

CoolingGen

Eine Software zur Erstellung von Kühlungsgeometrien

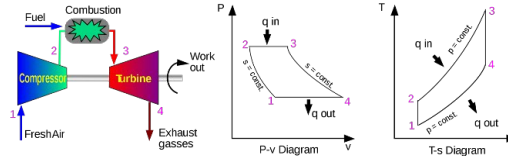
Julian Lüken
22. März 2023



Wissen für Morgen



Problemstellung / Kühlung



- ▶ Effizienz der Turbine kann theoretisch durch großen Temperaturgradienten erhöht werden
→ Praktisch strebt man darum hohe Temperaturen in der Brennkammer an
- ▶ **Aber:** Hohe thermische Last der Turbinenschaufeln führt zu starker Abnutzung
→ Kühlung wird benötigt
- ▶ **Aber:** Die Kühlung wiederum nutzt Luftstrom, der nicht für den Antrieb benutzt werden kann
→ Negativer Einfluss auf Wirkungsgrad

→ **Kühlungsdesign ist Filigranarbeit!**



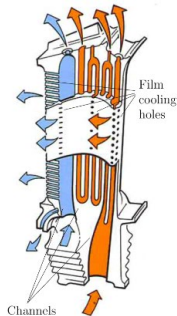
Problemstellung / Kühlung

Kühlungsdesign setzt sich u.a. aus den folgenden Aspekten zusammen:

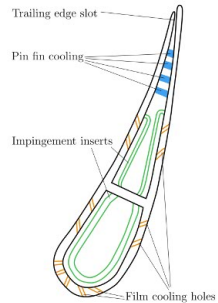
- ▶ Auswahl/Konditionierung der Kühlluft
- ▶ Auswahl der verwendeten Werkstoffe
- ▶ **Gestaltung der Kühlstrukturen**

Diese **Kühlstrukturen** beinhalten

- ▶ **Kühlkanäle** ("cooling channels"),
- ▶ **Prallkühlung** ("impingement cooling"),
- ▶ Rippen ("rib turbulators"),
- ▶ **Filmkühlung** ("film cooling"),
- ▶ **Pin-fins**,
- ▶ und **Ausblasungsschlitze** ("trailing edge slots").



(a) Rotor.



(b) Stator im Profil.

Problemstellung / Geometrieerzeugung

Mit CAD-Software lassen sich solche Strukturen erstellen. Leider ist der Prozess zeitaufwendig und schwierig.

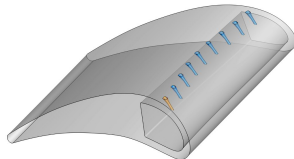
- ▶ Parametrische Werkzeuge innerhalb herkömmlicher CAD Software bieten meistens nur eine semantische Schnittstelle für einfache Strukturen (z.B. Zylinder, Quader, Kegel), die sich allerdings beliebig miteinander kombinieren lassen (z.B. Verschneiden, Vereinen).
 - ▶ Durch die Erstellung von Freiformkörpern gibt es gar keine parametrische Schnittstelle zur "mechanischen Realität". Dies beeinträchtigt die Möglichkeit zur einfachen Modifikation.
- In beiden Fällen entsteht ein Modell, welches schwierig zu erstellen/modifizieren ist.

Unser Lösungsansatz: Wir erstellen uns eine eigene CAD-Software, die für uns die speziellen Kühlstrukturen mithilfe von bedeutungsträchtigen Parametern erstellt. Damit geht die Erstellung und Modifikation von Kühlgeometrien einfacher und schneller.

```

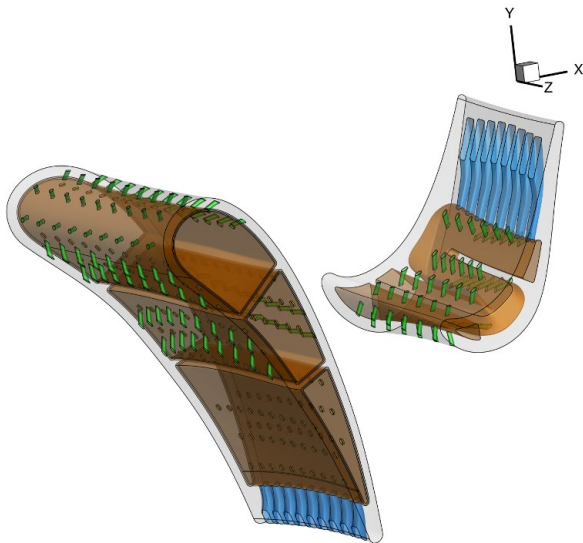
1 <?xml version="1.0"?>
2 <FilmCooling>
3   <Row>
4     <NumHoles>9</NumHoles>
5     <HoleGeometry>
6       <Type>shaped</Type>
7       <Diameter>0.0007</Diameter>
8       <InjectionAngle>45</InjectionAngle>
9       <CompoundAngle>15</CompoundAngle>
10      <Transition>0.4</Transition>
11      <LaidbackAngle>7</LaidbackAngle>
12      <FanShapeAngle>7</FanShapeAngle>
13    </HoleGeometry>
14    <Location>
15      <Position>PressureSide</Position>
16      <uBase>0.12</uBase>
17      <vLowerBound>0.1</vLowerBound>
18      <vUpperBound>0.9</vUpperBound>
19    </Location>
20    <Distribution>
21      <Amplitude>0</Amplitude>
22      <Frequency>0.5</Frequency>
23      <Shift>1</Shift>
24    </Distribution>
25  </Row>
26 </FilmCooling>

