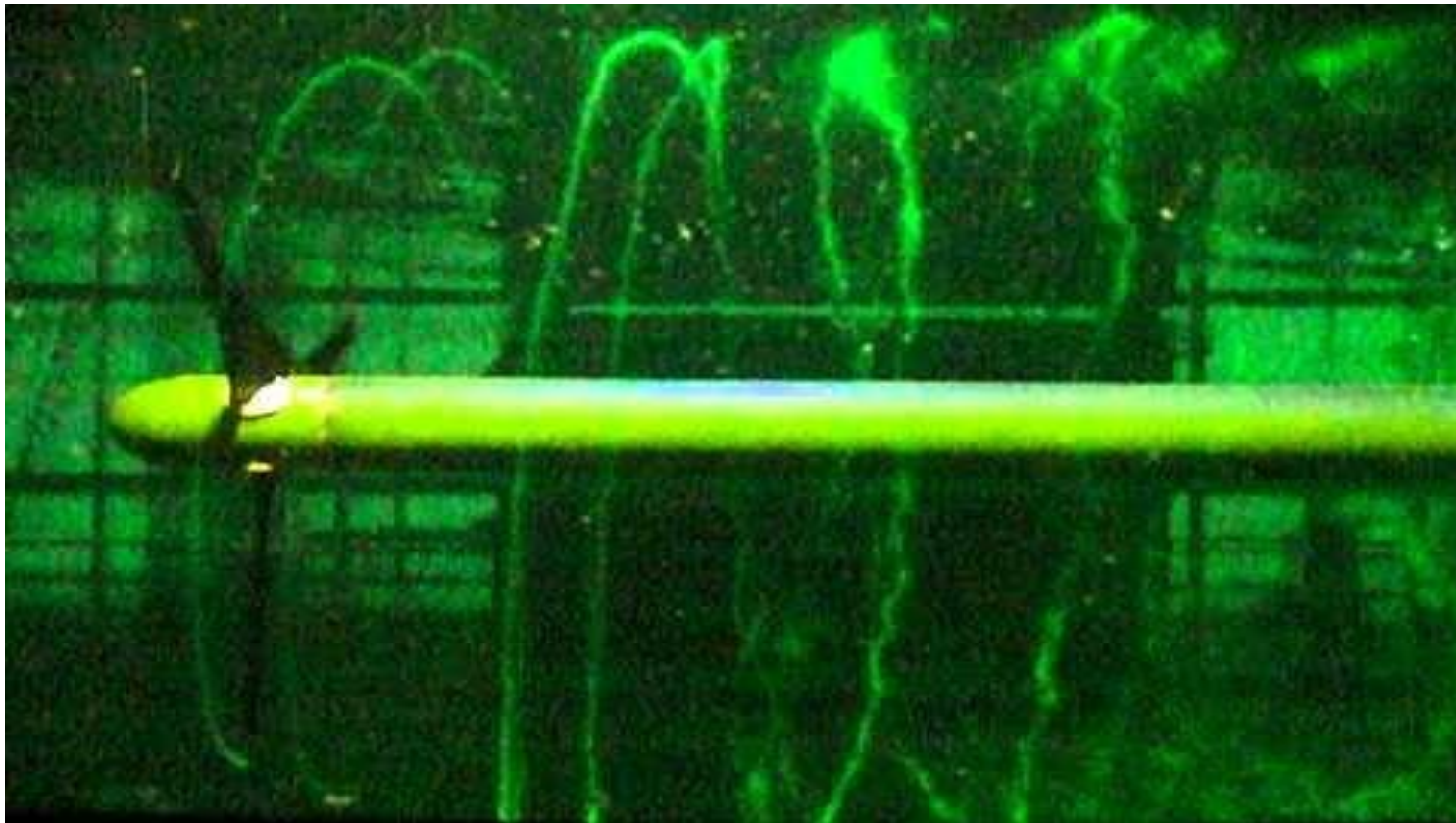
## Zirkulation $\Gamma$ und Wirbelsätze

- Zirkulation: Eigenschaft eines Potentialwirbels
  - Auftriebserzeugung  $\rightarrow$  gebundener Wirbel mit variabler Zirkulation
  - Wirbelerhaltung  $\rightarrow$  2 freie Wirbel an Flügelenden
  - Wirbelsystem = Hufeisenwirbel
- $\rightarrow$  Grundlage der Entwurfsprogramme mit potentialtheoretischen Ansatz



## Zirkulation $\Gamma$ bei Strömungsmaschinen

<https://www.youtube.com/watch?v=N3WwQKZ05Uk>





## Inhaltsverzeichnis

1. Der Schiffspropeller
2. Physikalische Theorien
  - a) Strahltheorie des Propellers
  - b) Profiltheorie des Propellerblattes
  - c) Wirbeltheorie des Propellers
- 3. Allgemeines Entwurfskonzept**
4. ENT-Fix – Entwurfsprogramm



## Allgemeines Entwurfskonzept

### Entwurf eines Propellers

- gesucht:

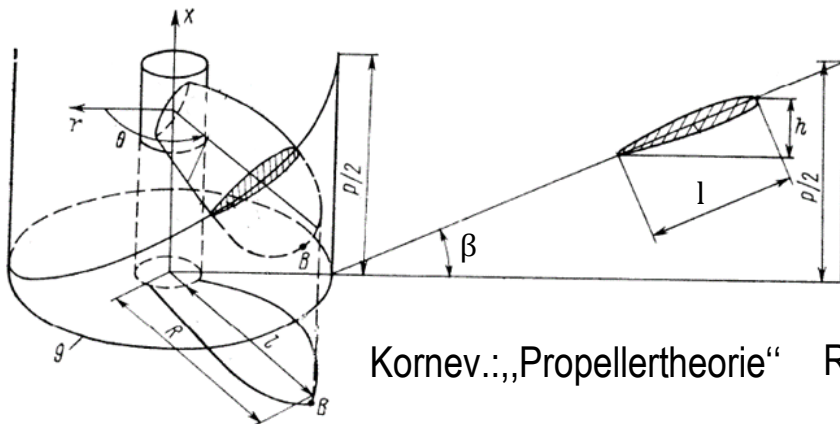
## Allgemeines Entwurfskonzept

### Entwurf eines Propellers

- gesucht:
  - Geometrie und Lage des Propellerflügels in Abhängigkeit vom Radius  $R$  im Konstruktionspunkt:

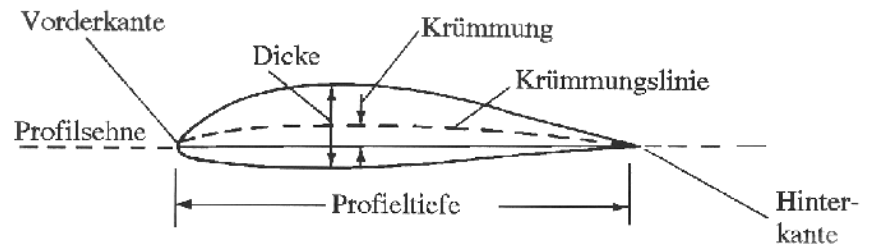
- Profiltiefe  $l = f(R)$
- Profildicke  $d = f(R)$
- Profilwölbung  $w = f(R)$
- Steigung  $\rightarrow \beta$   $p/2 = f(R)$

