

2. Flügel endlicher Länge

2.1 Hufeisenwirbel

2.2 Traglinientheorie

2.3 Einfaches Wirbelgitterverfahren

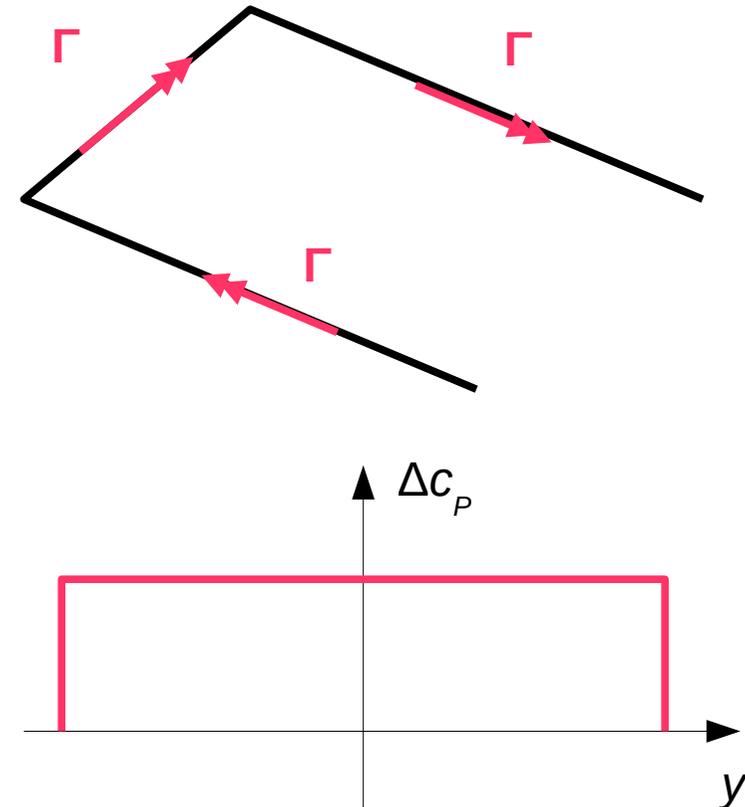
2.4 Allgemeines Wirbelgitterverfahren

2.1 Hufeisenwirbel

- Modell:
 - Das einfachste Modell eines Tragflügels unendlicher Spannweite ist ein gerader Wirbelfaden.
 - Da ein Wirbelfaden nicht enden kann, muss der den Tragflügel endlicher Spannweite darstellende Wirbelfaden an den Flügelspitzen durch freie Wirbelfäden fortgesetzt werden.
 - Freie Wirbelfäden sind parallel zur Strömung. In der linearen Theorie werden sie parallel zur ungestörten Anströmgeschwindigkeit angeordnet.
 - Damit ergibt sich als einfachstes Modell für einen Tragflügel endlicher Spannweite das Modell des Hufeisenwirbels.

2.1 Hufeisenwirbel

- Probleme:
 - Die Zirkulation entlang des Flügels ist konstant.
 - Damit ist auch die Auftriebsverteilung entlang des Flügels und somit der Druckunterschied konstant.
 - An den Flügelenden springt der Druckunterschied auf den Wert null.

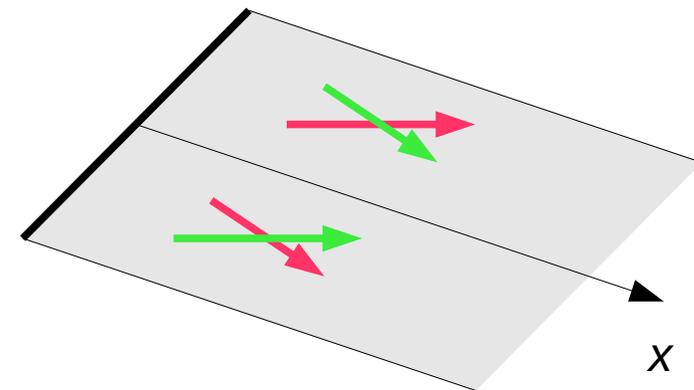


2.2 Traglinientheorie

- Modell:
 - Damit die Auftriebsverteilung an den Flügelenden stetig gegen null geht, wird eine in Spannweitenrichtung variable Zirkulation $\Gamma(y)$ angenommen.
 - Die veränderliche Zirkulation erfordert freie Wirbel mit infinitesimaler Zirkulation, die entlang der gesamten Hinterkante abgehen.
 - Diese freien Wirbel bilden eine Wirbelfläche, die zu einer Unstetigkeit in der Geschwindigkeitskomponente tangential zur Wirbelfläche führt.
 - Diese Modellvorstellung führt auf die Traglinientheorie von Prandtl.

2.2 Traglinientheorie

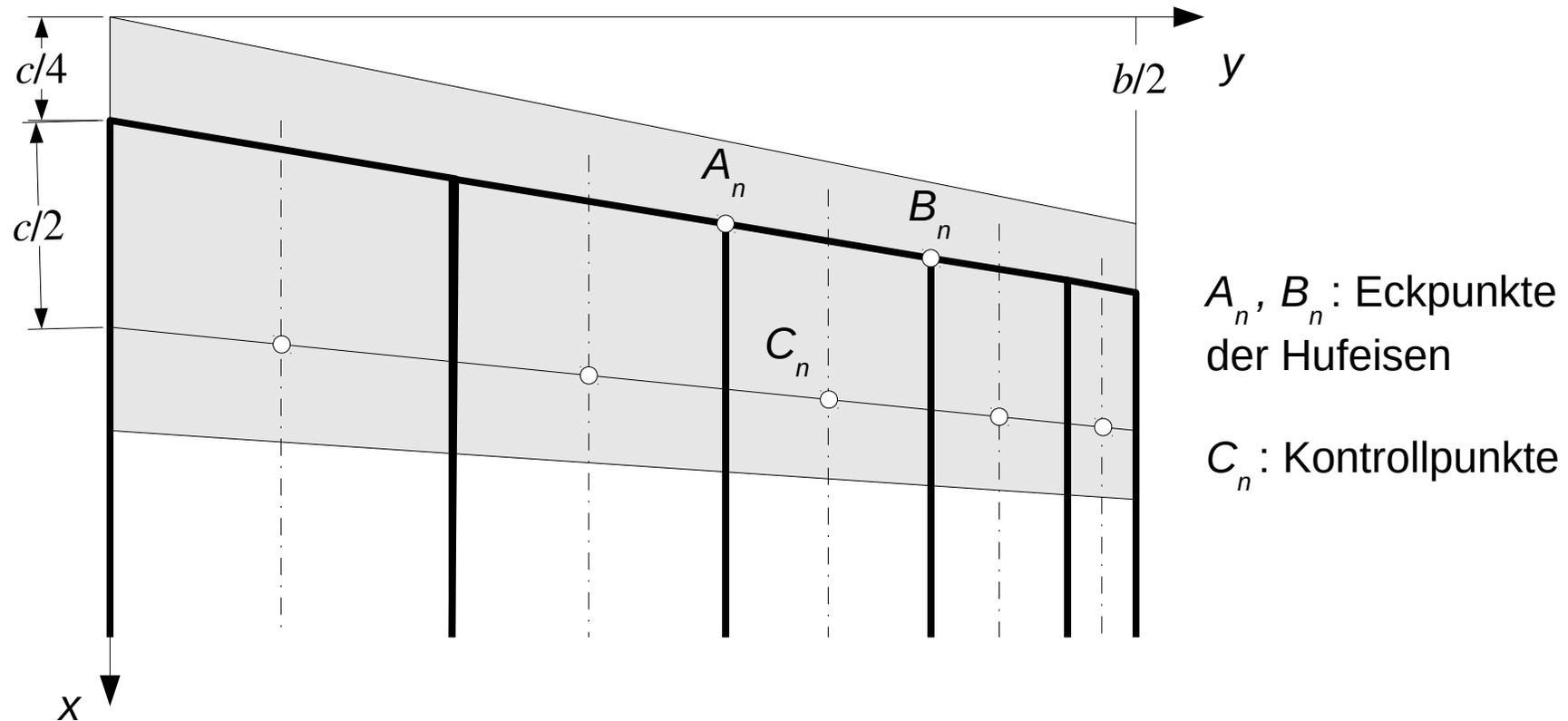
- Damit lassen sich Auftriebsverteilung und induzierter Widerstand für gerade Flügel berechnen.
- Probleme:
 - Die Theorie liefert keine Aussagen über das Moment.
 - Die Theorie versagt bei gepfeilten Flügeln.