```



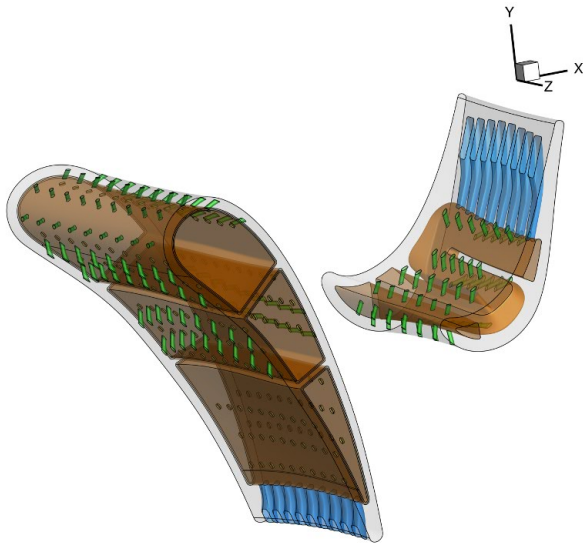
Geometrien / Überblick

- ☐ Kühlkanäle
- ☐ Filmkühlung
- ☐ Prallkühlung
- ☐ Ausblasungsschlitze
- ☐ Pin-fins



Geometrien / Überblick

- ➔ Kühlkanäle
- Filmkühlung
- Prallkühlung
- Ausblasungsschlitze
- Pin-fins



Geometrien / Kanäle

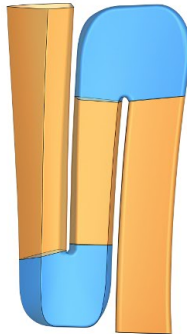
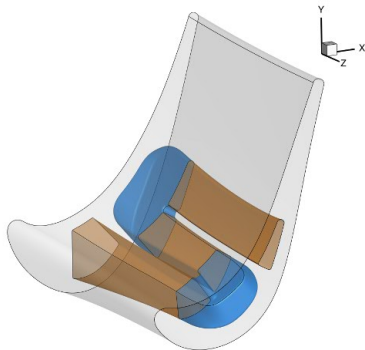
Bei der Erstellung von **Kühlkanälen** unterscheiden wir in CoolingGen zwischen zwei Teilstrukturen:

1. Kammern

Kammern ermöglichen dem Fluid, die Schaufel in radialer Richtung zu durchqueren (orange)

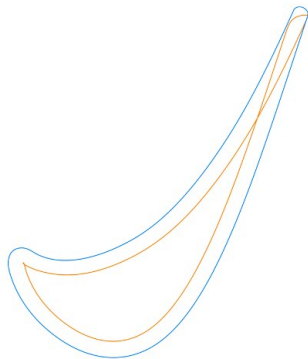
2. Umkehrungen

Umkehrungen ermöglichen den Transport des Fluids von einer Kammer in die nächste (blau)

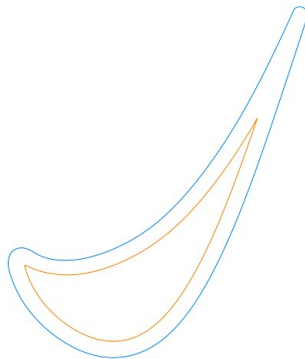


Geometrien / Kanäle / Kammern

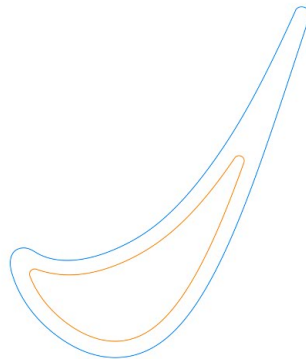
Zum Erstellen der Kammern begeben wir uns vom Standardkoordinatensystem (x, y, z) in das $(m, r\theta)$ **Stromlinien-Koordinatensystem**. Hier sind die isoradialen Profilkurven der Schaufeln auf kanonische Weise 2D, was viele Operationen vereinfacht.



(a) Profil und **Offset-Kurve**



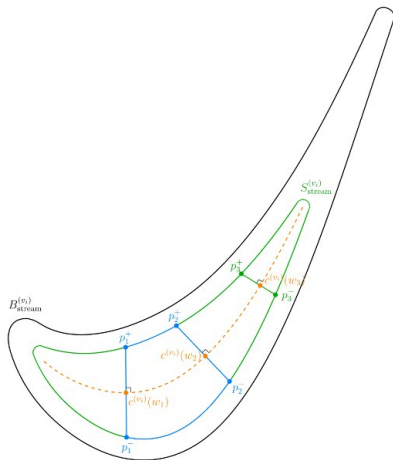
(b) **Getrimmte** Offset-Kurve



(c) ... mit **Fillets**!

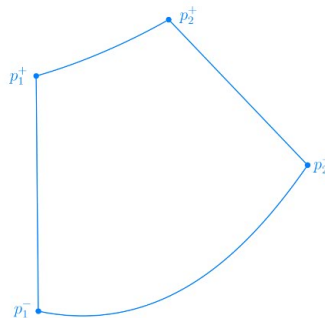


Geometrien / Kanäle / Kammern



(a) Partitionierung des Profils.

Entlang der **Skelettlinie** kann man nun Wand-positionen und -winkel festlegen, um mehrere Kammern zu erhalten.

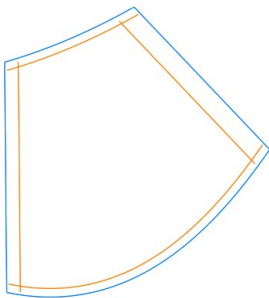


(b) Eine resultierende Partition.

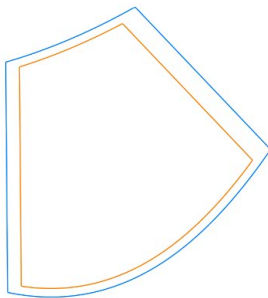


Geometrien / Kanäle / Kammern

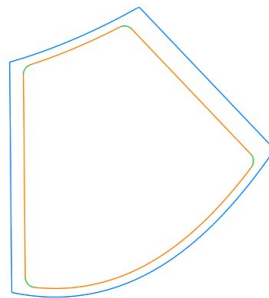
Wie vorhin:



(a) **Offset-Kurven** bilden,



(b) an Schnittpunkten **trimmen**,



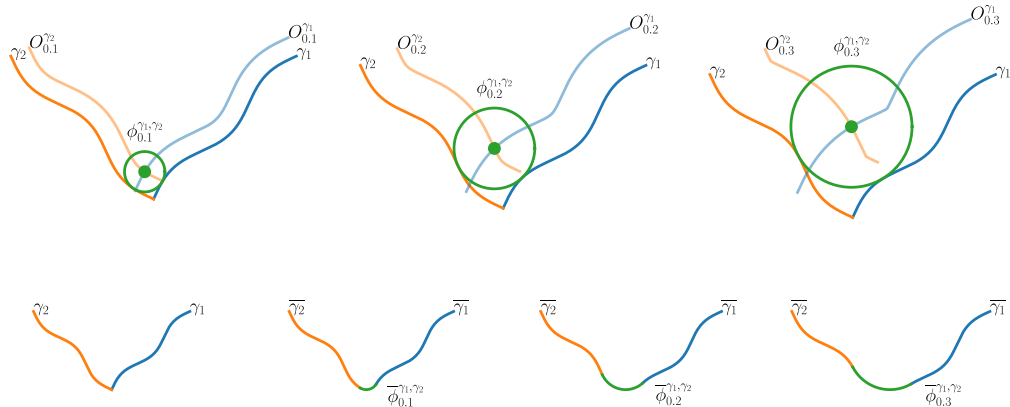
(c) und **Fillets** hinzufügen.

So erhalten wir ein **Kammerprofil**.



Geometrien / Kanäle / Kammern / Fillets

Wie kriegt man **Fillets** mit Radius r ? Wir finden den Schnittpunkt der r -**Offset-Kurven**:



Geometrien / Kanäle / Kammern / Offset-Kurven

Dabei ist die **r -Offset-Kurve** von der Kurve γ definiert als

$$O_r^\gamma(t) := \gamma(t) + rN^\gamma(t),$$

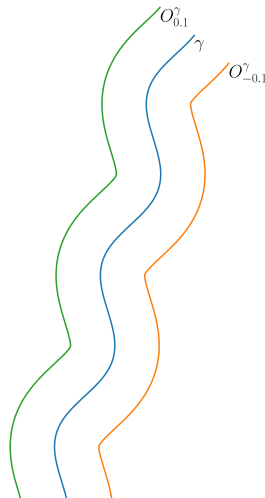
wobei

$$N^\gamma(t) := \frac{\nabla\gamma(t)^\perp}{\|\nabla\gamma(t)\|}$$

der Normalenvektor und

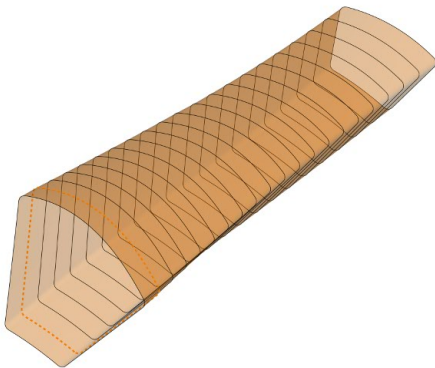
$$\nabla\gamma(t)^\perp = \left(\frac{dx}{dt}(t), \frac{dy}{dt}(t) \right)^\perp := \left(-\frac{dy}{dt}(t), \frac{dx}{dt}(t) \right)$$

die linksseitige Orthogonale von γ an der Stelle t ist.

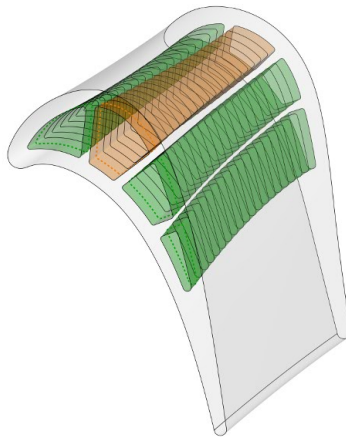


Geometrien / Kanäle / Kammern

Dann transformieren wir die $(m, r\theta)$ **Kammerprofile** ins (x, y, z) System und verbinden sie miteinander.



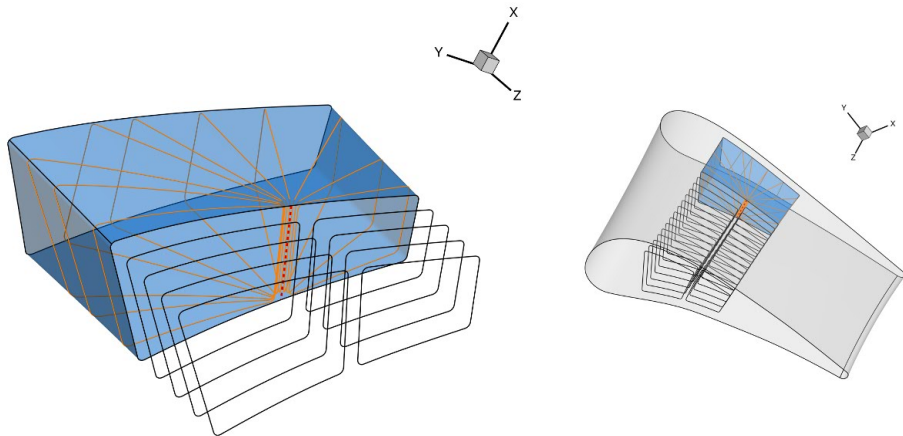
(a) Eine Kammer.



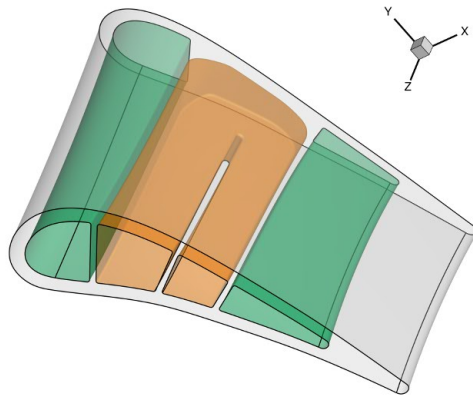
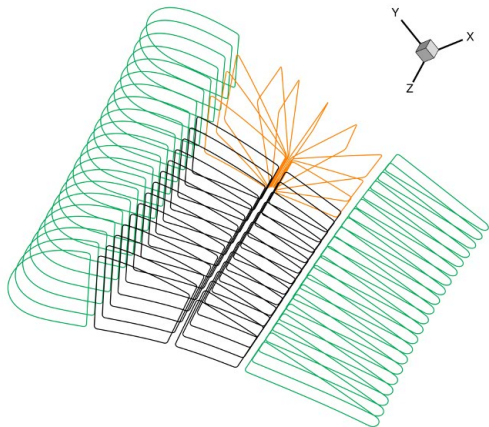
(b) Vier Kammern in der Schaufel.