um gewünschten Schub zu erzeugen



Kornev.: „Propellertheorie“

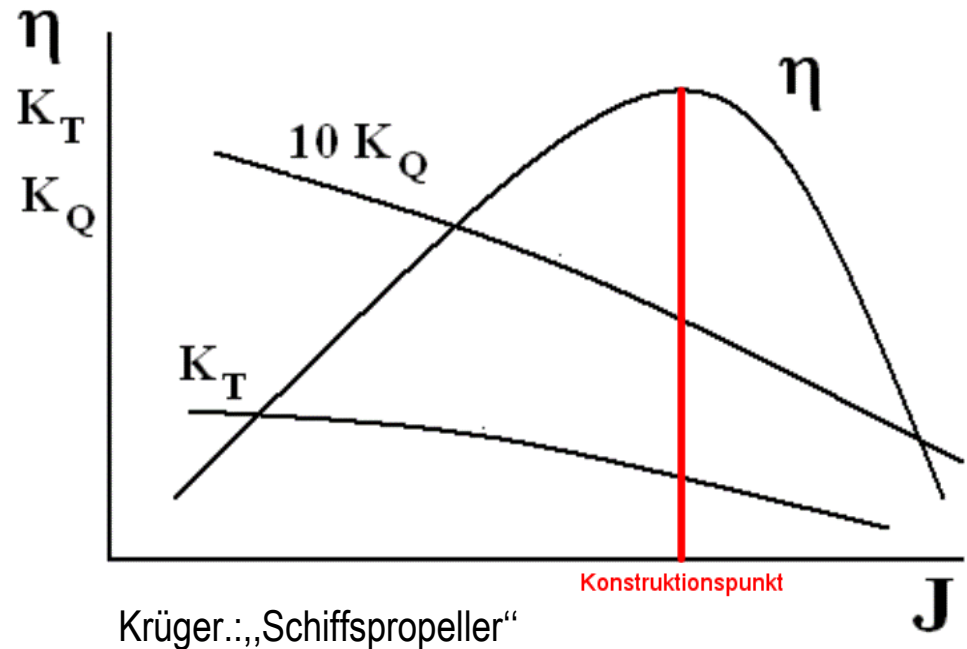
Rill.: „Aerodynamik des Flugzeuges“



## Allgemeines Entwurfskonzept

### Entwurf eines Propellers

- gegebene Kenndaten:
  - Vortriebsgeschwindigkeit des Schiffes  $V_A$   
→  $J = f(V_A)$
  - Schub im Betriebspunkt  $S$   
→  $K_T = f(S)$
  - Drehzahl  $n$   
→  $J = f(n)$
- gegebene Geometrie:
  - Propellerdurchmesser  $D_A$
  - Nabendurchmesser  $D_N$
  - Flügelanzahl  $z$





# Allgemeines Entwurfskonzept

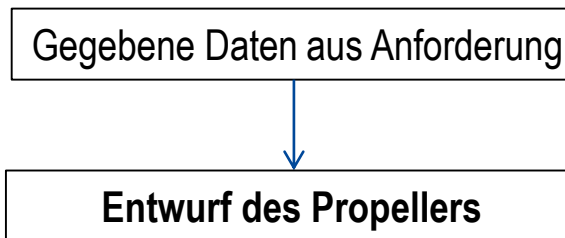
## Hierarchie des Propellerentwurfs

### Gegebene Daten aus Anforderung

- Vortriebsgeschwindigkeit, Drehzahl, Schiffsform, ...
- Vorentwurf: Schub, Durchmesser, Flügelzahl, ...

## Allgemeines Entwurfskonzept

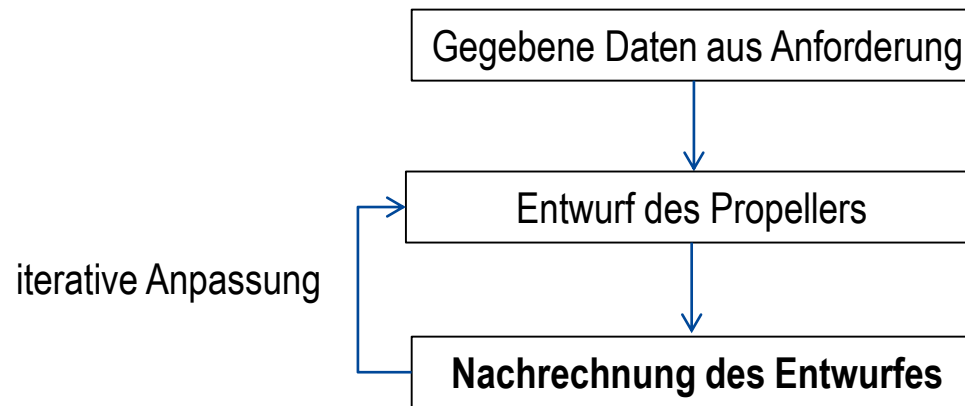
### Hierarchie des Propellerentwurfs



1. mittels Diagrammen
2. mittels Entwurfsprogrammen (z.B. ENT-Fix)

## Allgemeines Entwurfskonzept

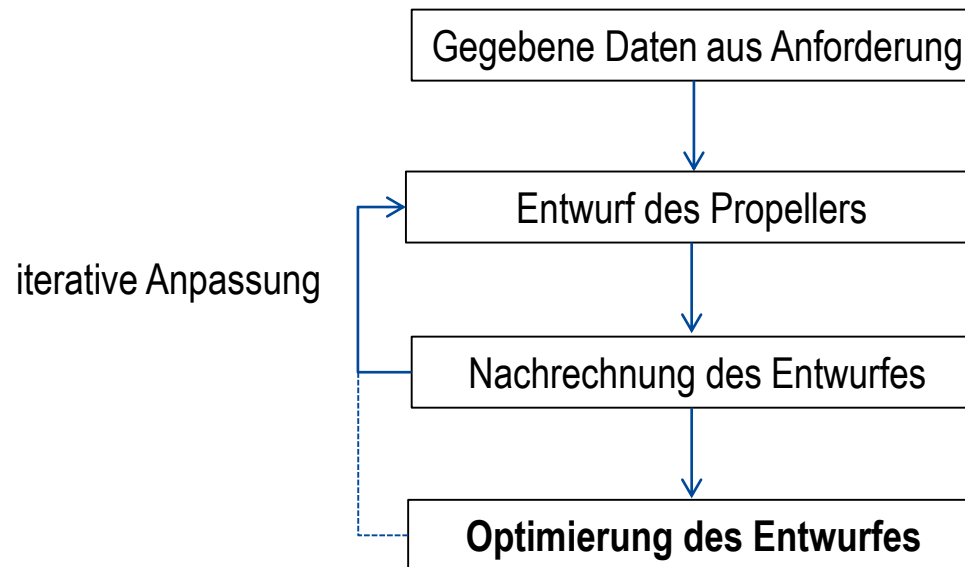
### Hierarchie des Propellerentwurfs



- Methoden höherer Genauigkeit, z.B. Paneel-, Wirbelgitterverfahren (PRO-Mod)
- Kennfeldberechnung

# Allgemeines Entwurfskonzept

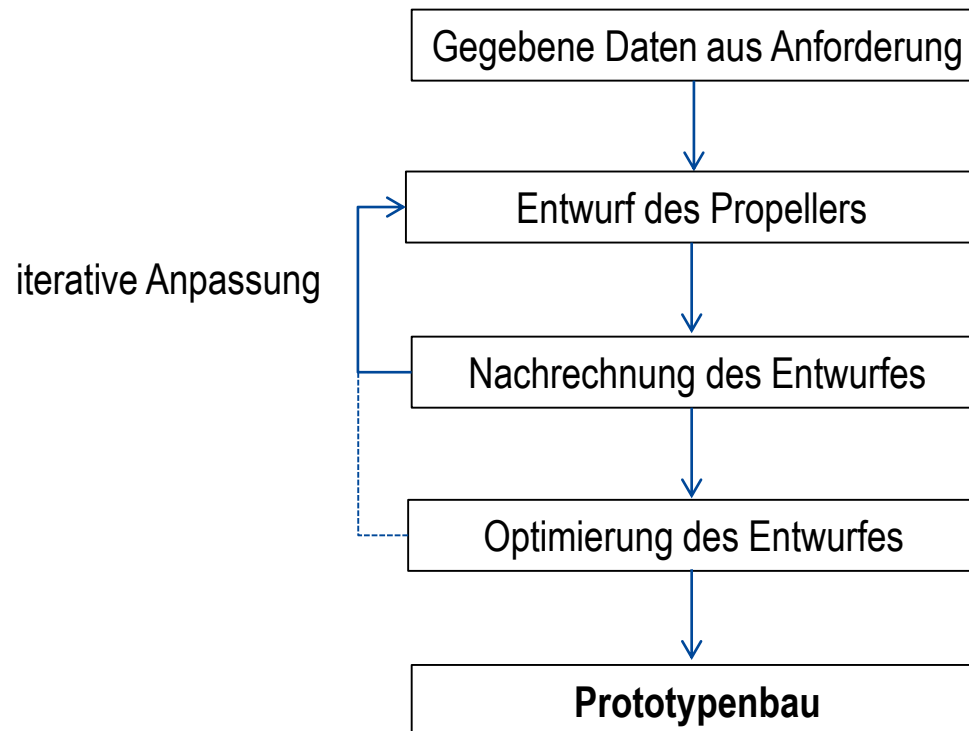
## Hierarchie des Propellerentwurfs



- mittels CFD und FEM
- Akustik, Vibration, Kavitation, Belastung, System, ...