2.3 Einfaches Wirbelgitterverfahren

- Modell:
 - Der Tragflügel wird durch eine Reihe von Hufeisenwirbeln entlang der Viertelpunktlinie approximiert.
 - Das führt zu einer in Spannweitenrichtung abschnittsweise konstanten Zirkulation.
 - Für jeden Hufeisenwirbel wird ein Kontrollpunkt definiert, der in der Mitte des Hufeisens im Dreiviertelpunkt liegt.
 - Die Zirkulation der Hufeisenwirbel wird so bestimmt, dass die Randbedingung in den Kontrollpunkten erfüllt ist.
 - Mit dieser Methode lassen sich auch gepfeilte Flügel berechnen. Das Moment kann nicht bestimmt werden.

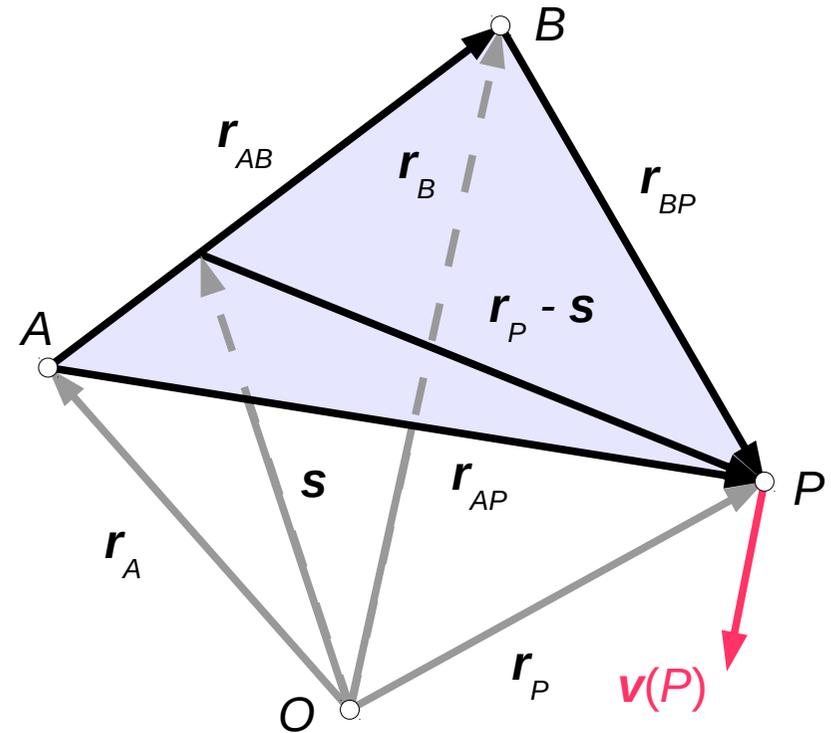
2.3 Einfaches Wirbelgitterverfahren



2.3 Einfaches Wirbelgitterverfahren

- Gleichungen für den Hufeisenwirbel:
 - Zunächst wird der Beitrag eines geraden Abschnitts AB eines Wirbelfadens zur Geschwindigkeit in einem Punkt P betrachtet.
 - Nach dem Gesetz von Biot-Savart gilt:

$$\mathbf{v}(P) = -\frac{\Gamma}{4\pi} \int_A^B \frac{(\mathbf{r}_P - \mathbf{s}) \times d\mathbf{s}}{|\mathbf{r}_P - \mathbf{s}|^3}$$



2.3 Einfaches Wirbelgitterverfahren

- Aus der Zeichnung kann abgelesen werden:

$$\mathbf{s} = \mathbf{r}_A + \lambda \mathbf{r}_{AB}, \quad 0 \leq \lambda \leq 1, \quad d\mathbf{s} = \mathbf{r}_{AB} d\lambda$$

$$\mathbf{r}_P - \mathbf{s} = \mathbf{r}_P - \mathbf{r}_A - \lambda \mathbf{r}_{AB} = \mathbf{r}_{AP} - \lambda \mathbf{r}_{AB}$$

- Daraus folgt:

$$(\mathbf{r}_P - \mathbf{s}) \times d\mathbf{s} = (\mathbf{r}_{AP} - \lambda \mathbf{r}_{AB}) \times \mathbf{r}_{AB} d\lambda = \mathbf{r}_{AP} \times \mathbf{r}_{AB} d\lambda = -\mathbf{r}_{AB} \times \mathbf{r}_{AP} d\lambda$$

$$\begin{aligned} |\mathbf{r}_P - \mathbf{s}|^2 &= (\mathbf{r}_{AP} - \lambda \mathbf{r}_{AB}) \cdot (\mathbf{r}_{AP} - \lambda \mathbf{r}_{AB}) = |\mathbf{r}_{AP}|^2 - 2\mathbf{r}_{AB} \cdot \mathbf{r}_{AP} \lambda + |\mathbf{r}_{AB}|^2 \lambda^2 \\ &= c + b\lambda + a\lambda^2 \end{aligned}$$

$$\text{mit } a = |\mathbf{r}_{AB}|^2, \quad b = -2\mathbf{r}_{AB} \cdot \mathbf{r}_{AP}, \quad c = |\mathbf{r}_{AP}|^2$$