Geometrien / Kanäle / Umkehrungen

Umkehrungen werden aus den Kammern erstellt:

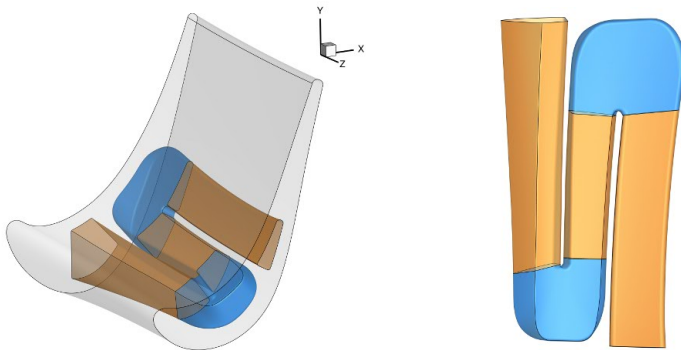


Geometrien / Kanäle / Umkehrungen



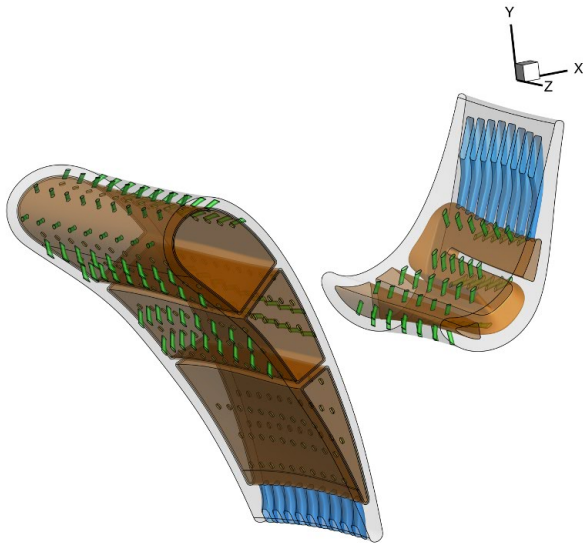
Geometrien / Kanäle

Kammern und Umkehrungen → **Kanäle**



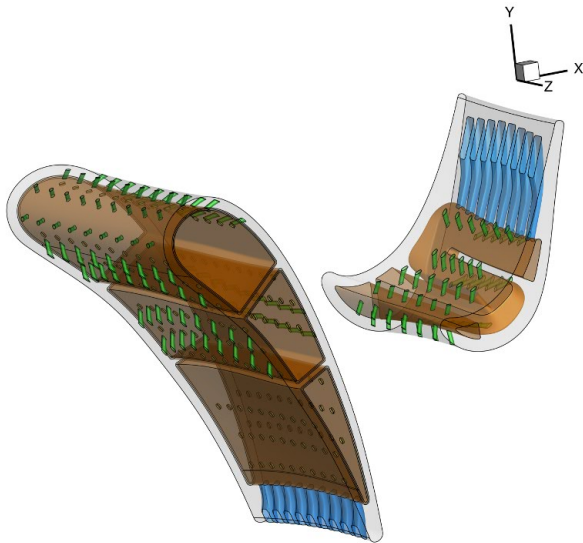
Geometrien / Überblick

- Kühlkanäle
- Filmkühlung
- Prallkühlung
- Ausblasungsschlitze
- Pin-fins

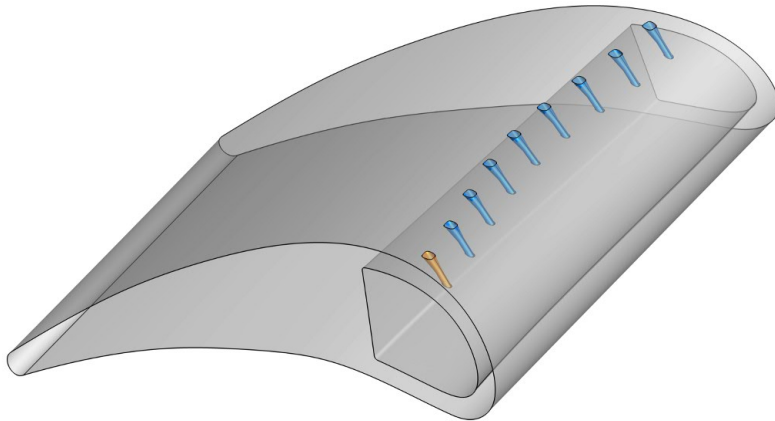


Geometrien / Überblick

- Kühlkanäle
- ✈ Filmkühlung
- Prallkühlung
- Ausblasungsschlitze
- Pin-fins



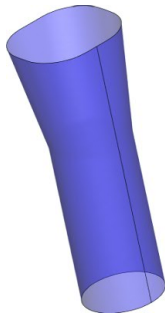
Geometrien / Filmkühlung



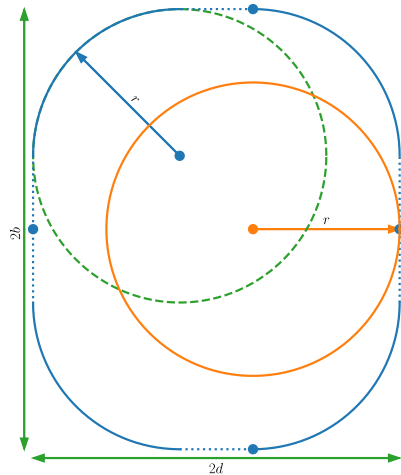
Geometrien / Filmkühlung



(a) Zylindrisch

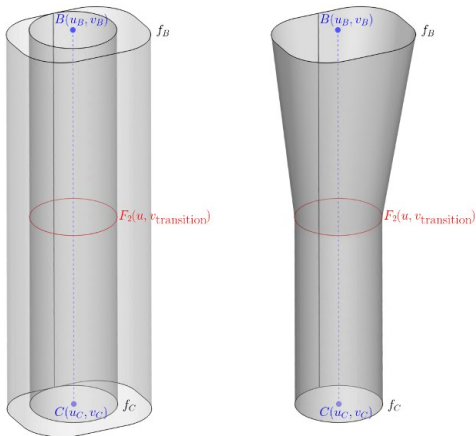


(b) Laid back fan-shaped



(c) Begrenzende Kurven

Geometrien / Filmkühlung

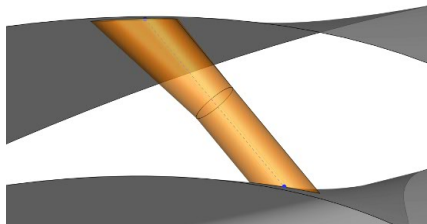
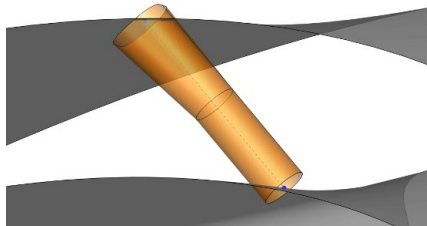