## Allgemeines Entwurfskonzept

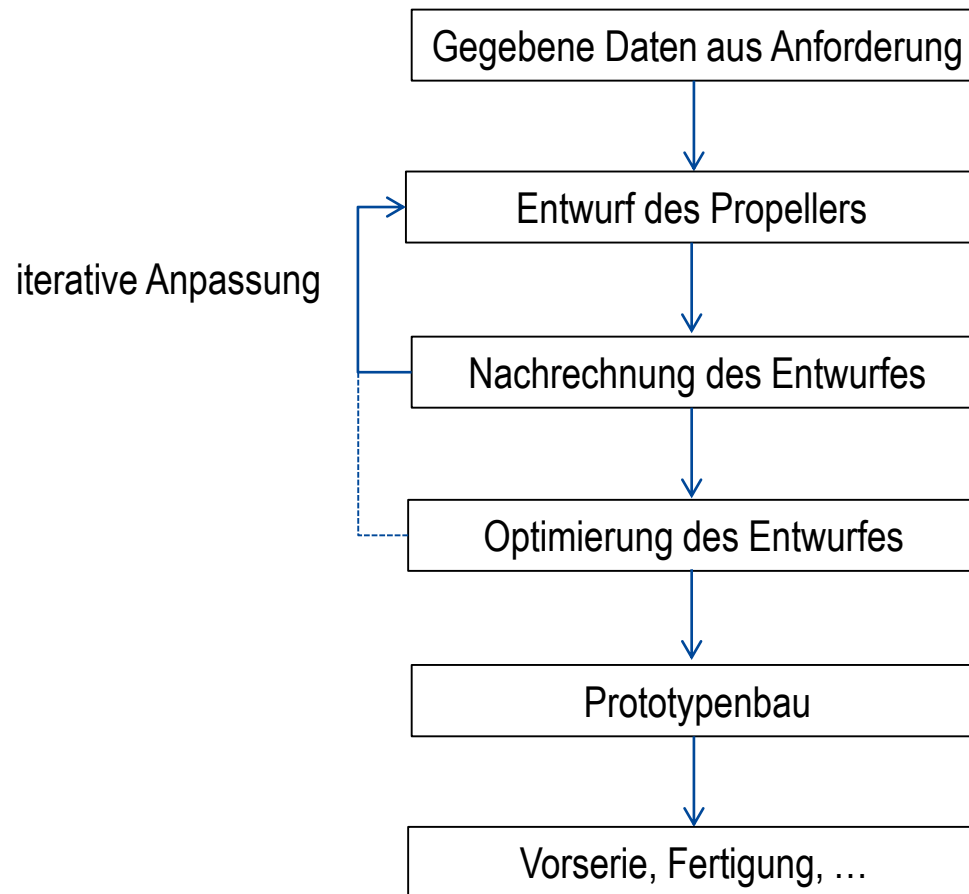
### Hierarchie des Propellerentwurfs



- Experimentelle Untersuchung

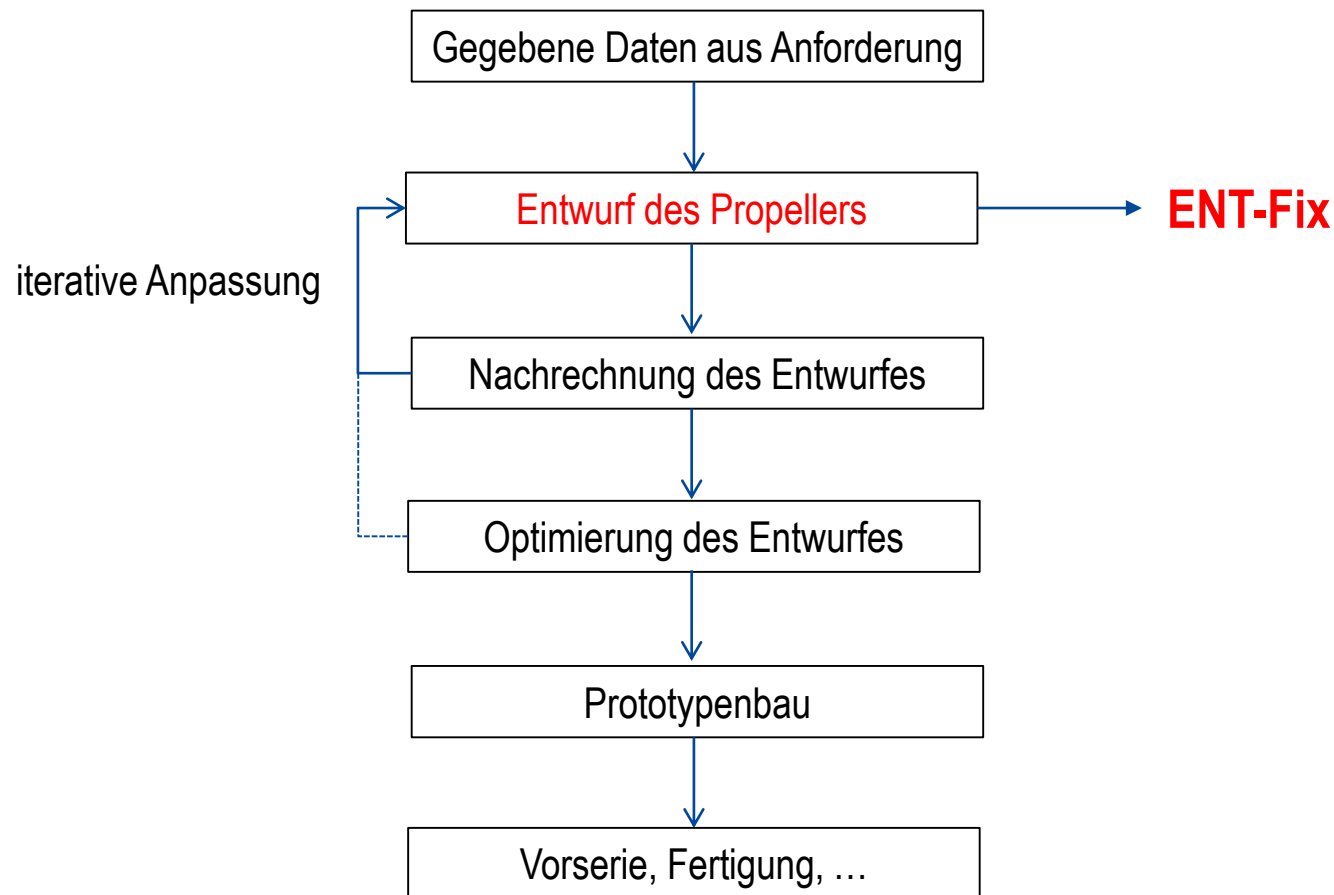
# Allgemeines Entwurfskonzept

## Hierarchie des Propellerentwurfs



# Allgemeines Entwurfskonzept

## Hierarchie des Propellerentwurfs



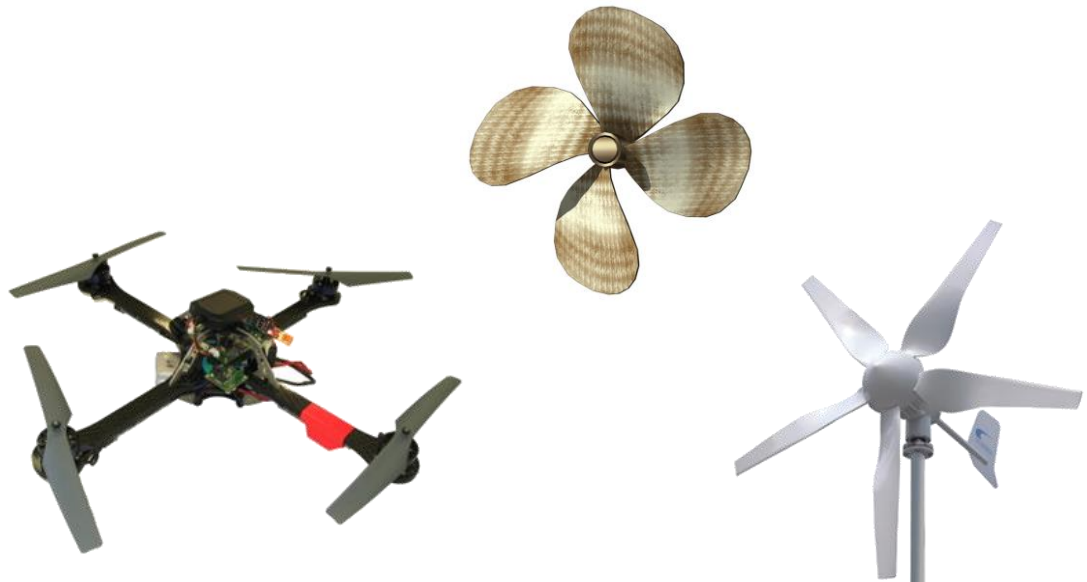


## Inhaltsverzeichnis

1. Der Schiffspropeller
2. Physikalische Theorien
  - a) Strahltheorie des Propellers
  - b) Profiltheorie des Propellerblattes
  - c) Wirbeltheorie des Propellers
3. Allgemeines Entwurfskonzept
- 4. ENT-Fix – Entwurfsprogramm**

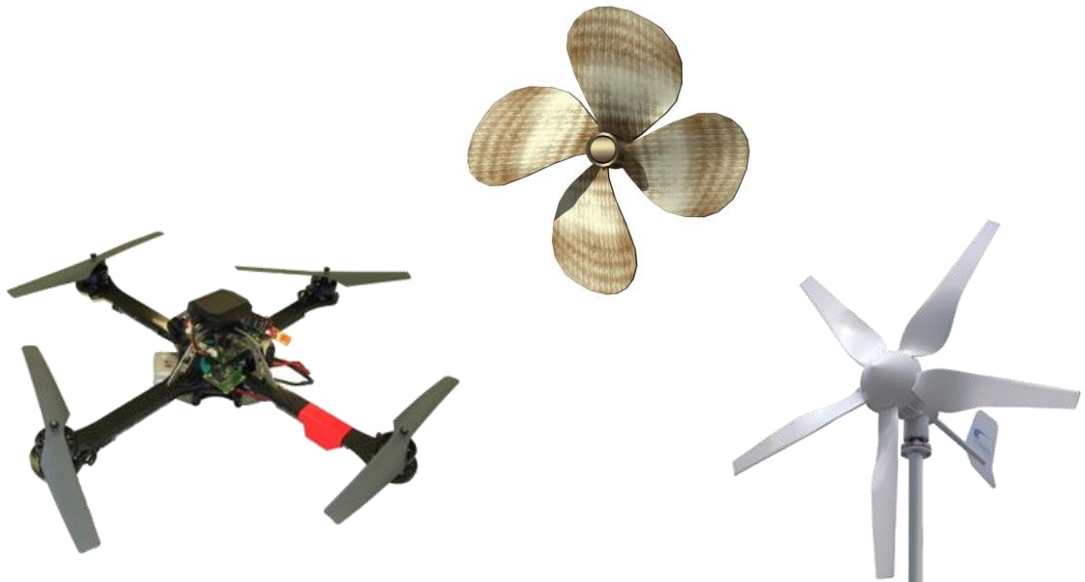
## ENT-Fix

- Entwurfsprogramm des ITUs für einstufige, axiale, nicht-ummantelte Strömungsmaschinen



## ENT-Fix

- Entwurfsprogramm des ITUs für einstufige, axiale, nicht-ummantelte Strömungsmaschinen
  - basierend auf Potentialtheorie:
    - reibungsfreie Strömung
    - drehungsfreie Strömung
    - Kontinuitätsgleichung bleibt erfüllt
- } bei Singularitäten nicht erfüllt (Potentialwirbel, Quellen, ...)



## ENT-Fix

- Entwurfsprogramm des ITUs für einstufige, axiale, nicht-ummantelte Strömungsmaschinen