- Damit gilt:
$$\mathbf{v}(P) = \frac{\Gamma}{4\pi} (\mathbf{r}_{AB} \times \mathbf{r}_{AP}) \int_0^1 \frac{d\lambda}{(a\lambda^2 + b\lambda + c)^{3/2}}$$

2.3 Einfaches Wirbelgitterverfahren

- Mit $\Delta = 4ac - b^2 = 4(|\mathbf{r}_{AB}|^2 |\mathbf{r}_{AP}|^2 - (\mathbf{r}_{AB} \cdot \mathbf{r}_{AP})^2)$ (Lagrangesche Identität)
 $= 4(\mathbf{r}_{AB} \times \mathbf{r}_{AP}) \cdot (\mathbf{r}_{AB} \times \mathbf{r}_{AP}) = 4|\mathbf{r}_{AB} \times \mathbf{r}_{AP}|^2$

berechnet sich das Integral zu

$$\int_0^1 \frac{d\lambda}{(a\lambda^2 + b\lambda + c)^{3/2}} = \left[\frac{4a\lambda + 2b}{\Delta \sqrt{a\lambda^2 + b\lambda + c}} \right]_{\lambda=0}^{\lambda=1} = \frac{1}{\Delta} \left(\frac{4a+2b}{\sqrt{a+b+c}} - \frac{2b}{\sqrt{c}} \right) \cdot$$

- Für die einzelnen Terme gilt:

$$4a + 2b = 4(|\mathbf{r}_{AB}|^2 - \mathbf{r}_{AB} \cdot \mathbf{r}_{AP}) = 4\mathbf{r}_{AB} \cdot (\mathbf{r}_{AB} - \mathbf{r}_{AP}) = -4\mathbf{r}_{AB} \cdot \mathbf{r}_{BP}$$

$$a + b + c = |\mathbf{r}_{AB}|^2 - 2\mathbf{r}_{AB} \cdot \mathbf{r}_{AP} + |\mathbf{r}_{AP}|^2 = |\mathbf{r}_{AP} - \mathbf{r}_{AB}|^2 = |\mathbf{r}_{BP}|^2$$

$$2 \frac{b}{\sqrt{c}} = -4 \frac{\mathbf{r}_{AB} \cdot \mathbf{r}_{AP}}{|\mathbf{r}_{AP}|}$$

2.3 Einfaches Wirbelgitterverfahren

- Einsetzen ergibt:

$$\mathbf{v}(P) = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\mathbf{r}_{AB} \times \mathbf{r}_{AP}}{|\mathbf{r}_{AB} \times \mathbf{r}_{AP}|^2} \left(\frac{\mathbf{r}_{AB} \cdot \mathbf{r}_{AP}}{|\mathbf{r}_{AP}|} - \frac{\mathbf{r}_{AB} \cdot \mathbf{r}_{BP}}{|\mathbf{r}_{BP}|} \right)$$

- Mit $\mathbf{r}_{AB} \times \mathbf{r}_{AP} = (\mathbf{r}_{AP} - \mathbf{r}_{BP}) \times \mathbf{r}_{AP} = -\mathbf{r}_{BP} \times \mathbf{r}_{AP} = \mathbf{r}_{AP} \times \mathbf{r}_{BP}$ folgt die etwas elegantere Form

$$\mathbf{v}(P) = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\mathbf{r}_{AP} \times \mathbf{r}_{BP}}{|\mathbf{r}_{AP} \times \mathbf{r}_{BP}|^2} \left(\frac{\mathbf{r}_{AB} \cdot \mathbf{r}_{AP}}{|\mathbf{r}_{AP}|} - \frac{\mathbf{r}_{AB} \cdot \mathbf{r}_{BP}}{|\mathbf{r}_{BP}|} \right)$$

- Damit lässt sich der Beitrag der gebundenen Wirbel berechnen.

2.3 Einfaches Wirbelgitterverfahren

- Die freien Wirbel sind halbunendliche Wirbelfäden.
- Zur Berechnung des Beitrags eines halbunendlichen Wirbelfadens, der im Punkt A beginnt und durch Punkt B verläuft, muss nur die obere Integrationsgrenze geändert werden:

$$\begin{aligned}
 \int_0^{\infty} \frac{d\lambda}{(a\lambda^2 + b\lambda + c)^{3/2}} &= \left[\frac{4a\lambda + 2b}{\Delta \sqrt{a\lambda^2 + b\lambda + c}} \right]_{\lambda=0}^{\lambda \rightarrow \infty} = \frac{1}{\Delta} \left(\frac{4a}{\sqrt{a}} - \frac{2b}{\sqrt{c}} \right) \\
 &= \frac{1}{|\mathbf{r}_{AB} \times \mathbf{r}_{AP}|^2} \left(|\mathbf{r}_{AB}| + \frac{\mathbf{r}_{AB} \cdot \mathbf{r}_{AP}}{|\mathbf{r}_{AP}|} \right) \\
 &= \frac{|\mathbf{r}_{AB}|}{|\mathbf{r}_{AB} \times \mathbf{r}_{AP}|^2} \left(1 + \frac{\mathbf{r}_{AB} \cdot \mathbf{r}_{AP}}{|\mathbf{r}_{AB}| |\mathbf{r}_{AP}|} \right)
 \end{aligned}$$

2.3 Einfaches Wirbelgitterverfahren

- Für die Geschwindigkeit folgt:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{v}(P) &= \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\mathbf{r}_{AB} \times \mathbf{r}_{AP}}{|\mathbf{r}_{AB} \times \mathbf{r}_{AP}|^2} |\mathbf{r}_{AB}| \left(1 + \frac{\mathbf{r}_{AB} \cdot \mathbf{r}_{AP}}{|\mathbf{r}_{AB}| |\mathbf{r}_{AP}|} \right) \\
 &= \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\left(\frac{\mathbf{r}_{AB}}{|\mathbf{r}_{AB}|} \right) \times \mathbf{r}_{AP}}{\left| \left(\frac{\mathbf{r}_{AB}}{|\mathbf{r}_{AB}|} \right) \times \mathbf{r}_{AP} \right|^2} \left(1 + \left(\frac{\mathbf{r}_{AB}}{|\mathbf{r}_{AB}|} \right) \cdot \left(\frac{\mathbf{r}_{AP}}{|\mathbf{r}_{AP}|} \right) \right)
 \end{aligned}$$