Links: Einbettung der 2D Kurven im 3D Raum entlang einer Strecke zwischen Schaufel B und Kanal C .

Rechts: Linearkombination der resultierenden Körper. $v_{\text{transition}}$ ist ein Eingabeparameter.

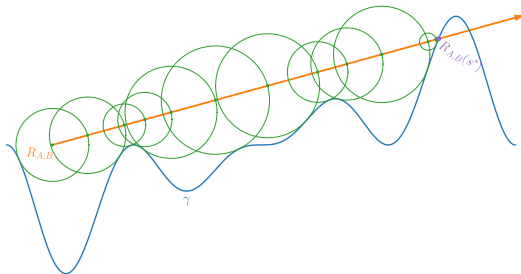


Geometrien / Filmkühlung

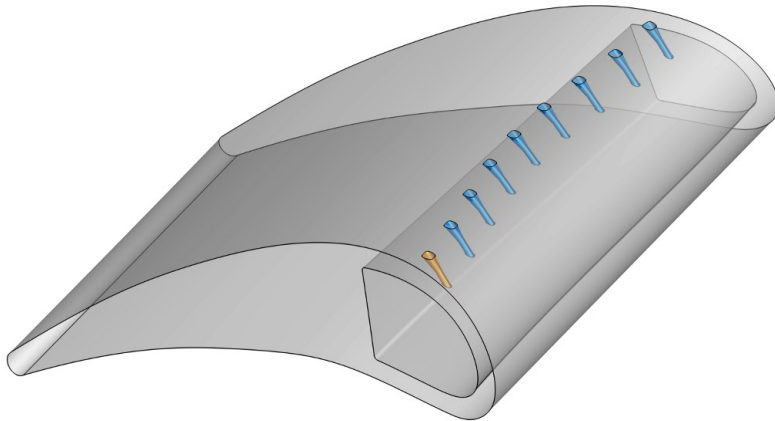


$$F([0, 1]^2) \subset \bigcup_{v_F \in \{0, 1\}} \bigcup_{u_F \in [0, 1]} R_{P, Q-P}([0, \infty))$$

Filmkühlungsbohrungen sind per Konstruktion Teilmengen von Halbgeraden (engl. **rays**). Wir nutzen **ray marching**, um die einzelnen Rays mit den umgebenden Flächen zu schneiden.

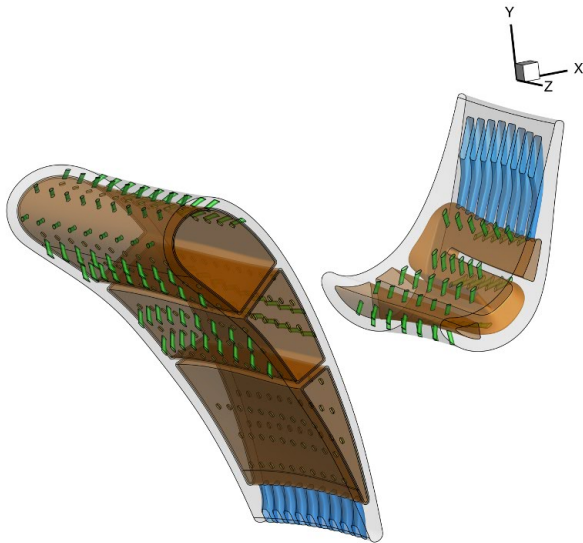


Geometrien / Filmkühlung



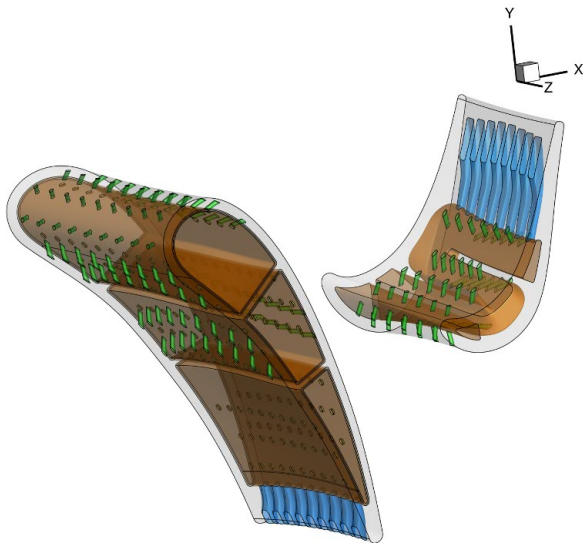
Geometrien / Überblick

- Kühlkanäle
- Filmkühlung
- Prallkühlung
- Ausblasungsschlitze
- Pin-fins

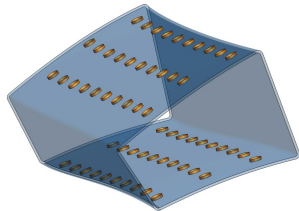
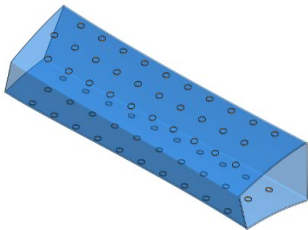
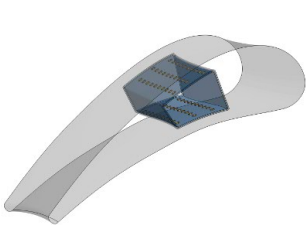


Geometrien / Überblick

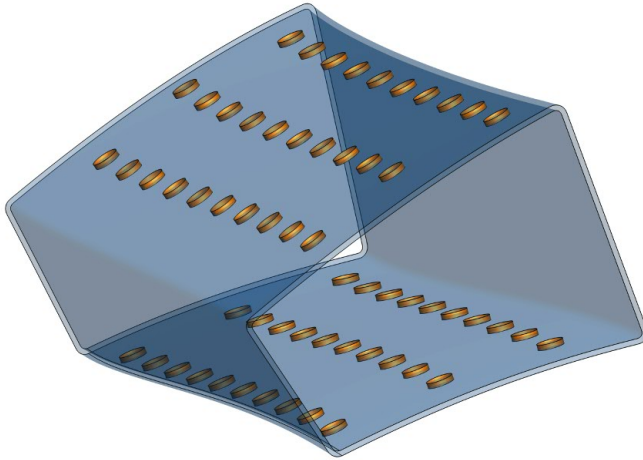
- Kühlkanäle
- Filmkühlung
- ✈ Prallkühlung
- Ausblasungsschlitze
- Pin-fins



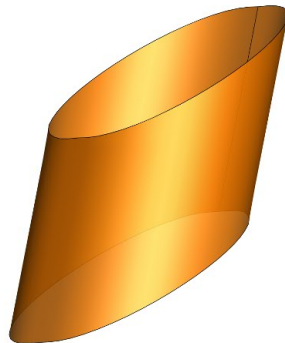
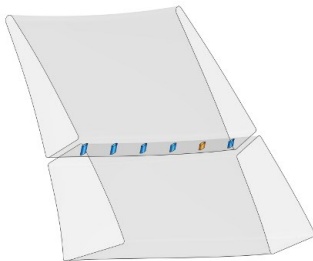
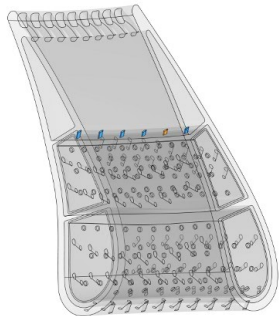
Geometrien / Prallkühlung



Geometrien / Prallkühlung

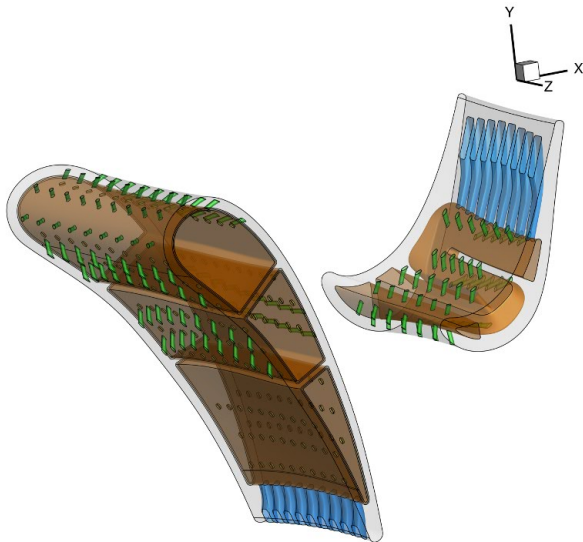


Geometrien / Prallkühlung



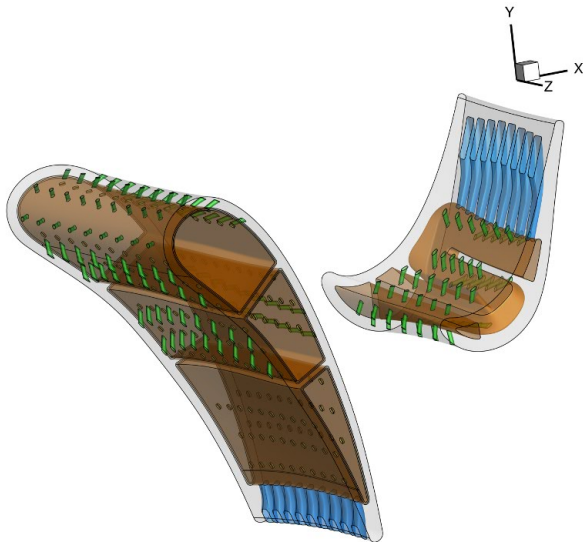
Geometrien / Überblick

- Kühlkanäle
- Filmkühlung
- Prallkühlung
- Ausblasungsschlitze
- Pin-fins

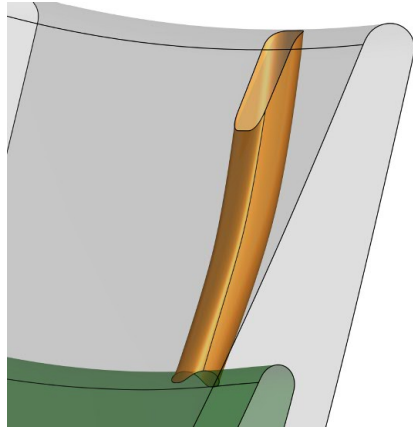
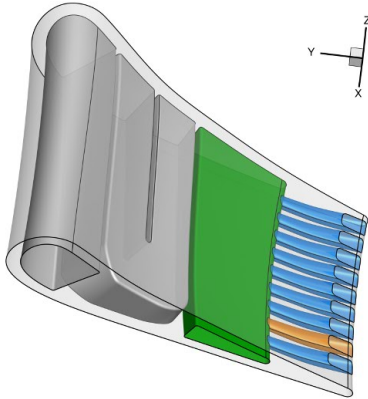


Geometrien / Überblick

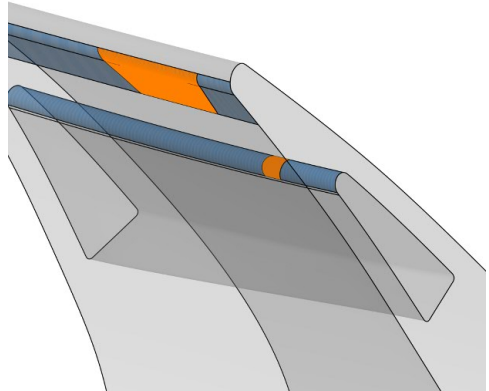
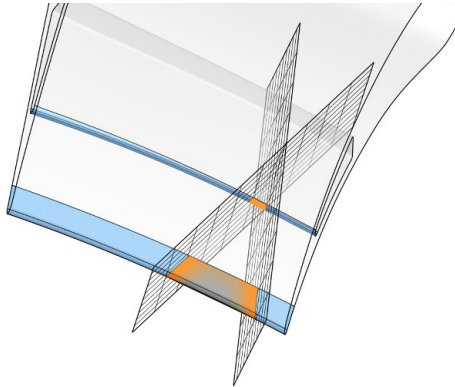
- Kühlkanäle
- Filmkühlung
- Prallkühlung
- ✈ Ausblasungsschlitze
- Pin-fins



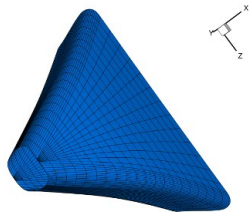
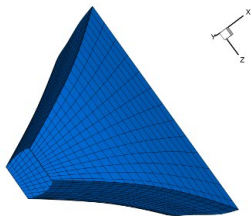
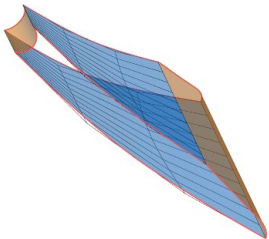
Geometrien / Slots



Geometrien / Slots

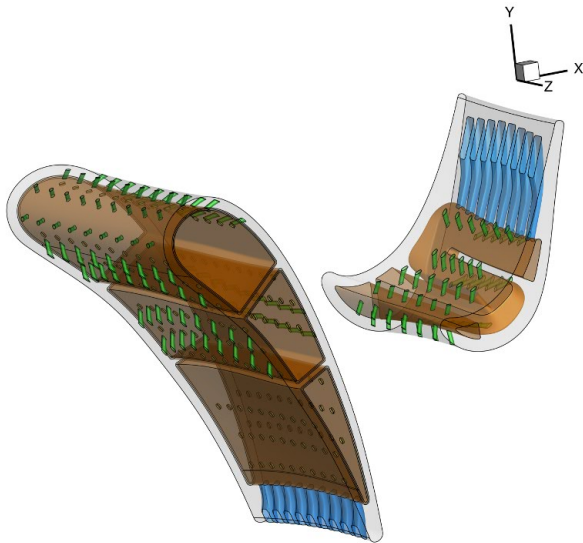


Geometrien / Slots



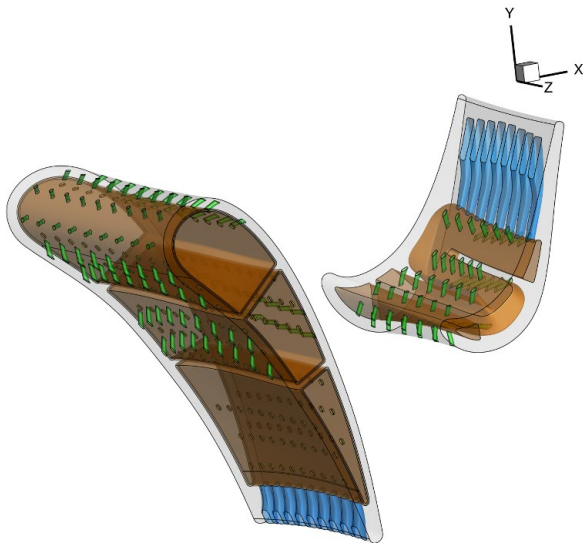
Geometrien / Überblick

- Kühlkanäle
- Filmkühlung
- Prallkühlung
- Ausblasungsschlitze
- Pin-fins

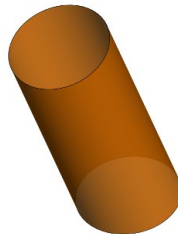
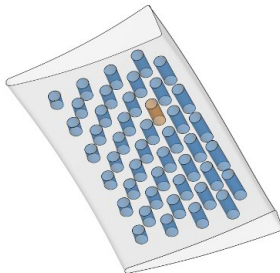
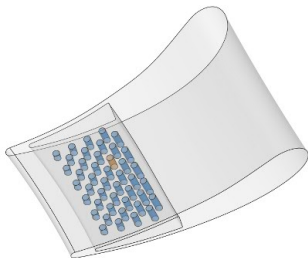


Geometrien / Überblick

- Kühlkanäle
- Filmkühlung
- Prallkühlung
- Ausblasungsschlitze
- ✈ Pin-fins

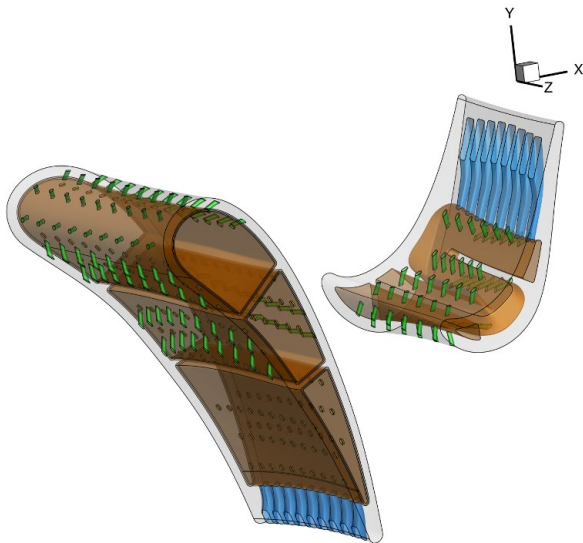


Geometrien / Pin-fins



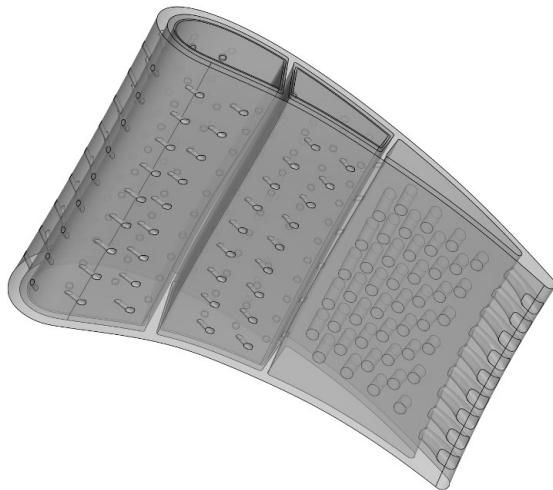
Geometrien / Überblick

- Kühlkanäle
- Filmkühlung
- Prallkühlung
- Ausblasungsschlitze
- Pin-fins

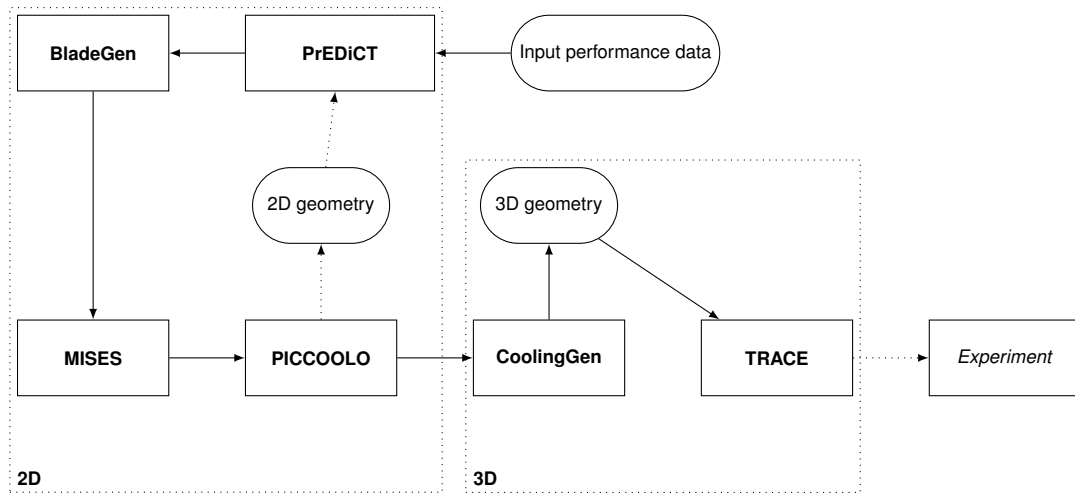


Nutzung

- Prozesskette
- Vollkörpererzeugung
- CFD mit TRACE

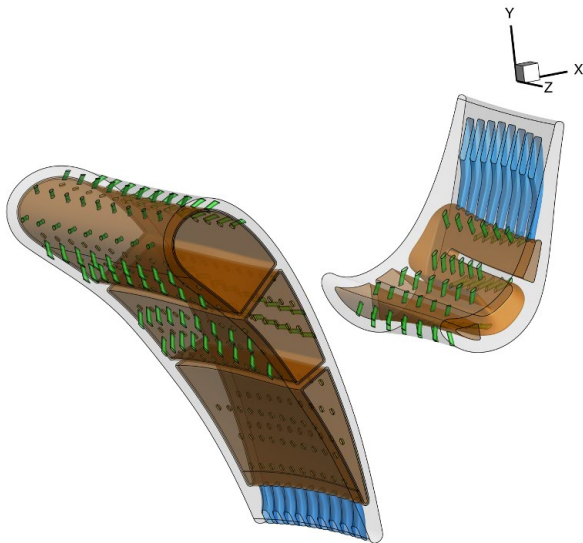


Prozesskette

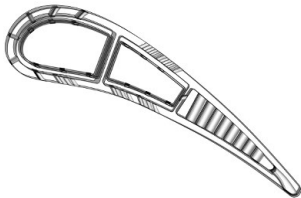


Vollkörper aus Flächen

Bisher erzeugte Geometrien liegen nur als **Flächen** vor. Diese Flächen repräsentieren jedoch **Vollkörper**, die wir mithilfe von **OpenCASCADE Technology SDK** aus unseren Flächen erzeugen.



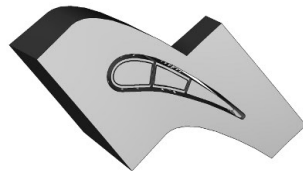
Vollkörper aus Flächen



(a) Oberflächen



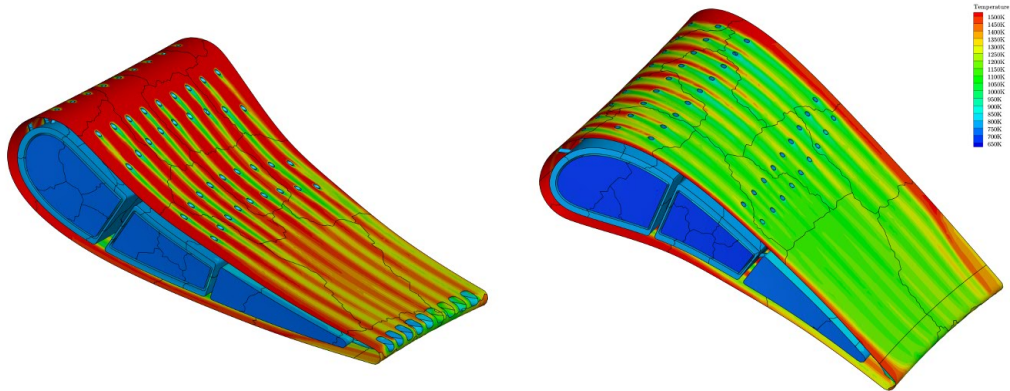
(b) Festkörpervolumen



(c) Fluidvolumen



CFD mit TRACE



Fragen/Anmerkungen

Fragen? Anmerkungen?



Ende

Danke!