  - basierend auf Potentialtheorie:
    - reibungsfreie Strömung
    - drehungsfreie Strömung
    - Kontinuitätsgleichung bleibt erfüllt
- } bei Singularitäten nicht erfüllt (Potentialwirbel, Quellen, ...)
- Grundlegende physikalische Theorien:
    - Energiebilanz am Rotor
    - Strahltheorie
    - Traglinientheorie (Wirbeltheorie)
    - Profiltheorie
    - Modellelemente

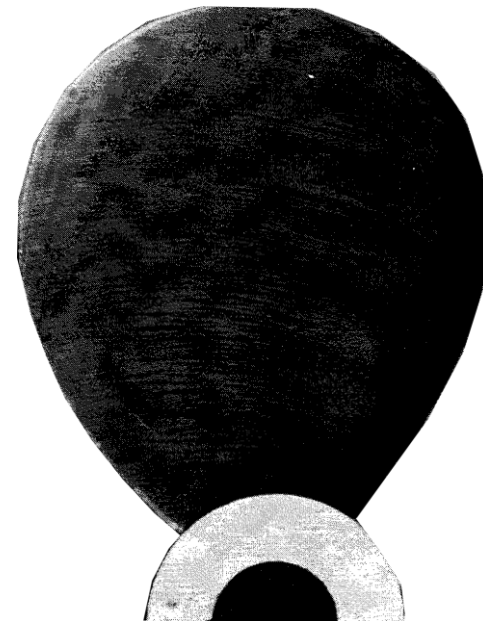


## Annahmen des Modells

- schwach- bis mittelbelastete Propeller → Handelsschifffahrt, Binnenschifffahrt, WKA, Luftschraube
- homogene, axiale Anströmung des Propellers
- Reibung nur als Modellelement



## Entwurf eines Schiffspropellers für Handelsschifffahrt

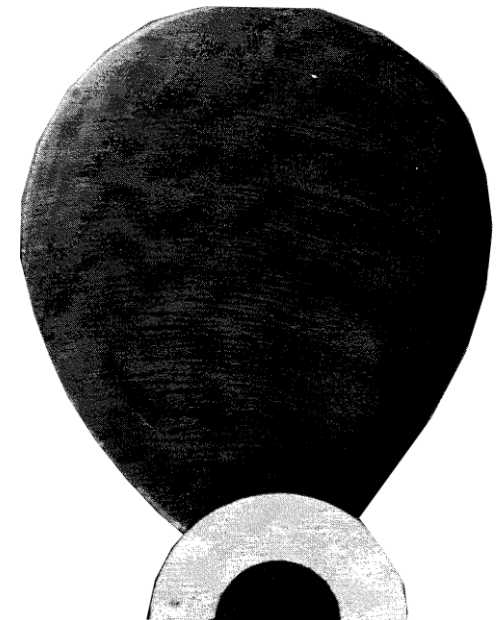


## Entwurfsschritte

### 1. Vorentwurf

- Abschätzung durch gegebene Daten + Diagramme, Empirie, Erfahrung, ...:

Größe	z.B. aus Initialbedingung:
Drehzahl $n$	Antriebsmaschine, -strang
Vortriebsgeschwindigkeit $v_a$	Schiffsgeschwindigkeit
Schub $S$	Antriebsleistung, Schiffsform
Flügelzahl $z$	Einsatzbedingungen
Durchmesser $D_a$	Schiffsform, Einsatzbedingung, ...
Nabendurchmesser $D_N$	Propellertyp
Propellermaterial	Einsatzbedingungen, Kräfte