- Für einen Wirbelfaden entlang der x-Achse gilt: $\mathbf{r}_{AB} / |\mathbf{r}_{AB}| = \mathbf{e}_x$

2.3 Einfaches Wirbelgitterverfahren

- Damit vereinfacht sich die Gleichung für die Geschwindigkeit zu

$$\mathbf{v}(P) = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\mathbf{e}_x \times \mathbf{r}_{AP}}{|\mathbf{e}_x \times \mathbf{r}_{AP}|^2} \left(1 + \mathbf{e}_x \cdot \frac{\mathbf{r}_{AP}}{|\mathbf{r}_{AP}|} \right)$$

- Die von einem Hufeisenwirbel induzierte Geschwindigkeit setzt sich zusammen aus
 - der Geschwindigkeit \mathbf{v}_A infolge des freien Wirbels am Punkt A ,
 - der Geschwindigkeit \mathbf{v}_{AB} infolge des gebundenen Wirbels zwischen den Punkten A und B , und
 - der Geschwindigkeit \mathbf{v}_B infolge des freien Wirbels am Punkt B .

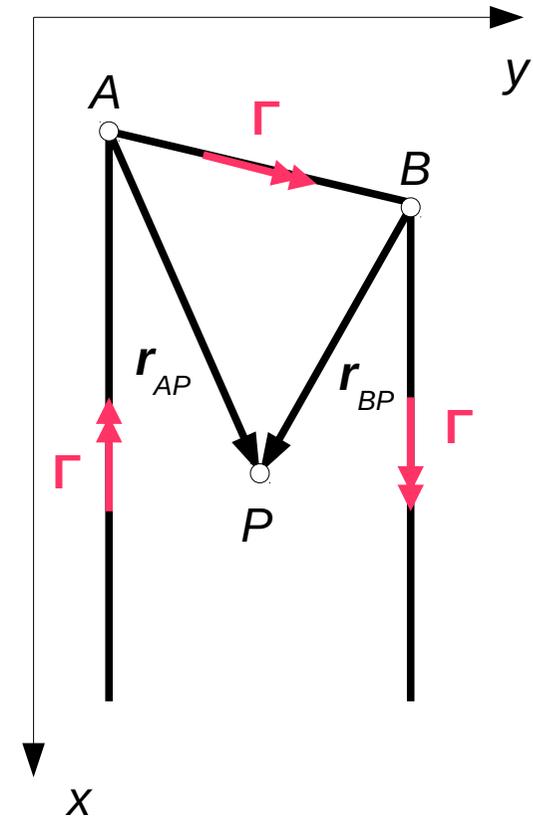
2.3 Einfaches Wirbelgitterverfahren

$$\mathbf{v}_A(P) = -\frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\mathbf{e}_x \times \mathbf{r}_{AP}}{|\mathbf{e}_x \times \mathbf{r}_{AP}|^2} \left(1 + \mathbf{e}_x \cdot \frac{\mathbf{r}_{AP}}{|\mathbf{r}_{AP}|} \right)$$

$$\mathbf{v}_{AB}(P) = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\mathbf{r}_{AP} \times \mathbf{r}_{BP}}{|\mathbf{r}_{AP} \times \mathbf{r}_{BP}|^2} \left(\frac{\mathbf{r}_{AB} \cdot \mathbf{r}_{AP}}{|\mathbf{r}_{AP}|} - \frac{\mathbf{r}_{AB} \cdot \mathbf{r}_{BP}}{|\mathbf{r}_{BP}|} \right)$$

$$\mathbf{v}_B(P) = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\mathbf{e}_x \times \mathbf{r}_{BP}}{|\mathbf{e}_x \times \mathbf{r}_{BP}|^2} \left(1 + \mathbf{e}_x \cdot \frac{\mathbf{r}_{BP}}{|\mathbf{r}_{BP}|} \right)$$

$$\mathbf{v}(P) = \mathbf{v}_A(P) + \mathbf{v}_{AB}(P) + \mathbf{v}_B(P)$$



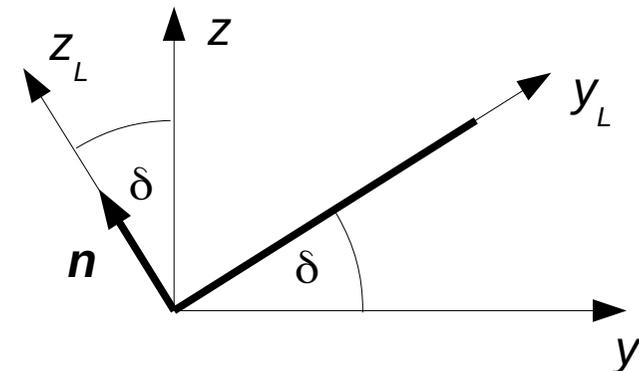
2.3 Einfaches Wirbelgitterverfahren

- Randbedingungen:

- Für eine Fläche in der xy -Ebene gelten die gleichen Randbedingungen wie beim Profil:

$$w_z(\mathbf{r}_C) = v_\infty \left(\frac{dz_s}{dx}(\mathbf{r}_C) - \alpha \right)$$

- Wenn die Fläche gegenüber der xy -Ebene geneigt ist, müssen die Randbedingungen im lokalen Koordinatensystem der Fläche angesetzt werden.



2.3 Einfaches Wirbelgitterverfahren

- Die Randbedingungen lauten:

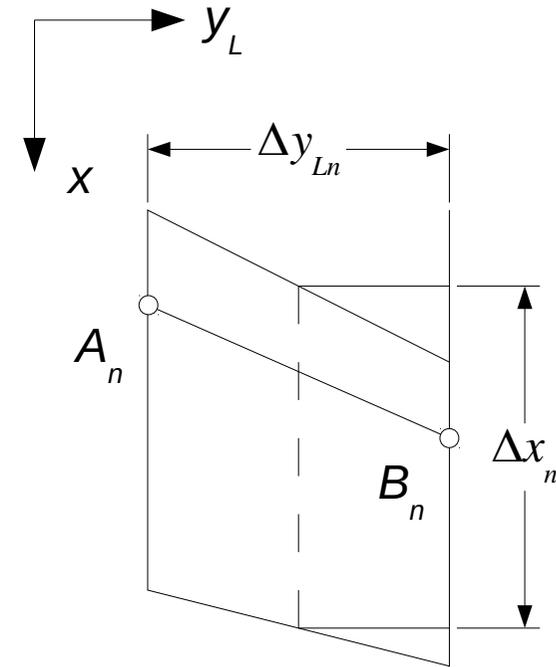
$$\mathbf{w}(\mathbf{r}_C) \cdot \mathbf{n} = v_\infty \left(\frac{d\xi_S}{dx}(\mathbf{r}_C) - \alpha \mathbf{e}_z \cdot \mathbf{n} \right)$$

- Die Funktion $\xi_S(x, y_L)$ beschreibt die Skelettläche im lokalen Koordinatensystem der Auftriebsfläche.
- Beispiele für geneigte Flächen sind Flügel mit V-Form, Flügel mit Winglets oder Seitenleitwerke.
- Bei N Hufeisenwirbeln liefern die Randbedingungen in den N Kontrollpunkten N Gleichungen zur Bestimmung der N Wirbelstärken Γ_n .