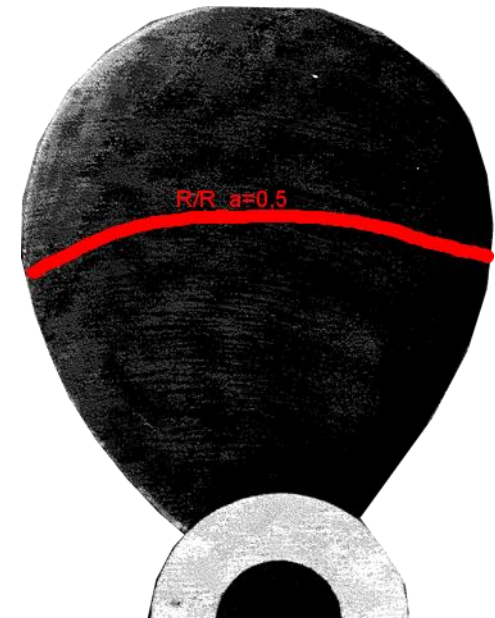
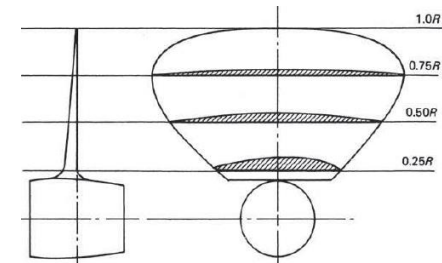


## Entwurfsschritte

### 1. Vorentwurf

- Abschätzung durch gegebene Daten + Diagramme, Empirie, Erfahrung, ...:

Größe	z.B. aus Initialbedingung:
Drehzahl $n$	Antriebsmaschine, -strang
Vortriebsgeschwindigkeit $v_a$	Schiffsgeschwindigkeit
Schub $S$	Antriebsleistung, Schiffsform
Flügelzahl $z$	Einsatzbedingungen
Durchmesser $D_a$	Schiffsform, Einsatzbedingung, ...
Nabendurchmesser $D_N$	Propellertyp
Propellermaterial	Einsatzbedingungen, Kräfte



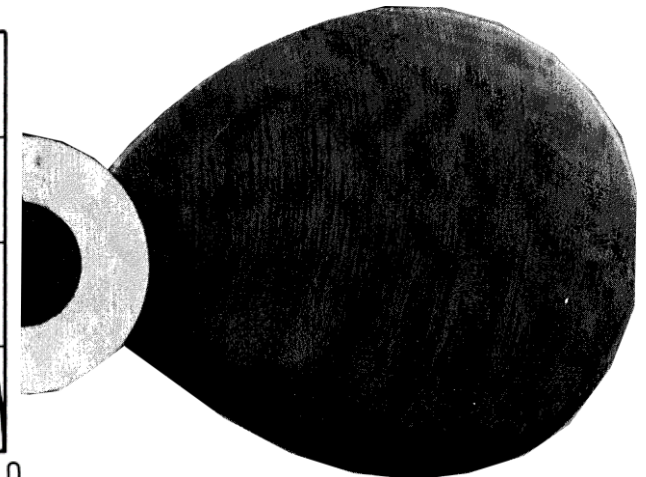
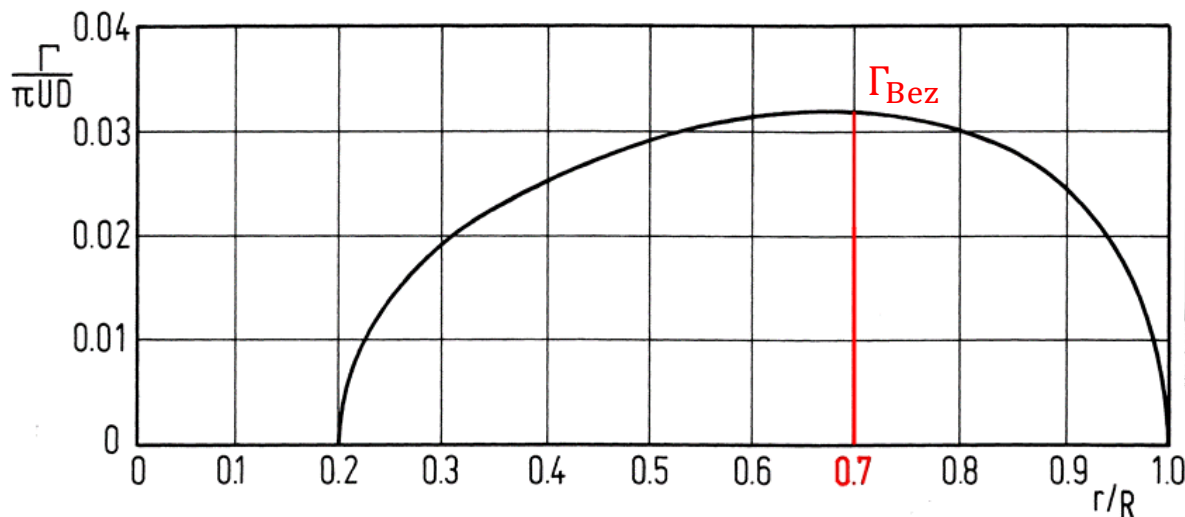
- Einteilung des Propellers in radiale Abschnitte

## Entwurfsschritte

### 2. Entwurf der radialen Lastverteilung

- „einheitliche“, radiale Zirkulationsverteilung von gehäuselosen Axialmaschinen
- Modellierung Zirkulationsverteilung durch Modellkonstante **FAKGAM**:

$$\mathbf{FAKGAM} = \frac{2R_A^2}{\pi(R_A^2 - R_N^2)} \cdot \int_{\frac{R_N}{R_A}}^1 \left( \frac{\Gamma\left(\frac{R}{R_A}\right)}{\Gamma_{\text{Bez}}}\right) \frac{R}{R_A} d\frac{R}{R_A} = 0,23 \dots 0,27$$



## Entwurfsschritte

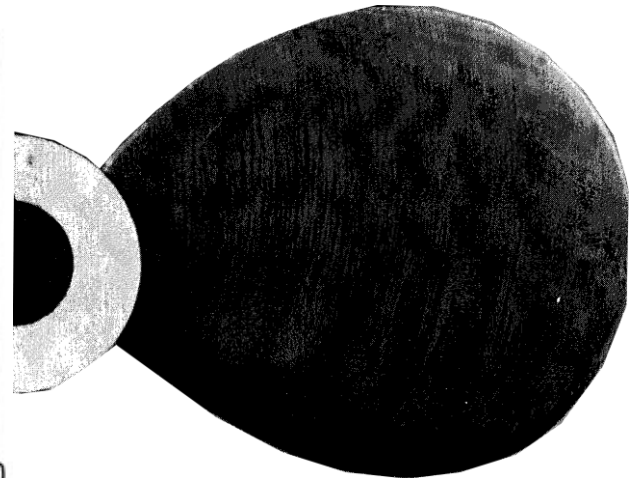
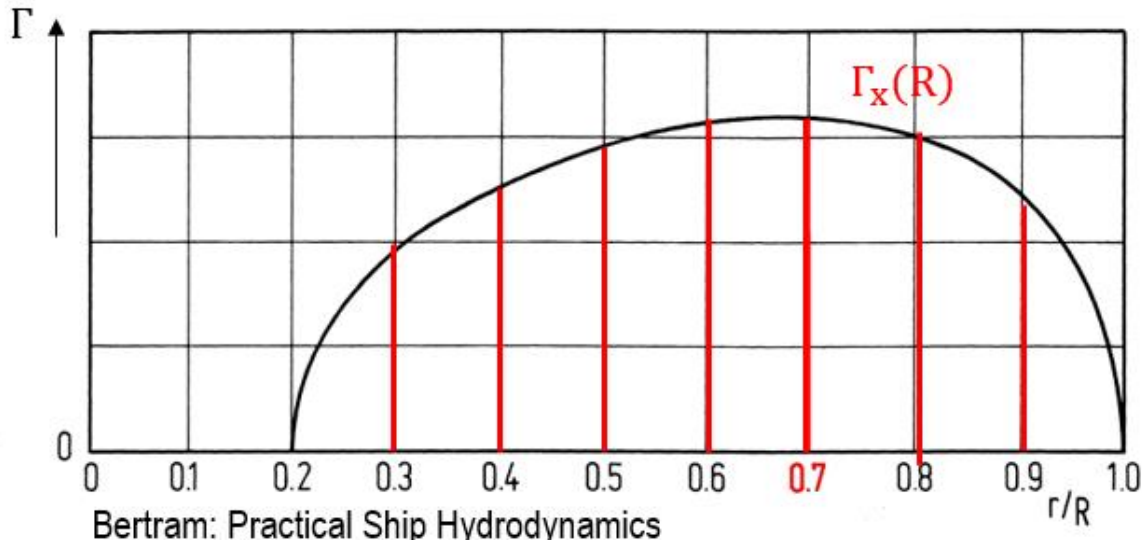
### 2. Entwurf der radialen Lastverteilung

- Zirkulation  $\Gamma_{\text{Bez}}$  mittels :

Energiebilanz: 
$$Q \cdot \omega = \frac{1}{2} \dot{m} (v_{\text{st}}^2 + c_{\text{u,st}}^2 - v_{\text{a}}^2)$$

Wirbeltheorie: 
$$Q = \frac{1}{2} z \cdot \dot{m} \cdot \Gamma_{\text{Bez}} \cdot \text{FAKGAM} \rightarrow \text{weitere Annahmen}$$

- mittels  $\Gamma_{\text{Bez}}$  und Verteilungsfunktion  $\rightarrow$  Zirkulation in Radienschnitten

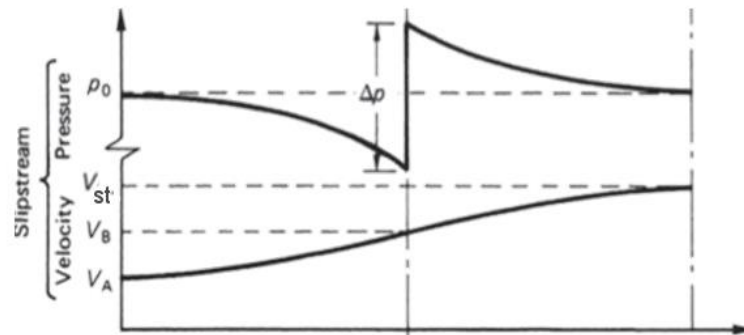
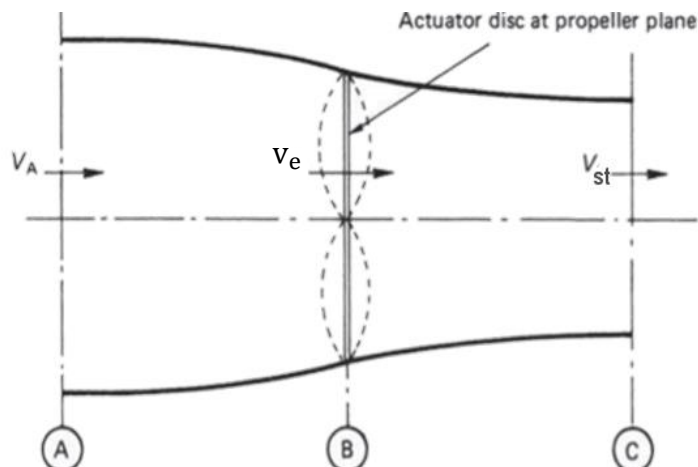


## Entwurfsschritte

### 3. Berechnung der Strahlgeschwindigkeit (axial, tangential)

- Axialkomponente mittels Strahltheorie:

$$v_{st} = \sqrt{\frac{S - \frac{1}{4} \rho \pi (R_a^2 - R_n^2) v_a^2}{\rho \pi (R_a^2 - R_n^2)}}$$



## Entwurfsschritte

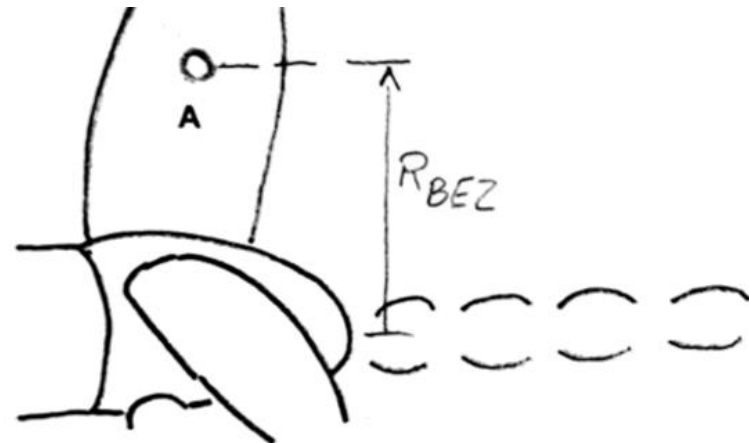
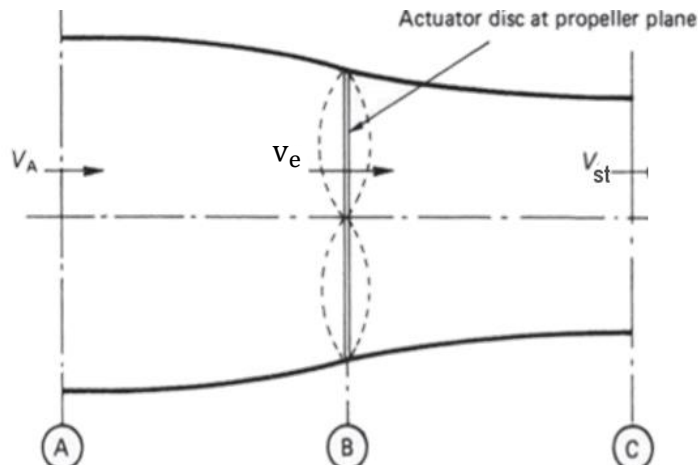
### 3. Berechnung der Strahlgeschwindigkeit (axial, tangential)

- Axialkomponente mittels Strahltheorie:

$$v_{st} = \sqrt{\frac{S - \frac{1}{4} \rho \pi (R_a^2 - R_n^2) v_a^2}{\rho \pi (R_a^2 - R_n^2)}}$$

- Drallkomponente mittels Wirbeltheorie:

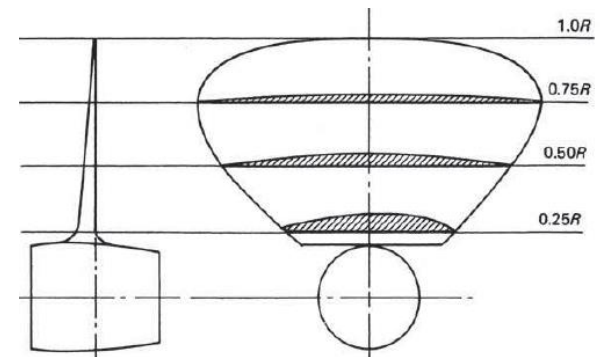
$$c_{u,R} = \frac{z \cdot \Gamma_{Bez}}{2\pi R}$$



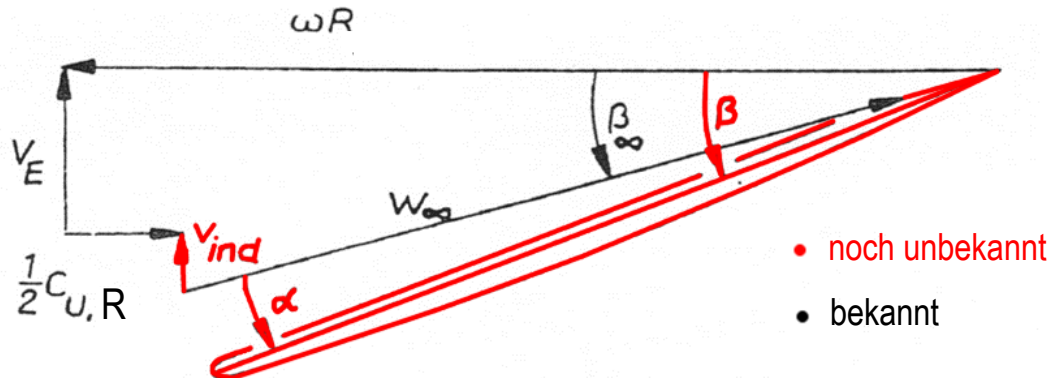
## Entwurfsschritte

### 4. Geschwindigkeitsdreiecke in der Propellerebene in radialen Schnitten

- Aufstellung des  $\bar{V}$ -Dreiecks für jeden Radienschnitt
- iterativer Prozess
- erste Annahme:  $v_{ind} = \frac{v_e \cdot z^2 \cdot l \cdot d_{max}}{2R_a \cdot R \cdot \pi^3} \cdot \text{FAKDIK} = 0$



- Ziel: Bestimmung von  $w_\infty = f(R) = \sqrt{\left(\omega \cdot R - \frac{c_{u,R}}{2}\right)^2 + (v_e + v_{ind})^2}$



## Entwurfsschritte

### 4. Bestimmung der Profilkontur

- Annahme:
  - Nutzung entdimensionierter, „bewährter“ Propellerprofile
  - Profile skaliert durch Profillänge  $l$

→ entdimensionierter Wölbungs ( $w/l$ ) - und Dickenverlauf ( $d/l$ )

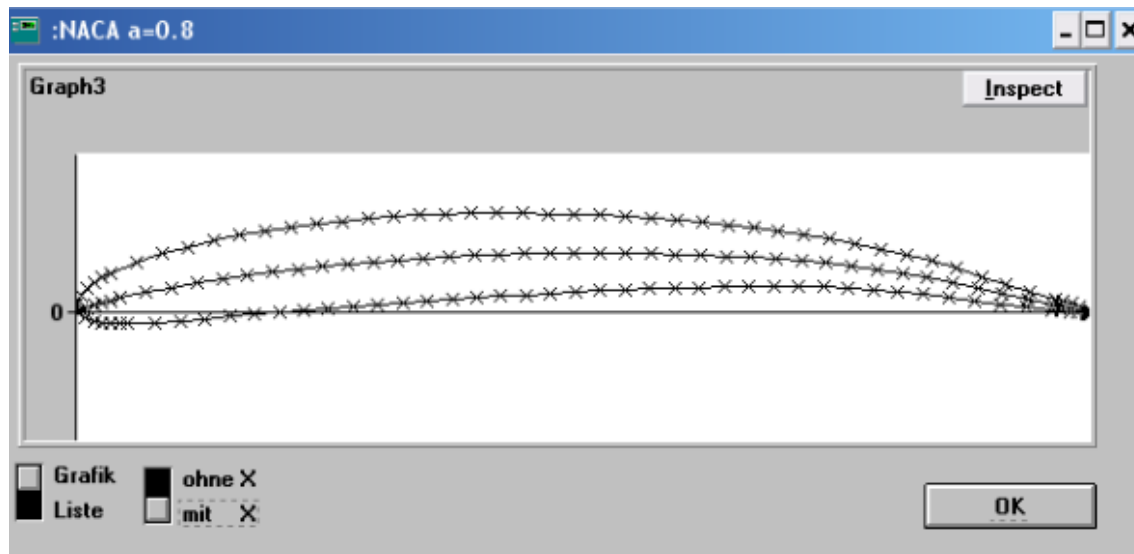


Tabelle		
	X/C	YDC
0	0	0
1	0.005	0.00389
2	0.0075	0.00546
3	0.0125	0.00832
4	0.025	0.01448
5	0.05	0.02458
6	0.075	0.03293
7	0.1	0.04008
8	0.15	0.05172
9	0.2	0.06052
10	0.25	0.06685
11	0.3	0.07072
12	0.35	0.07175
13	0.4	0.07074
14	0.45	0.06816
15	0.5	0.06433

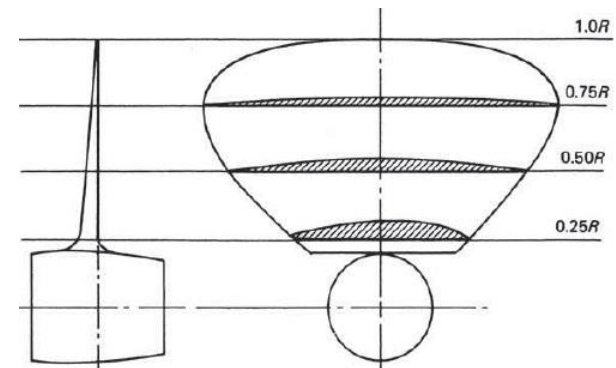
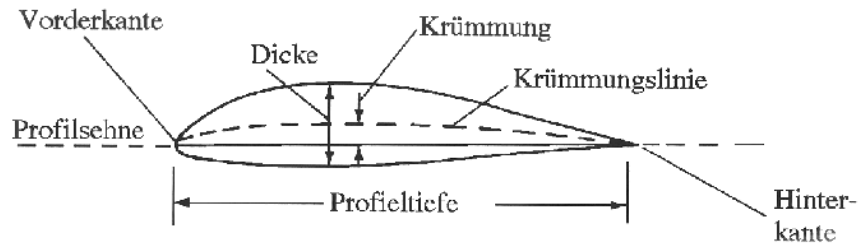
## Entwurfsschritte

### 6. Berechnung der Profillänge $l$ über Radius

- Vorgabe eines Auftriebsbeiwert  $c_a$  für die Strömungsmaschine
  - für Propeller:  $c_a = 0,3 \dots 0,6$
  - für Windturbinen:  $c_a = 0,8 \dots 1,2$
  - für Luftschrauben:  $c_a = 0,8 \dots 1,2$
- Profillänge  $l$  mittels Profil-/Wirbeltheorie:

$$\Gamma(R) = \frac{1}{2} c_a w_\infty(R) \cdot l(R)$$

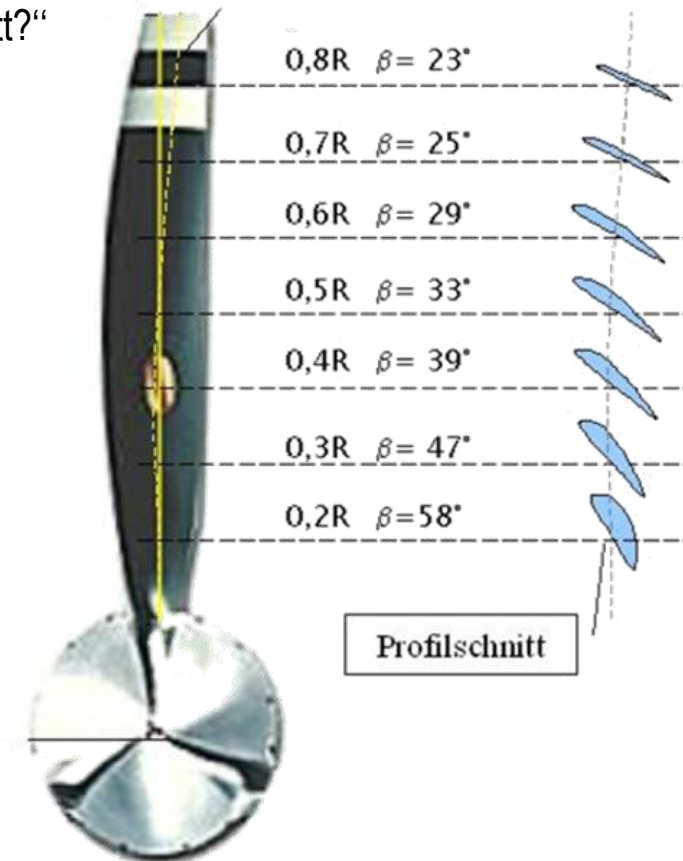
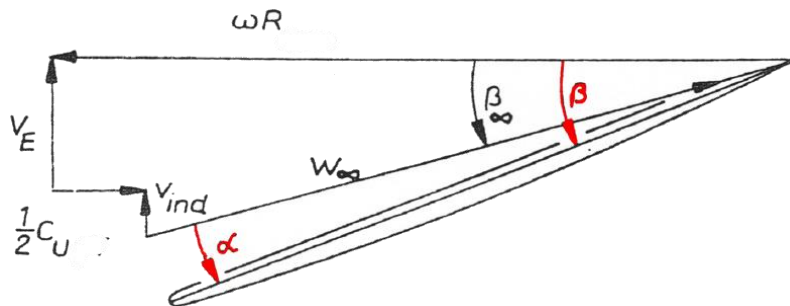
→ dimensionierte Profilgeometrie für alle Radienschnitte



## Entwurfsschritte

### 7. Anstell- und Steigungswinkel des Profils

- einzige Unbekannte: „Welche Lage hat mein Profil im Radienschnitt?“



## Entwurfsschritte

### 7. Anstell- und Steigungswinkel des Profils

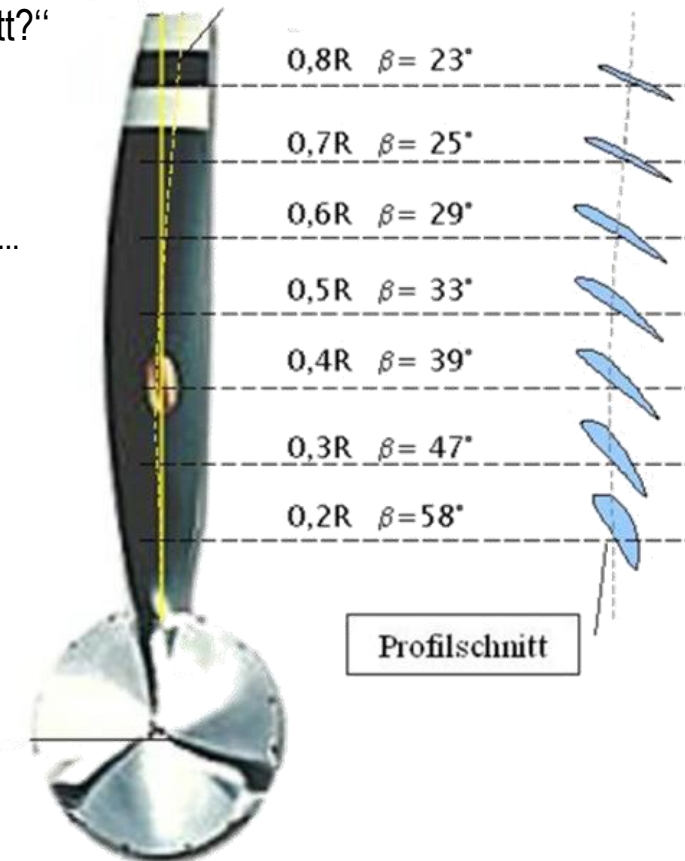
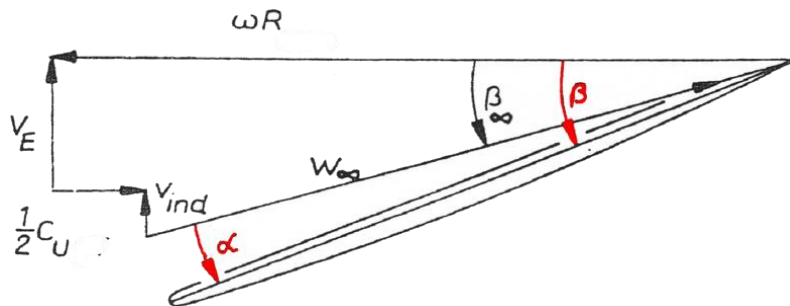
- einzige Unbekannte: „Welche Lage hat mein Profil im Radienschnitt?“

- Anstellwinkel  $\alpha$ :

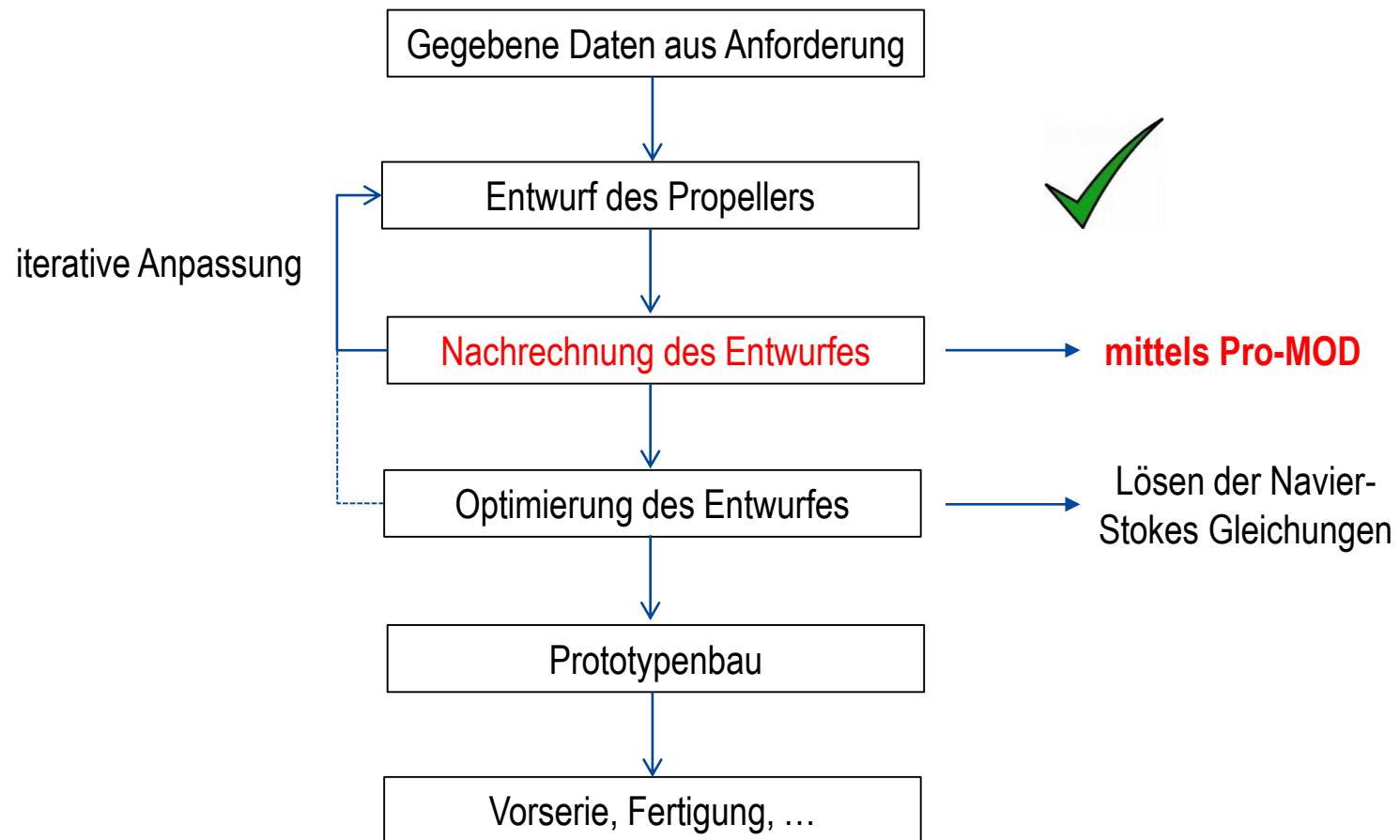
$$\alpha = \frac{c_a}{2\pi \cdot \text{FAKREI}} - \frac{2f_{\max}}{1} \text{FWNS} + \dots$$

- Steigungswinkel  $\beta$ :

$$\beta = \alpha + \beta_{\infty}$$



## Hierarchie des Propellerentwurfs



# Fragen ???