2.3 Einfaches Wirbelgitterverfahren

- Auftrieb:
 - In die linearisierte Bernoulli-Gleichung geht nur die Komponente w_x der Störströmung ein.
 - Die freien Wirbel, die entlang der x -Achse verlaufen, haben keinen Einfluss auf w_x .
 - Damit kann der Druckbeiwert wie bei der Methode der diskreten Wirbel berechnet werden:

$$\Delta c_p = \frac{2}{\Delta x_n} \frac{\Gamma_n}{v_\infty}$$



2.3 Einfaches Wirbelgitterverfahren

- Für die Kraft senkrecht zur Fläche folgt:

$$L_n = q_\infty \Delta c_p A_n = q_\infty \cdot \frac{2}{\Delta x_n} \frac{\Gamma_n}{v_\infty} \Delta x_n \Delta y_{Ln} = 2 q_\infty \Delta y_{Ln} \frac{\Gamma_n}{v_\infty}$$

- Für den Kraftvektor gilt: $\mathbf{L}_n = L_n \mathbf{n}$

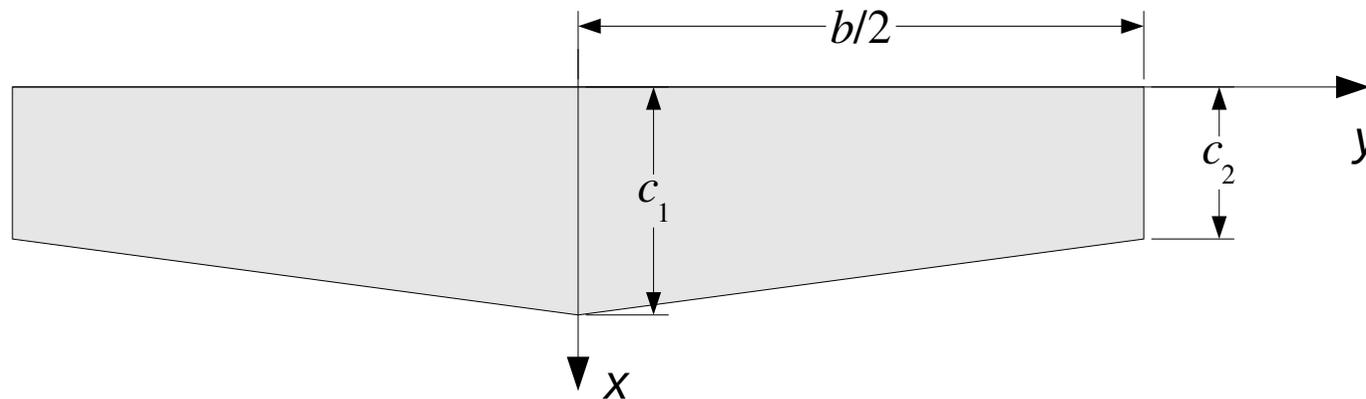
- Mit $\mathbf{n} = \frac{\mathbf{e}_x \times \mathbf{r}_{ABn}}{|\mathbf{e}_x \times \mathbf{r}_{ABn}|}$

und $|\mathbf{e}_x \times \mathbf{r}_{ABn}| = \sqrt{(y_{Bn} - y_{An})^2 + (z_{Bn} - z_{An})^2} = \Delta y_{Ln}$

folgt: $\mathbf{L}_n = 2 q_\infty \frac{\Gamma_n}{v_\infty} \mathbf{e}_x \times \mathbf{r}_{ABn}$

2.3 Einfaches Wirbelgitterverfahren

- Beispiel:
 - Gegeben ist ein vorwärts gepfeilter Tragflügel mit einer geometrischen Schränkung.
 - Geometrie:



- Der Tragflügel hat ein symmetrisches Profil.

2.3 Einfaches Wirbelgitterverfahren

- Schränkung:
 - Der Einstellwinkel nimmt linear von 1° an der Flügelwurzel auf 0° an der Flügelspitze ab.
- Zahlenwerte:
 - Spannweite $b = 15$ m
 - Flügeltiefe an der Flügelwürzel: $c_1 = 1,5$ m
 - Flugeltiefe an der Flügelspitze: $c_2 = 0,9 c_1$
 - Anstellwinkel: $\alpha = 5^\circ$
- Gesucht ist der Verlauf der Zirkulation über die Spannweite.

2.3 Einfaches Wirbelgitterverfahren

- Diskretisierung:

- Die Eckpunkte der Hufeisenwirbel liegen bei

$$y_n = \frac{1}{2} b \cos\left(\frac{N-n+1}{N} \pi\right), \quad n = 1, \dots, N+1$$

- Dadurch ergibt sich an den Flügelenden eine feinere Unterteilung als in der Flügelmitte.

- GNU Octave-Skript:

- Die Funktion **horseshoe** berechnet die induzierte Geschwindigkeit eines Hufeisenwirbels der Wirbelstärke eins (vgl. Übungsblatt 4.2).

2.3 Einfaches Wirbelgitterverfahren

```
# Beispiel: Geschränkter und gepfeilter Tragflügel
# -----

# Daten

nhw = [10, 20, 50]; % Anzahl der Hufeisenwirbel

b = 15; % Spannweite in m
c1 = 1.5; % Flügeltiefe an der Flügelwurzel in m
c2 = 0.9 * c1; % Flügeltiefe an der Flügelspitze in m
a1 = 1 * pi / 180; % Einstellwinkel an der Flügelwurzel
a2 = 0; % Einstellwinkel an der Flügelspitze
a = 5 * pi / 180; % Anstellwinkel

for k = 1 : length(nhw)

# Diskretisierung

    theta = linspace(pi, 0, nhw(k) + 1);
    y = 0.5 * b * cos(theta);
```

2.3 Einfaches Wirbelgitterverfahren

```
yA = y(1 : nhw(k));
yB = y(2 : nhw(k) + 1);
yC = 0.5 * (yA + yB);

dc = 2 * (c2 - c1) / b;
x = 0.25 * (c1 + dc .* abs(y));
xA = x(1 : nhw(k));
xB = x(2 : nhw(k) + 1);
xC = 0.75 * (c1 + dc .* abs(yC));

z = zeros(1, nhw(k));
rA = [xA; yA; z];
rB = [xB; yB; z];
rC = [xC; yC; z];

# Randbedingungen

da = 2 * (a2 - a1) / b;
ag = - (a1 + da .* abs(yC));
rhs = ag' - a;
```

2.3 Einfaches Wirbelgitterverfahren

```
# Matrix

C = zeros(nhw(k), nhw(k), "double");
for n = 1 : nhw(k)
    v = horseshoe(rA(:, n), rB(:, n), rC);
    C(:, n) = v(3, :);
end

# Zirkulation

G = C \ rhs;

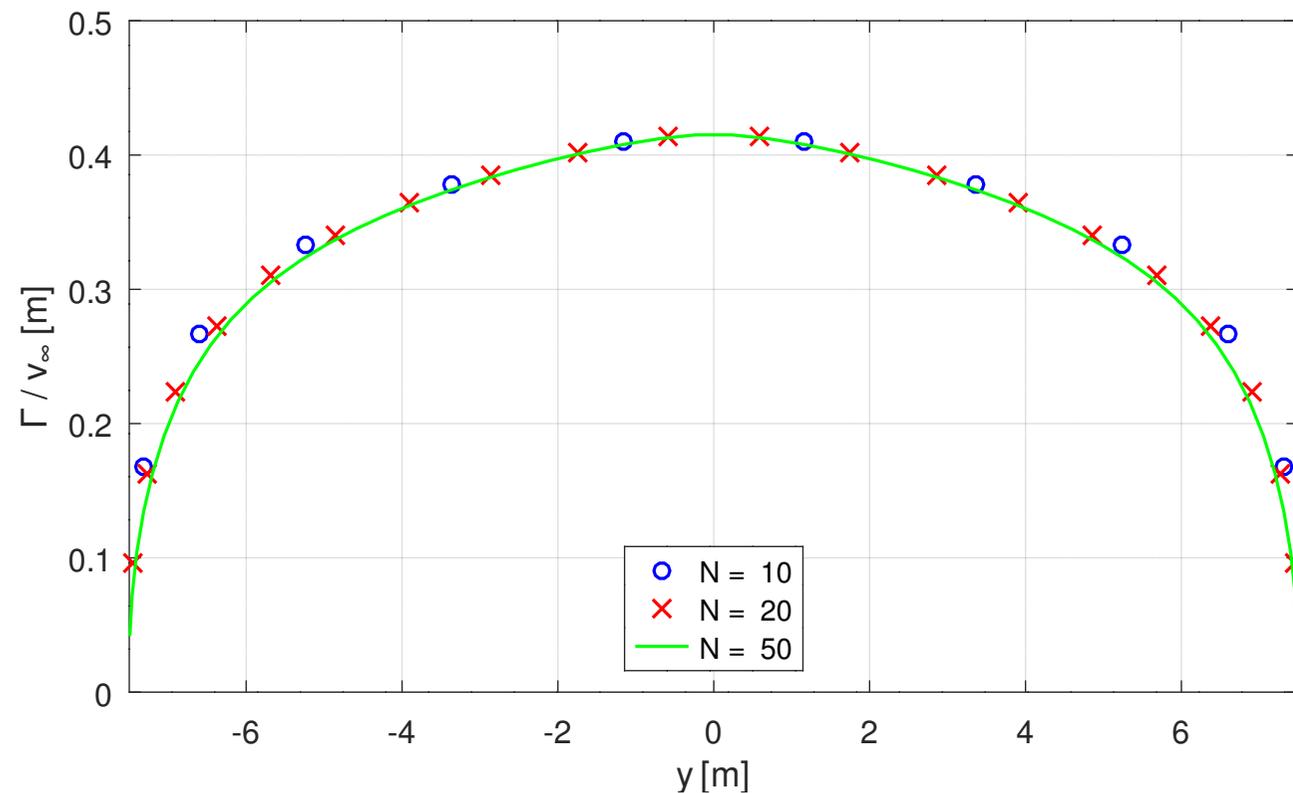
R{1, k} = yC; R{2, k} = G;

end

...
```

2.3 Einfaches Wirbelgitterverfahren

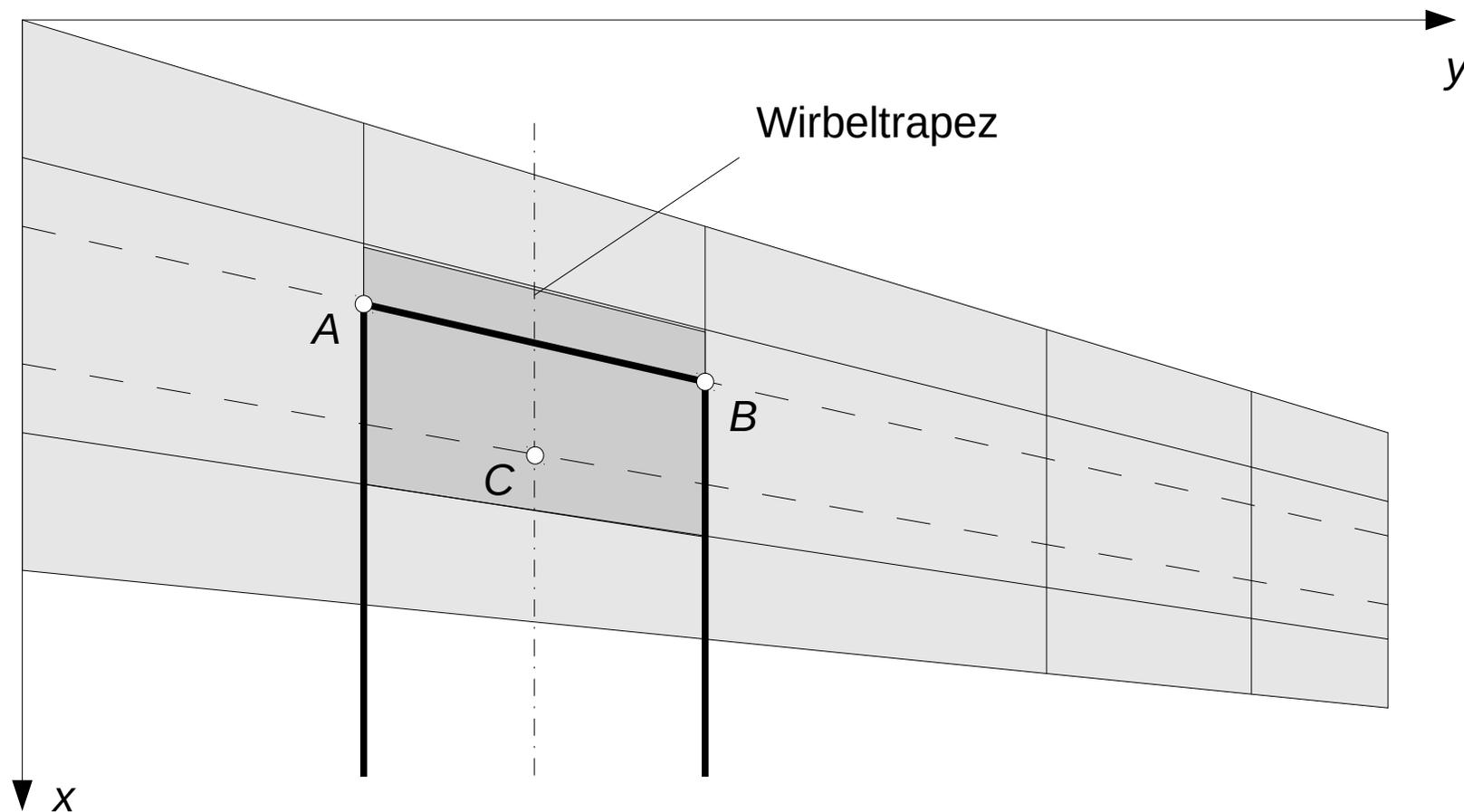
- Verlauf der Zirkulation:



2.4 Allgemeines Wirbelgitterverfahren

- Methode:
 - Das Verfahren ist eine dreidimensionale Erweiterung der Methode der diskreten Wirbel.
 - Außer in Spannweitenrichtung werden auch in Flügeltiefenrichtung mehrere Hufeisenwirbel angeordnet.
 - Dazu wird der Flügel in Wirbeltrapeze unterteilt, deren parallele Kanten parallel zur x -Achse sind.
 - Die gebundenen Wirbel der Hufeisen liegen entlang der Viertelpunktlinien der Wirbeltrapeze.
 - Die Kontrollpunkte liegen jeweils in der Mitte der Dreiviertelpunktlinien der Wirbeltrapeze.

2.4 Allgemeines Wirbelgitterverfahren



2.4 Allgemeines Wirbelgitterverfahren

- Die Wirbelstärken werden so bestimmt, dass die Randbedingung in den Kontrollpunkten erfüllt ist.
- Kräfte und Momente:
 - Für die Kraft auf einen gebundenen Wirbel gilt wie beim einfachen Wirbelgitterverfahren:

$$\mathbf{L}_n = 2 q_\infty \frac{\Gamma_n}{v_\infty} \mathbf{e}_x \times \mathbf{r}_{ABn}$$

- Der Angriffspunkt liegt in der Mitte der Viertelpunktlinie.
- Aus diesen Kräften lässt sich der Verlauf der Biegemomente und des Torsionsmoments entlang des Tragflügels ermitteln.

2.4 Allgemeines Wirbelgitterverfahren

- Druckverteilung:

- Die Druckverteilung lässt sich durch auf den Wirbeltrapezen konstante Druckdifferenzen approximieren.
- Mit der Trapezfläche $A_n = \Delta x_n \Delta y_{Ln}$ gilt:

$$\Delta p_n = \frac{L_n}{A_n} = 2 q_\infty \frac{|\mathbf{e}_x \times \mathbf{r}_{ABn}|}{A_n} \frac{\Gamma_n}{v_\infty} = \frac{2 q_\infty}{\Delta x_n} \frac{\Gamma_n}{v_\infty}$$

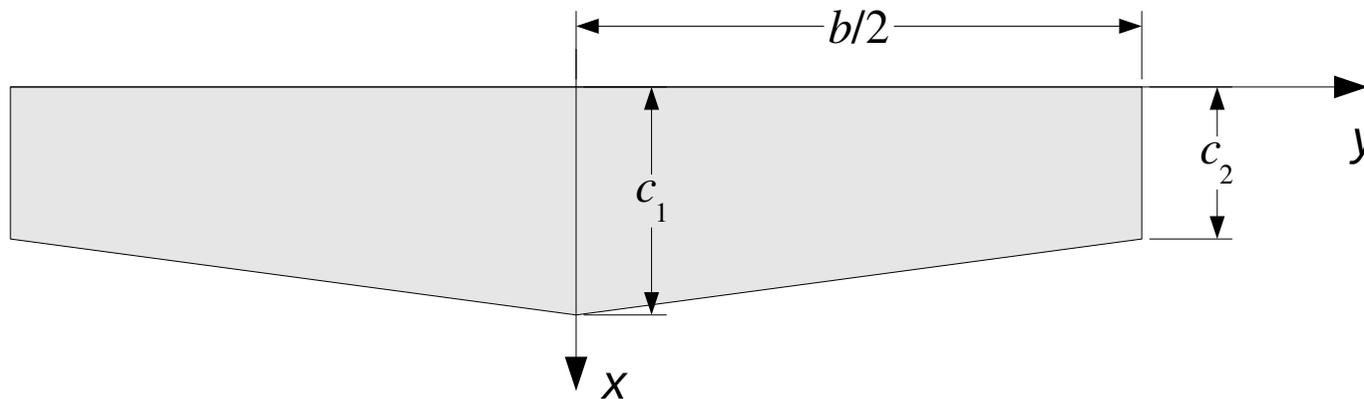
- Dabei ist Δx_n die mittlere Länge des Trapezes in x-Richtung, und

$$\Delta y_{Ln} = |\mathbf{e}_x \times \mathbf{r}_{ABn}|$$

ist die Breite des Trapezes.

2.4 Allgemeines Wirbelgitterverfahren

- Beispiel:
 - Gegeben ist ein vorwärts gepfeilter Tragflügel mit einer geometrischen Schränkung.
 - Geometrie:



- Der Tragflügel hat ein symmetrisches Profil.

2.4 Allgemeines Wirbelgitterverfahren

- Schränkung:
 - Der Einstellwinkel nimmt linear von 1° an der Flügelwurzel auf 0° an der Flügelspitze ab.
- Zahlenwerte:
 - Spannweite $b = 15$ m
 - Flügeltiefe an der Flügelwürzel: $c_1 = 1,5$ m
 - Flugeltiefe an der Flügelspitze: $c_2 = 0,9 c_1$
 - Anstellwinkel: $\alpha = 5^\circ$
- Gesucht:
 - Druckverteilung
 - Verlauf der Zirkulation über die Spannweite

2.4 Allgemeines Wirbelgitterverfahren

- Diskretisierung:
 - Der Tragflügel wird in Spannweitenrichtung in 50 Trapeze und in Richtung der Flügeltiefe in 10 Trapeze unterteilt.
 - Dabei wird eine ungleichmäßige cos-Verteilung gewählt.
- GNU Octave-Skript:
 - Die Berechnung der Zirkulation und der Druckverteilung wird mithilfe von Mefisto durchgeführt.
 - Die Zirkulationsverteilung in Spannweitenrichtung ergibt sich durch Summation der Zirkulation in Richtung der Flügeltiefe.

2.4 Allgemeines Wirbelgitterverfahren

```
# Beispiel: Geschränkter und gepfeilter Tragflügel
#           Allgemeines Wirbelgitterverfahren
# -----

file = mfilename();
fid  = fopen([file, ".res"], "wt");

# Daten

nx = 10;           % Anzahl der Trapeze in x-Richtung
ny = 50;          % Anzahl der Trapeze in y-Richtung

b  =      15;      % Spannweite in m
c1 =      1.5;     % Flügeltiefe an der Flügelwurzel in m
c2 = 0.9 * c1;    % Flügeltiefe an der Flügelspitze in m
a1 =      1;      % Einstellwinkel an der Flügelwurzel
a2 =      0;      % Einstellwinkel an der Flügelspitze
a  =      5;      % Anstellwinkel
```

2.4 Allgemeines Wirbelgitterverfahren

```
# Modell

model = struct("type", "aero", "subtype", "vlm");

% Punkte auf der Flügelvorderkante

model.points = struct("id", {1, 2, 3},
                    "coord", {[0, -0.5 * b, 0], ...
                              [0, 0, 0], ...
                              [0, 0.5 * b, 0]});

% Auftriebsflächen

model.ls = struct("id", {1, 2},
                 "points", {[1, 2], [2, 3]},
                 "chord", {[ca, ci], [ci, ca]},
                 "nx", nx,
                 "ny", 0.5 * ny,
                 "typey", {"<cos", "cos>"},
                 "alpha", {[aa, ai], [ai, aa]});
```

2.4 Allgemeines Wirbelgitterverfahren

```
% Konfiguration
model.config = struct("name", "Config. 1", "alpha", a);

# Analyse

wing = mfs_new(fid, model);
mfs_export([file, ".msh"], "msh", wing, "mesh");
wing = mfs_statresp(wing);
wing = mfs_results(wing, "statresp", "panel");

# Zirkulationsverteilung

y = zeros(1, ny);

for n = 1 : ny / 2
    n1 = n + ny / 2;
    [x, gl, y(n)] = ...
        mfs_xydata(wing, "statresp", "vortex", 1, n);
    [x, gr, y(n1)] = ...
        mfs_xydata(wing, "statresp", "vortex", 2, n);
end
```

2.4 Allgemeines Wirbelgitterverfahren

```

        G(n) = sum(gl);    % Linker Flügel (y < 0)
        G(n1) = sum(gr);  % Rechter Flügel (y > 0)
    end

# Druckbeiwert

p = zeros(nx, ny); X = zeros(nx, ny); Y = zeros(nx, ny);

for n = 1 : ny / 2
    n1 = n + ny / 2;
    [X(:, n), p(:, n), yp] = ...
        mfs_xydata(wing, "statresp", "pressure", 1, n);
    Y(:, n) = yp(ones(nx, 1));
    [X(:, n1), p(:, n1), yp] = ...
        mfs_xydata(wing, "statresp", "pressure", 2, n);
    Y(:, n1) = yp(ones(nx, 1));
end

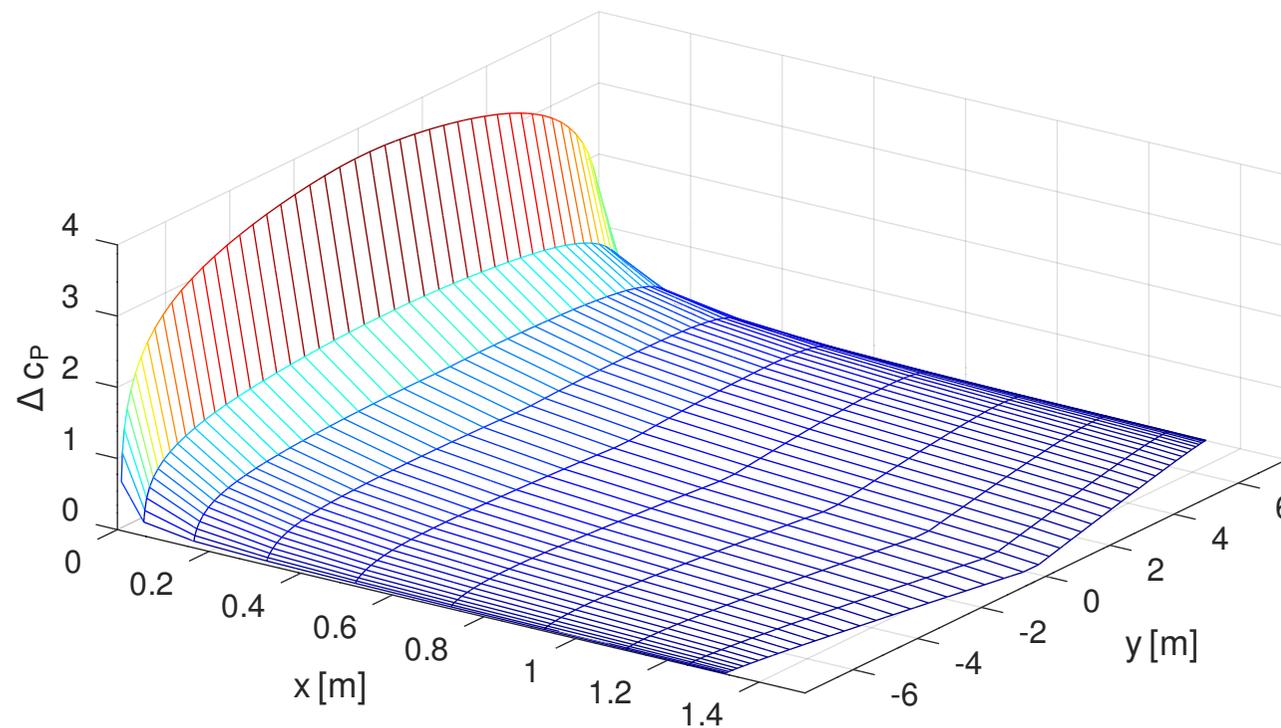
fclose(fid);

...

```

2.4 Allgemeines Wirbelgitterverfahren

- Ergebnisse:
 - Druckverteilung:



2.4 Allgemeines Wirbelgitterverfahren

- Verlauf der Zirkulation:

