

# CoolingGen

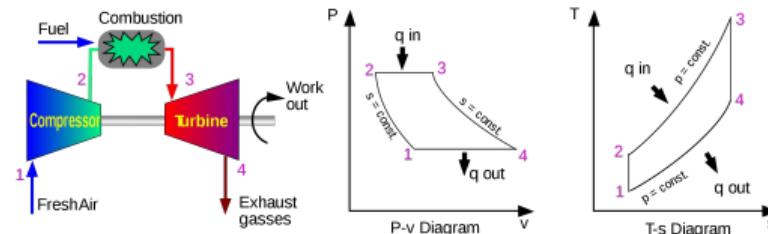
Eine Software zur Erstellung von Kühlungsgeometrien

Julian Lüken

22. März 2023



## 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!**

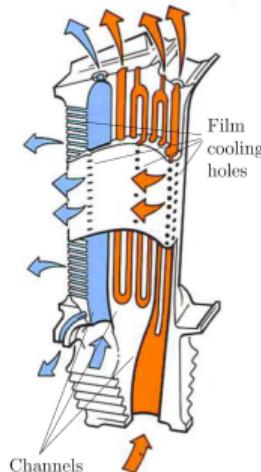
## Problemstellung / Kühlung

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

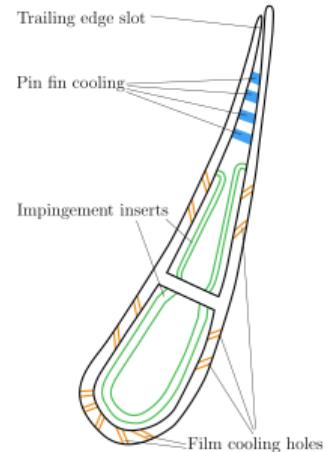
- ▶ Auswahl/Konditionierung der Kühlluft
- ▶ Auswahl der verwendeten Werkstoffe
- ▶ **Gestaltung der Kühlstrukturen**

Diese **Kühlstrukturen** beinhalten

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



(a) Rotor.



(b) Stator im Profil.

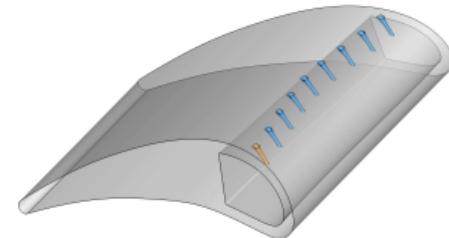
## Problemstellung / Geometrieerzeugung

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.

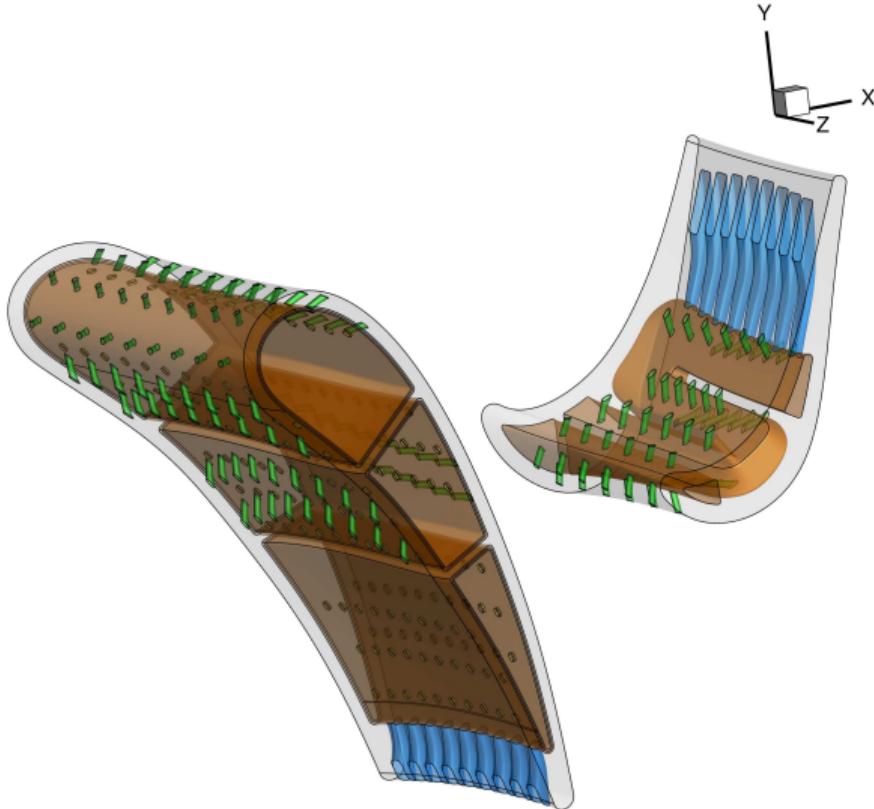
**Unser Lösungsansatz:** Wir erstellen uns eine eigene CAD-Software, die für uns die speziellen Kühlstrukturen mithilfe von bedeutungsträchtigen Parametern erstellt. Damit geht die Erstellung und Modifikation von Kühlungsgeometrien einfacher und schneller.

```
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>
```



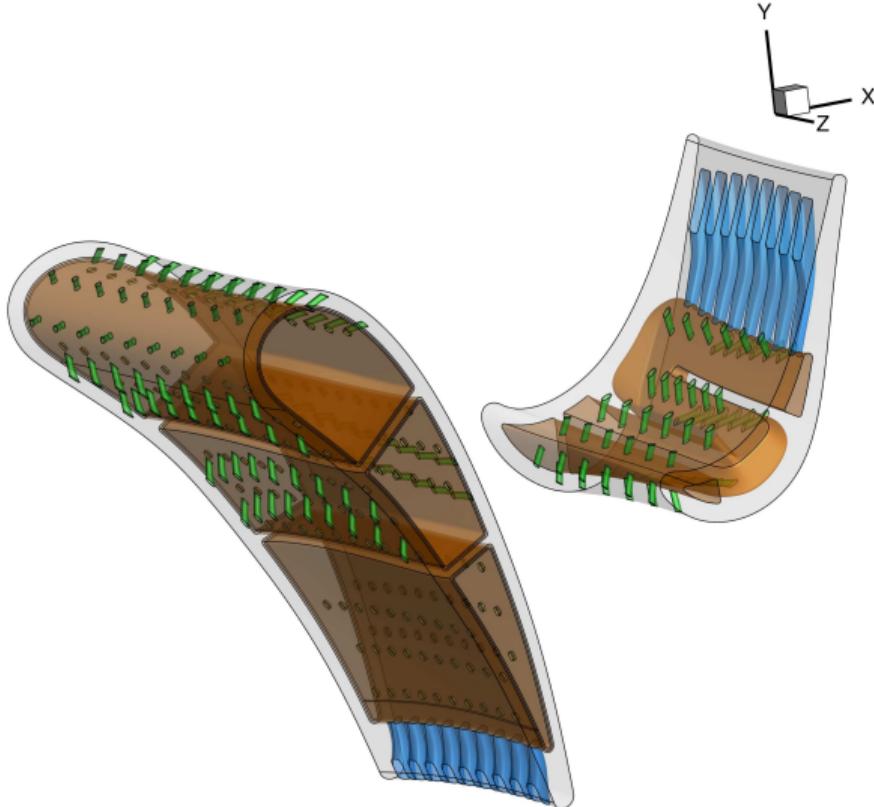
## Geometrien / Überblick

- Kühlkanäle
- Filmkühlung
- Prallkühlung
- Ausblasungsschlitz
- Pin-fins



## Geometrien / Überblick

- Kühlkanäle
- Filmkühlung
- Prallkühlung
- Ausblasungsschlitz
- Pin-fins



## Geometrien / Kanäle

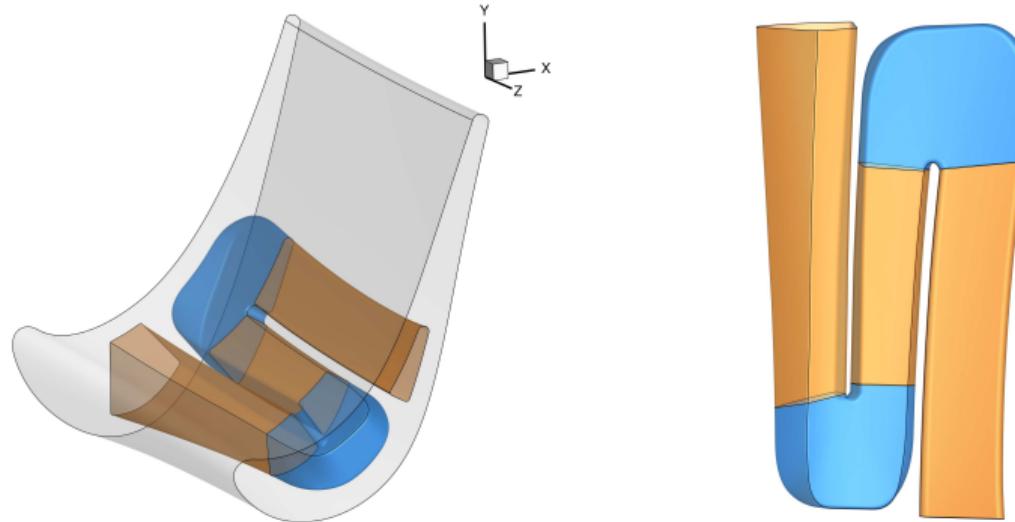
Bei der Erstellung von **Kühlkanälen** unterscheiden wir in CoolingGen zwischen zwei Teilstrukturen:

### 1. Kammern

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

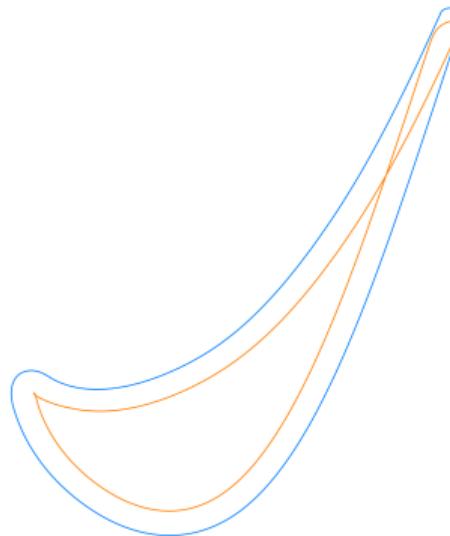
### 2. Umkehrungen

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

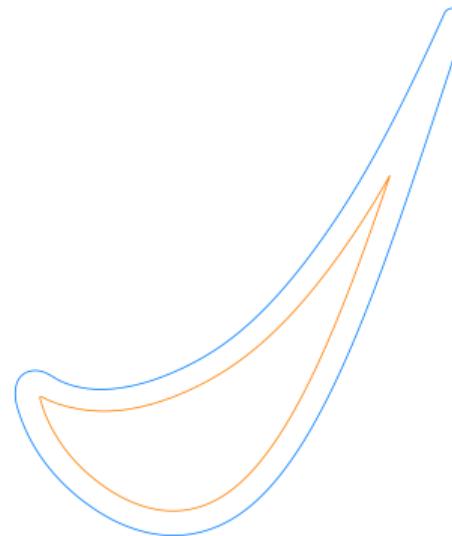


## Geometrien / Kanäle / Kammern

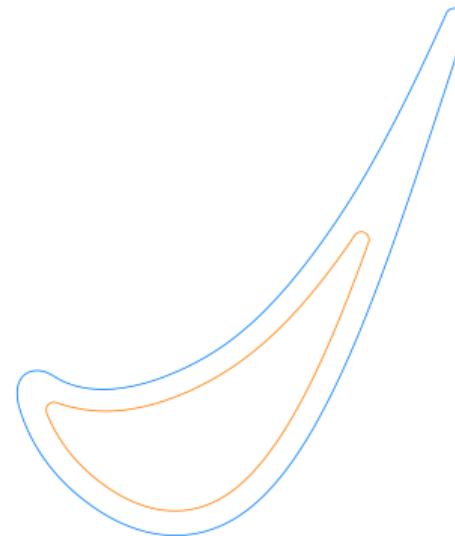
Zum Erstellen der Kammern begeben wir uns vom Standardkoordinatensystem  $(x, y, z)$  in das  $(m, r\theta)$  **Stromlinien-Koordinatensystem**. Hier sind die isoradialen Profilkurven der Schaufeln auf kanonische Weise 2D, was viele Operationen vereinfacht.



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

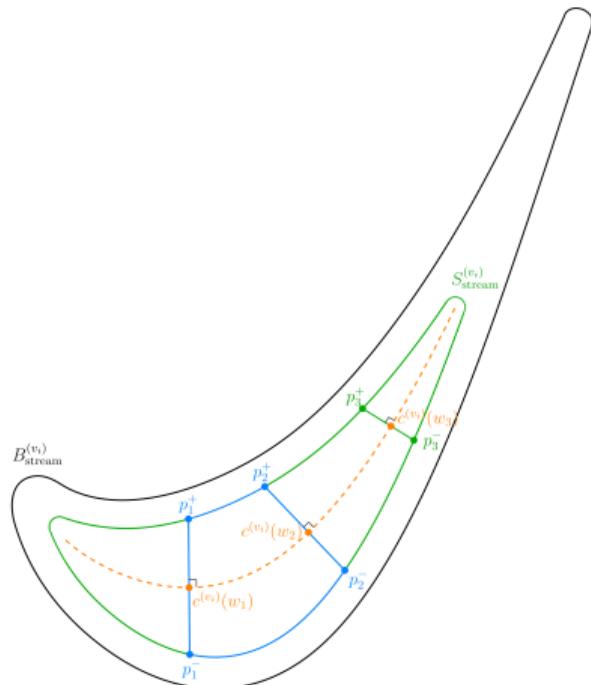


(b) **Getrimmte Offset-Kurve**



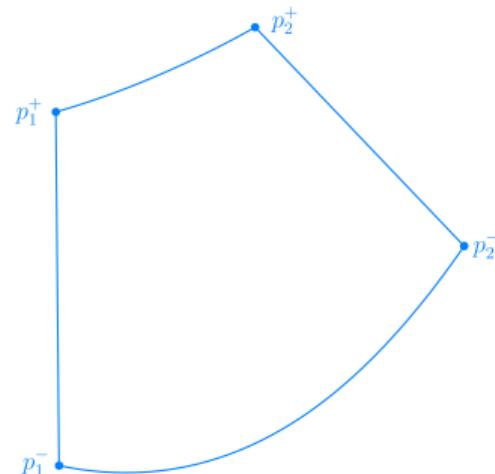
(c) ... mit **Fillets!**

# Geometrien / Kanäle / Kammern



(a) Partitionierung des Profils.

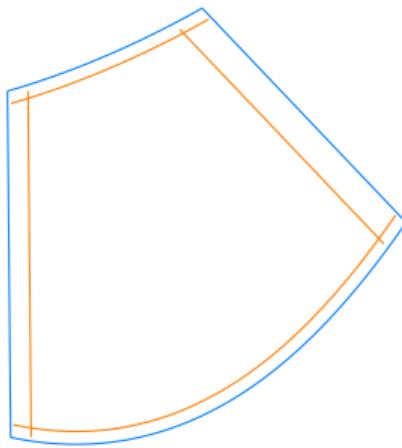
Entlang der **Skeletlinie** kann man nun Wand-positionen und -winkel festlegen, um mehrere Kammern zu erhalten.



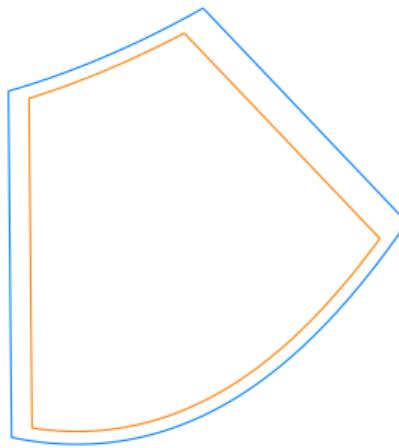
(b) Eine resultierende Partition.

## Geometrien / Kanäle / Kammern

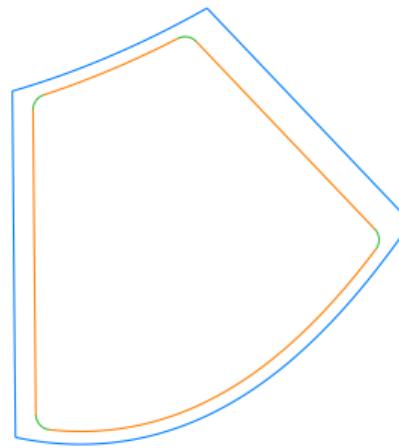
Wie vorhin:



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



(b) an Schnittpunkten **trimmen**,

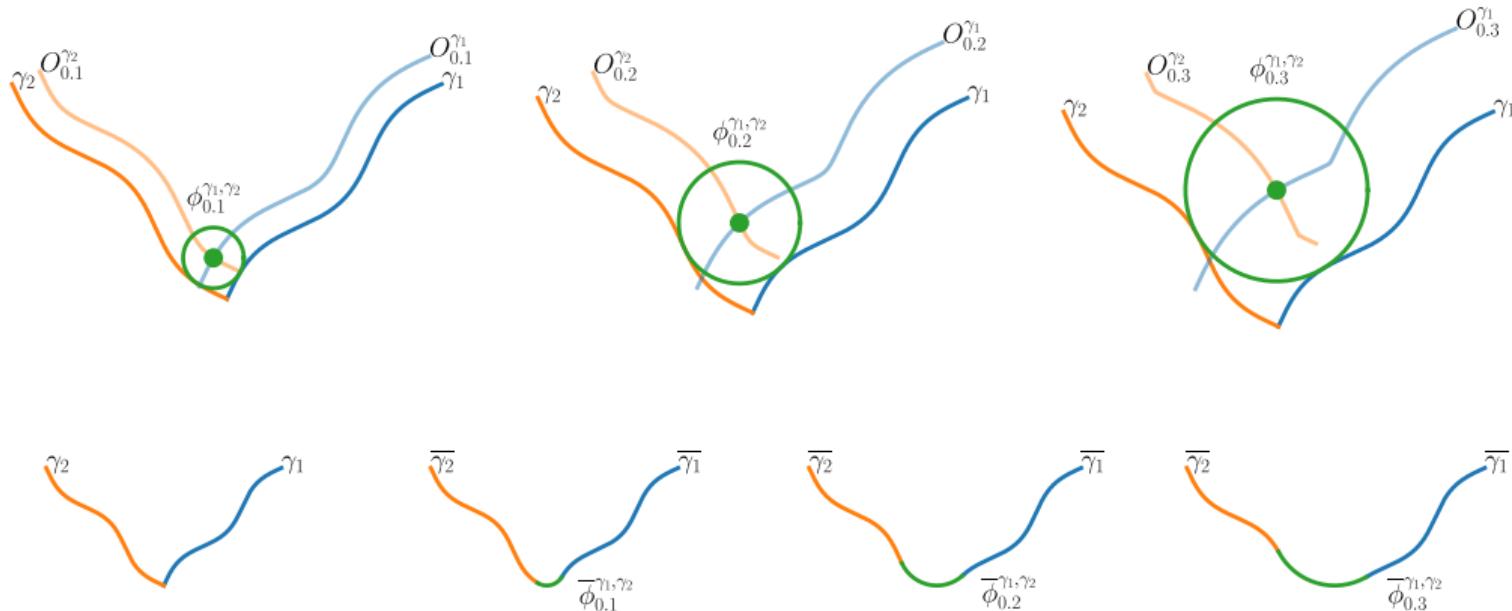


(c) und **Fillets** hinzufügen.

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  $\gamma$  definiert als

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

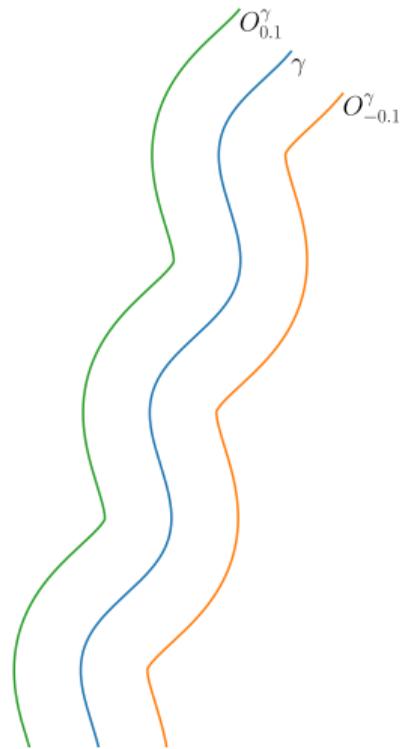
wobei

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

der Normalenvektor und

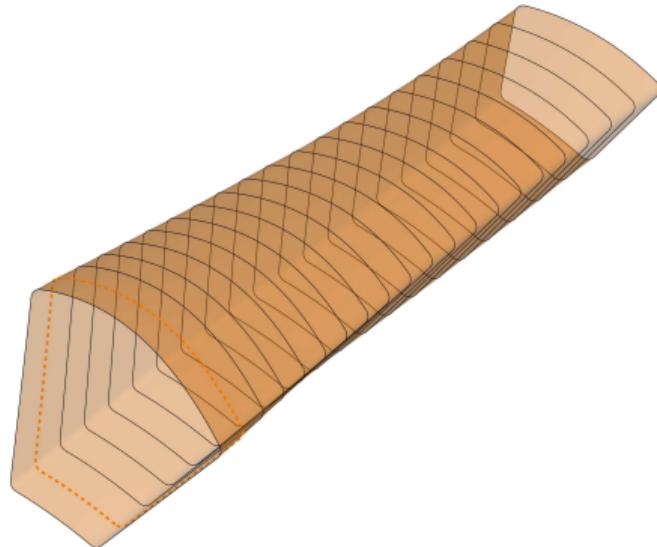
$$\nabla\gamma(t)^\perp = \left( \frac{dx}{dt}(t), \frac{dy}{dt}(t) \right)^\perp := \left( -\frac{dy}{dt}(t), \frac{dx}{dt}(t) \right)$$

die linksseitige Orthogonale von  $\gamma$  an der Stelle  $t$  ist.

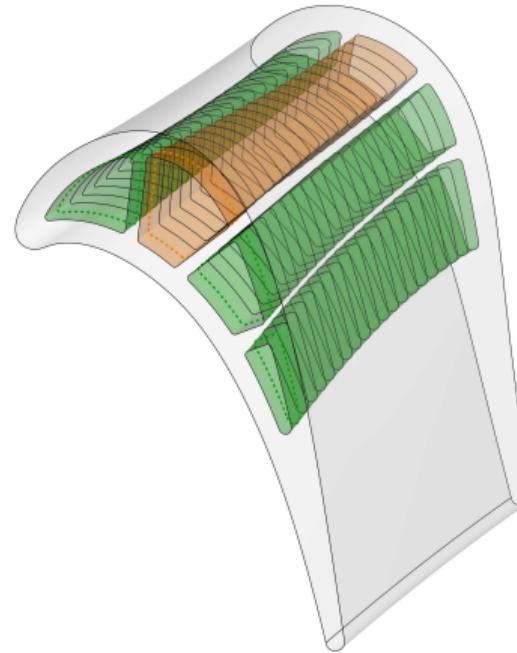


## Geometrien / Kanäle / Kammern

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



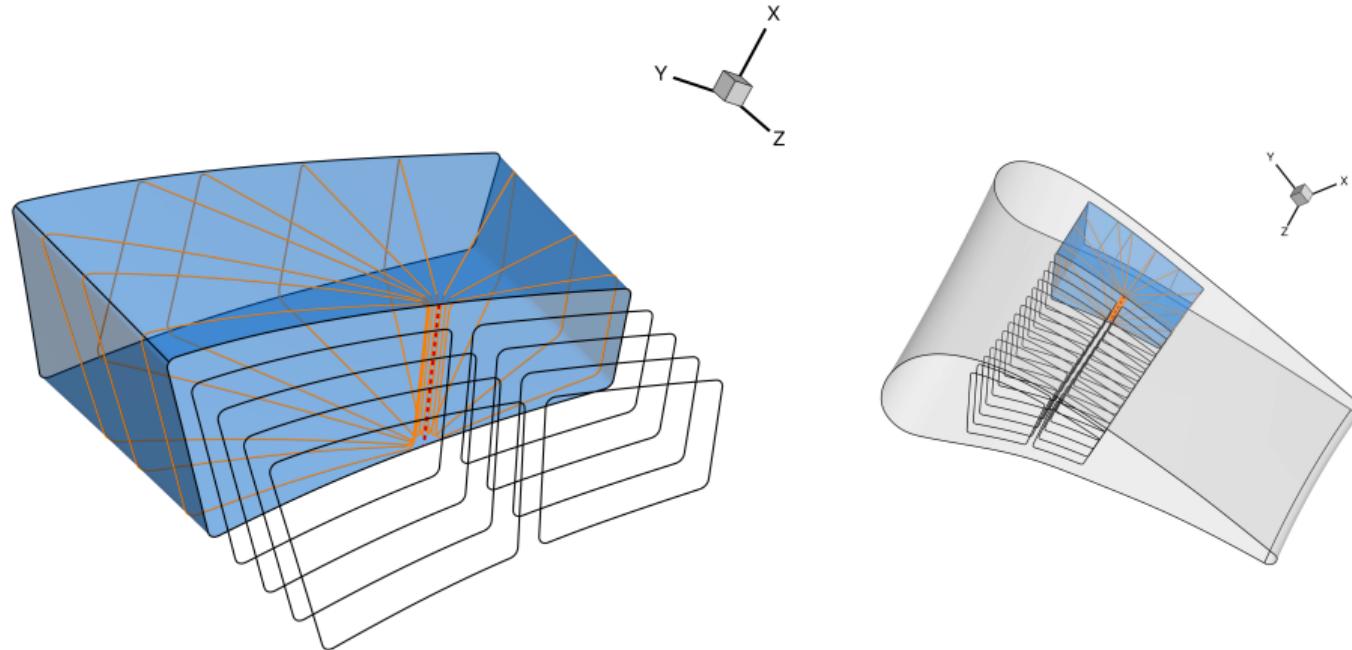
(a) Eine Kammer.



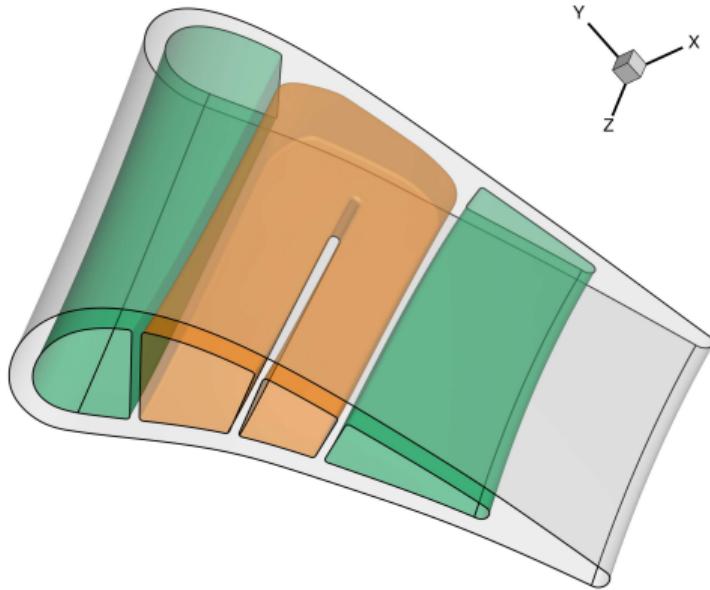
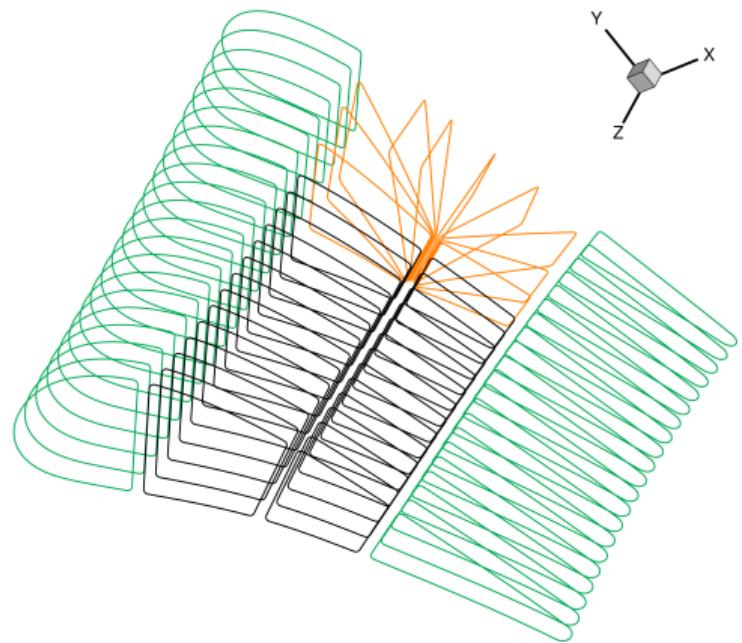
(b) Vier Kammern in der Schaufel.

## Geometrien / Kanäle / Umkehrungen

**Umkehrungen** werden aus den Kammern erstellt:

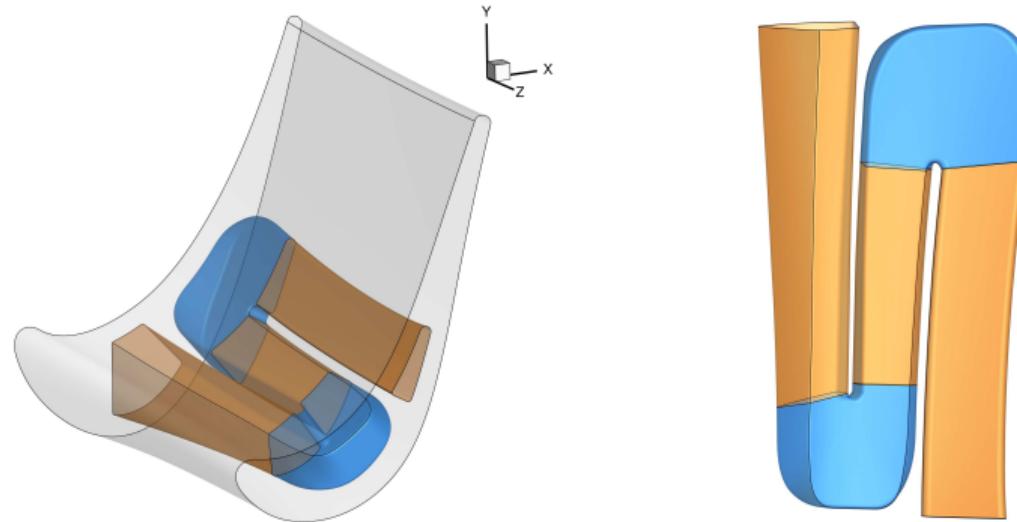


## Geometrien / Kanäle / Umkehrungen



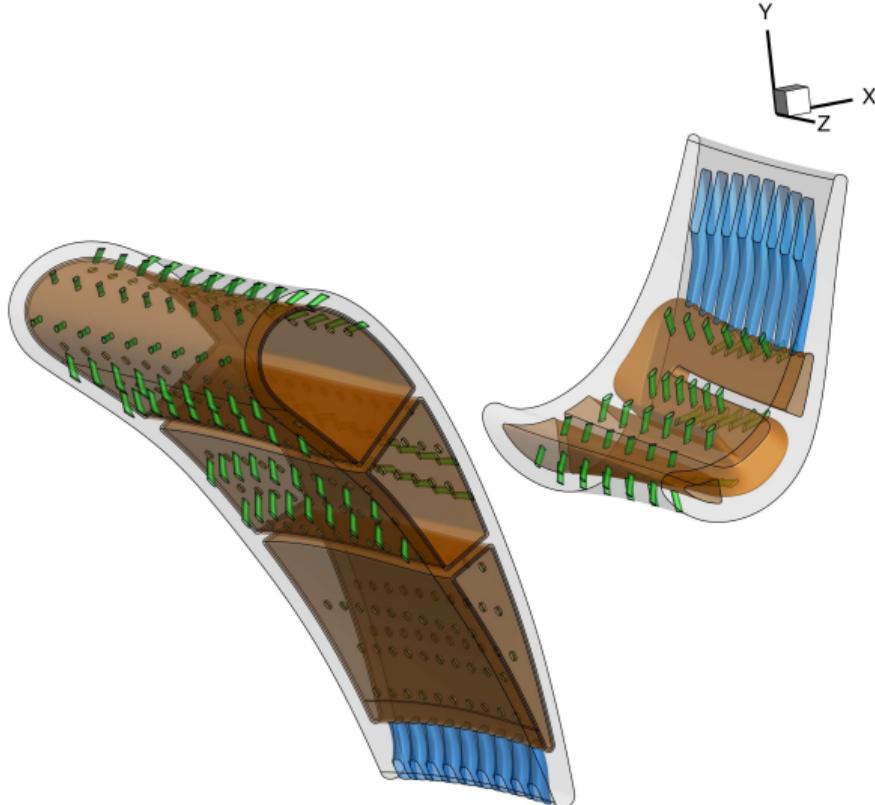
## Geometrien / Kanäle

Kammern und Umkehrungen → **Kanäle**



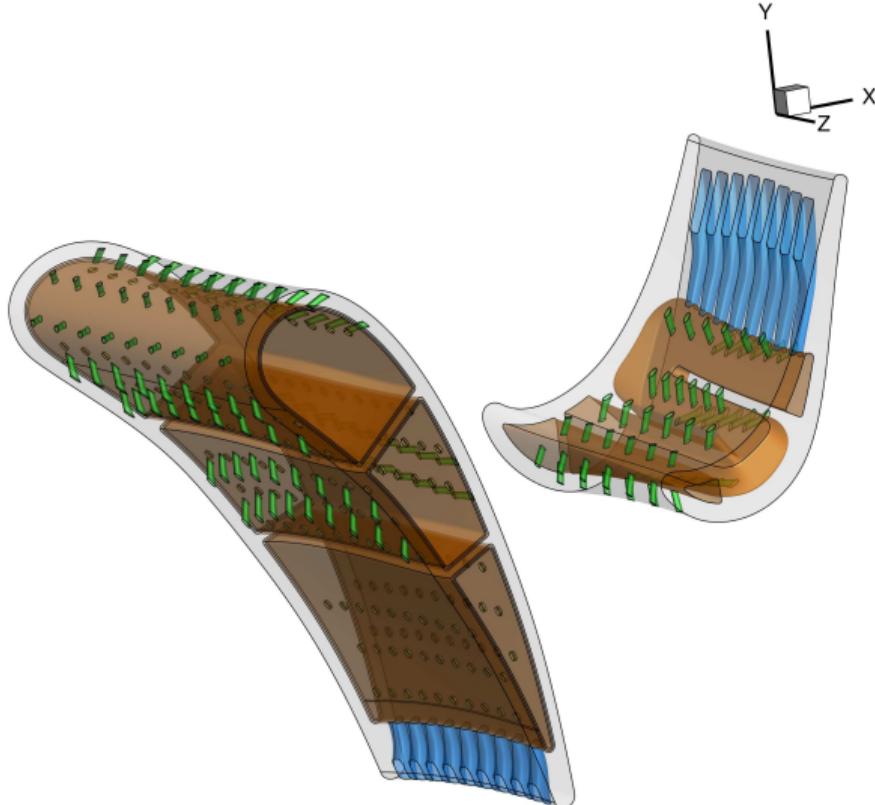
## Geometrien / Überblick

- Kühlkanäle
- Filmkühlung
- Prallkühlung
- Ausblasungsschlitz
- Pin-fins

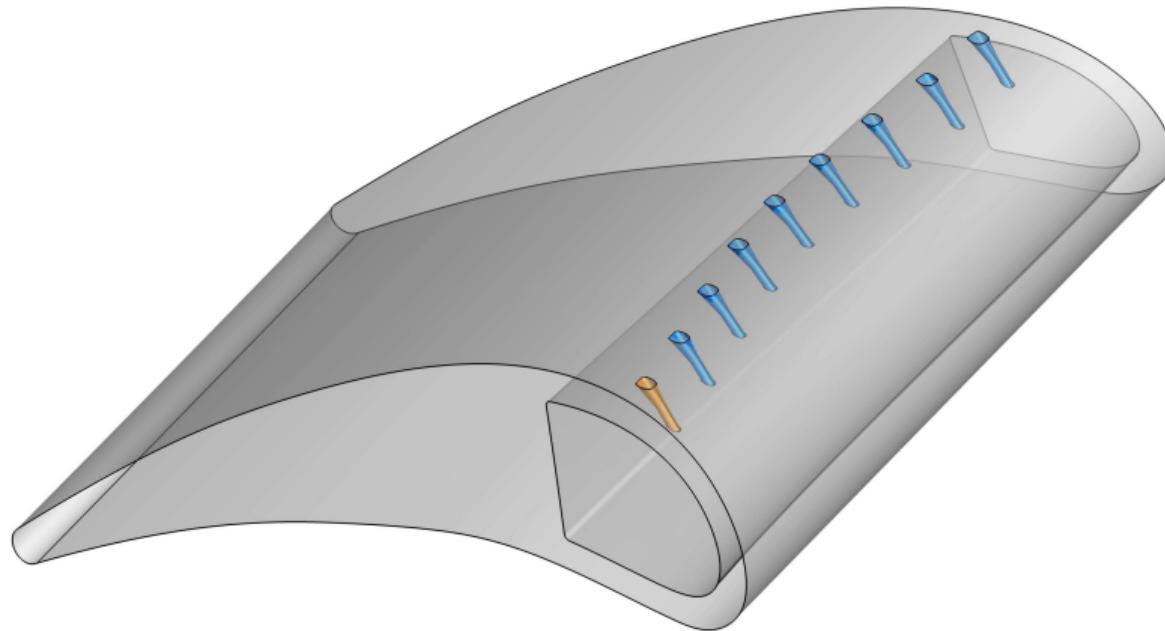


## Geometrien / Überblick

- Kühlkanäle
- ↗ Filmkühlung
- Prallkühlung
- Ausblasungsschlitz
- Pin-fins



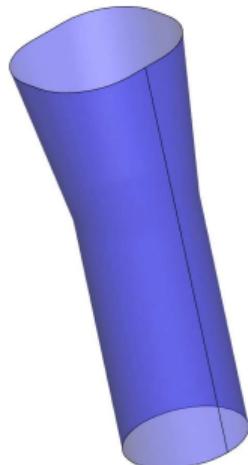
## Geometrien / Filmkühlung



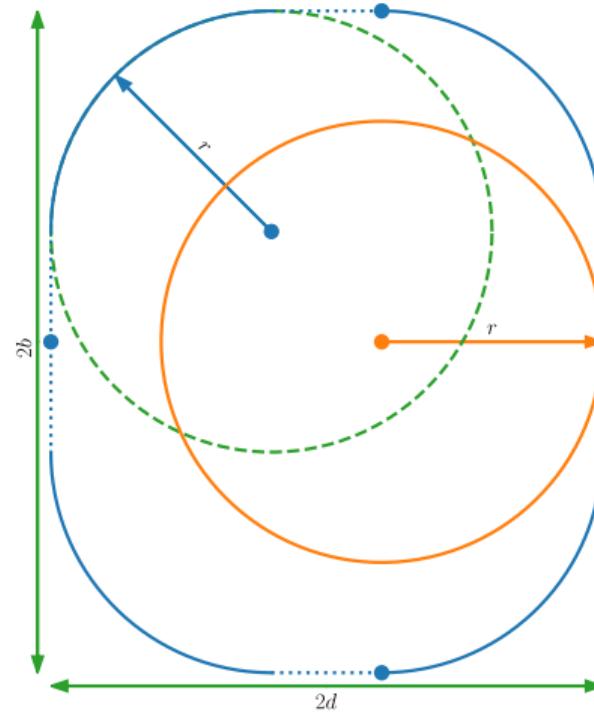
## Geometrien / Filmkühlung



(a) Zylindrisch

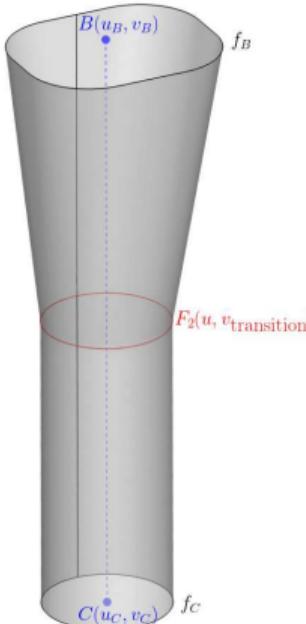
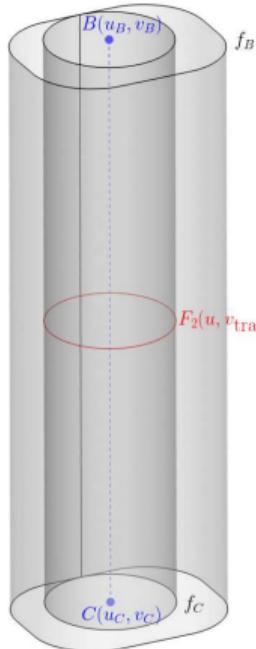


(b) Laid back fan-shaped



(c) Begrenzende Kurven

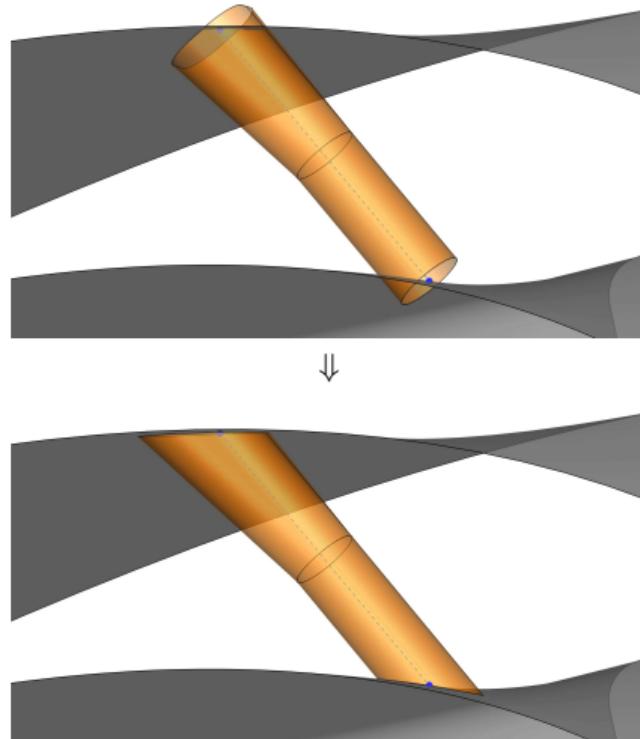
## Geometrien / Filmkühlung



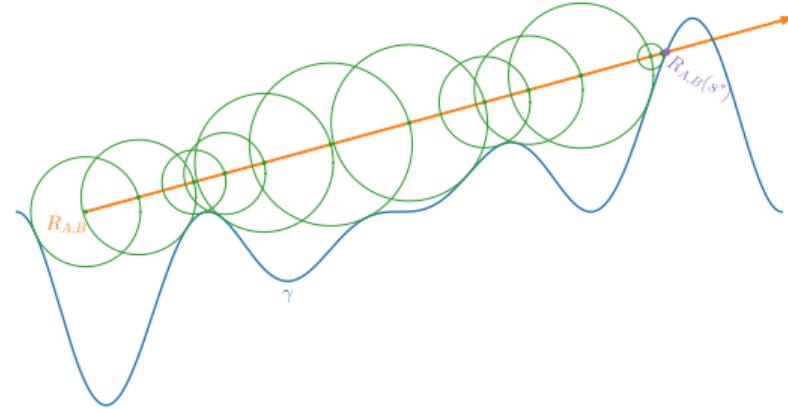
Links: Einbettung der 2D Kurven im 3D Raum entlang einer Strecke zwischen Schaufel  $B$  und Kanal  $C$ .

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

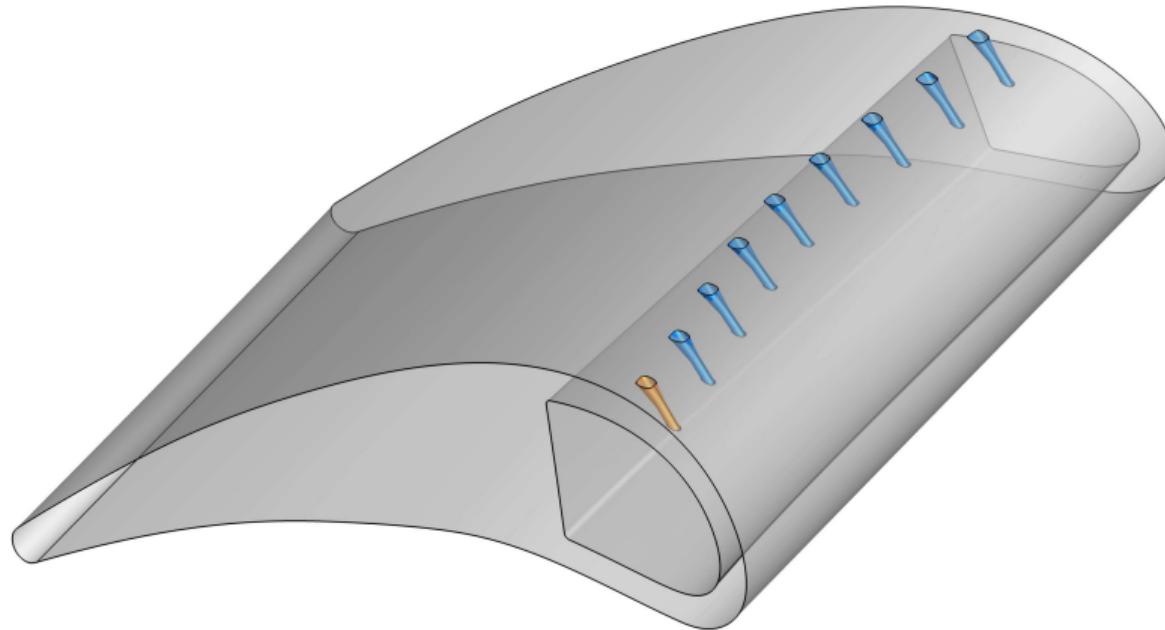
## Geometrien / Filmkühlung



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

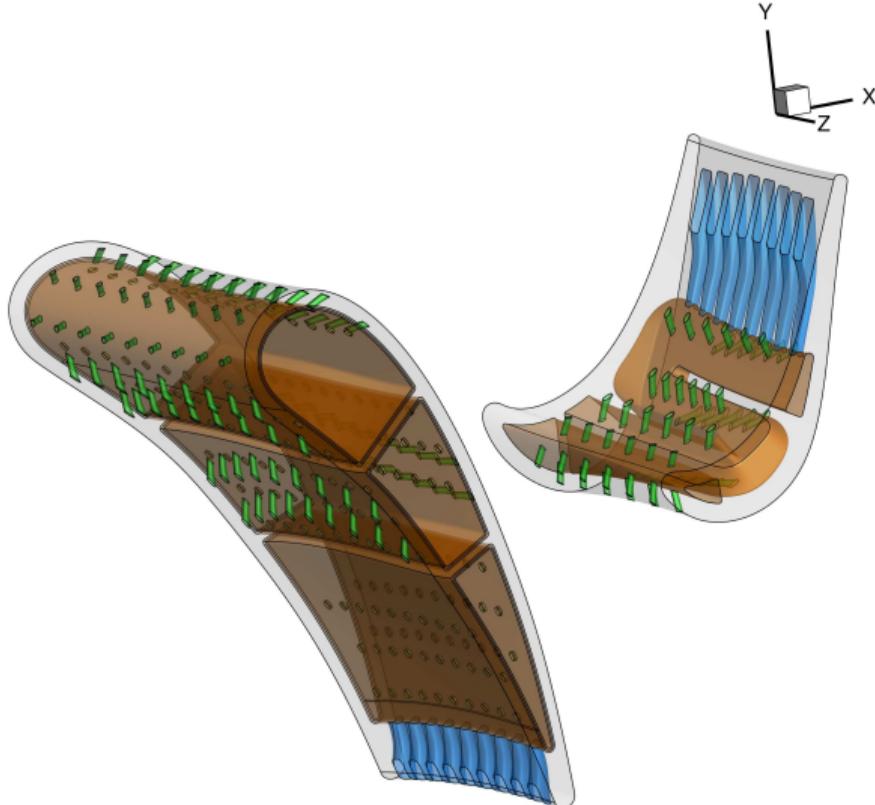


## Geometrien / Filmkühlung



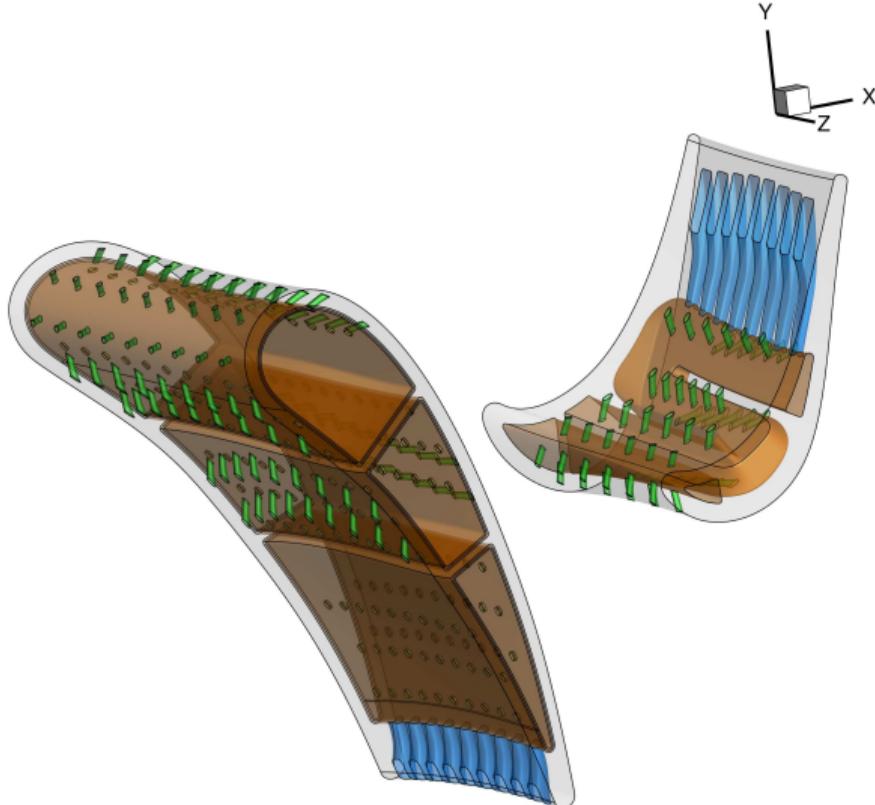
## Geometrien / Überblick

- Kühlkanäle
- Filmkühlung
- Prallkühlung
- Ausblasungsschlitz
- Pin-fins

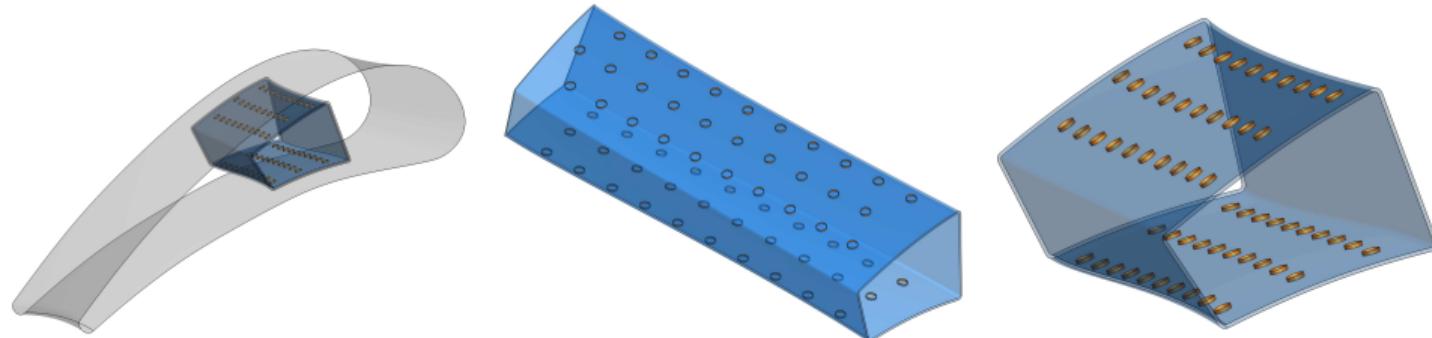


## Geometrien / Überblick

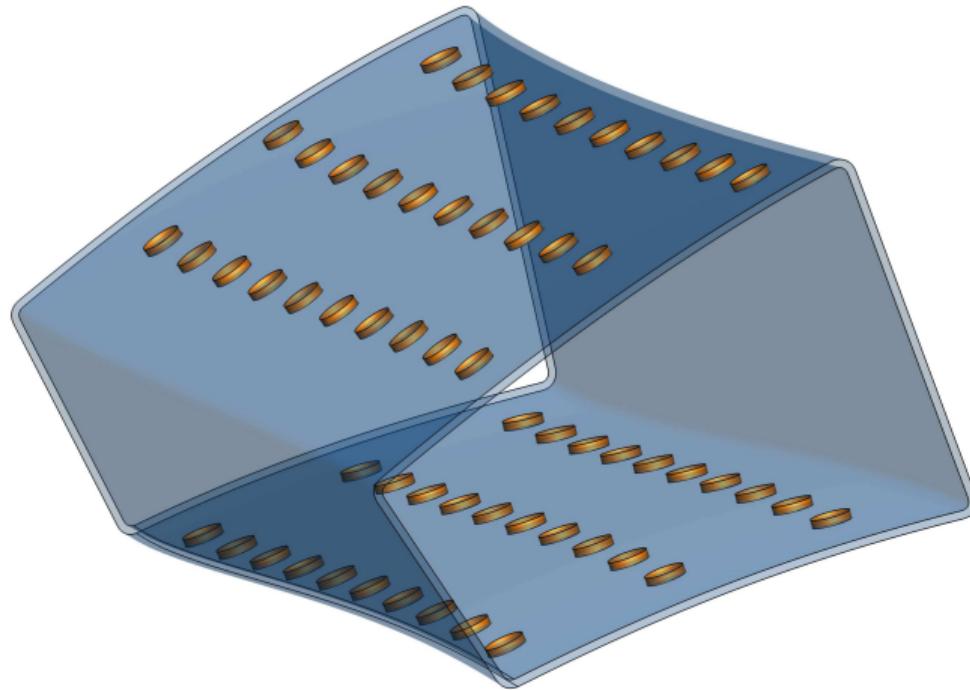
- Kühlkanäle
- Filmkühlung
- ↗ Prallkühlung
- Ausblasungsschlitz
- Pin-fins



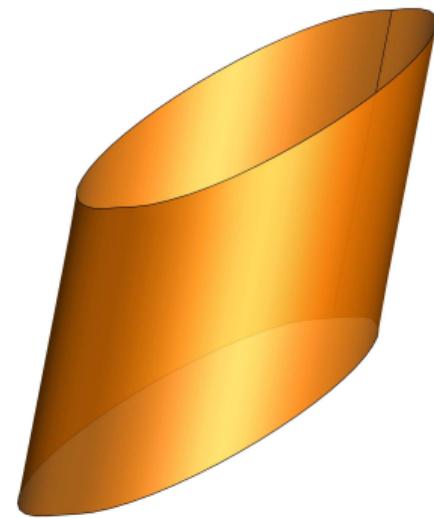
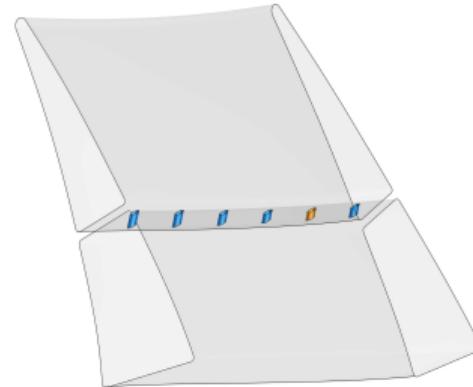
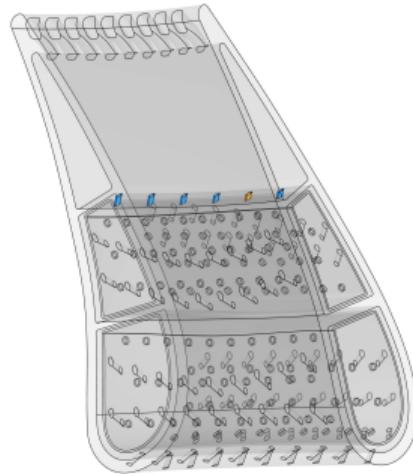
## Geometrien / Prallkühlung



## Geometrien / Prallkühlung

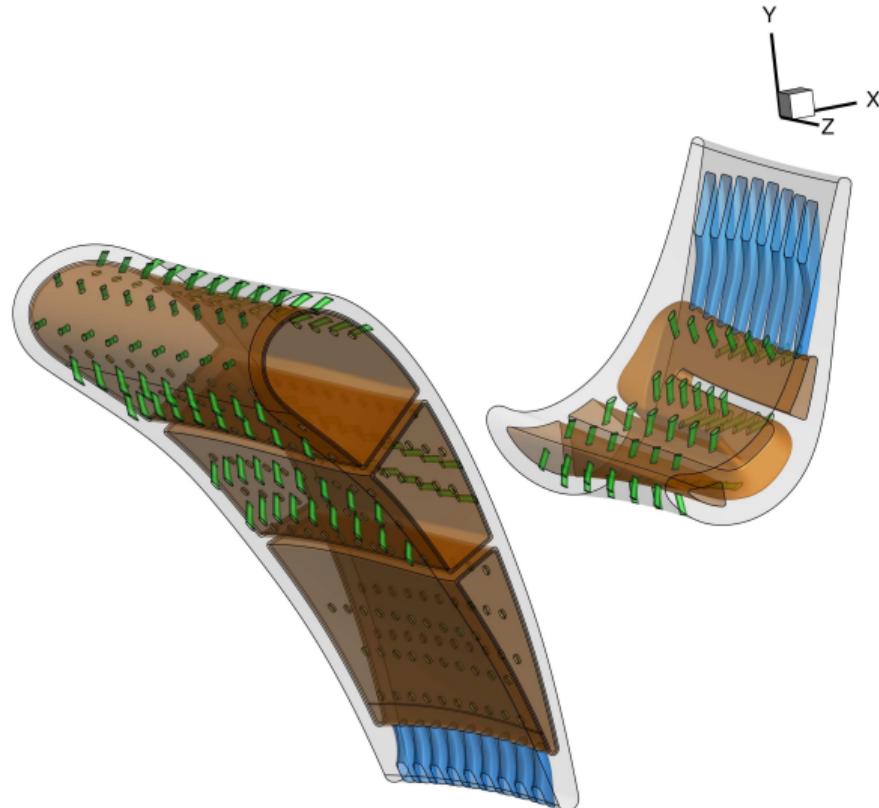


## Geometrien / Prallkühlung



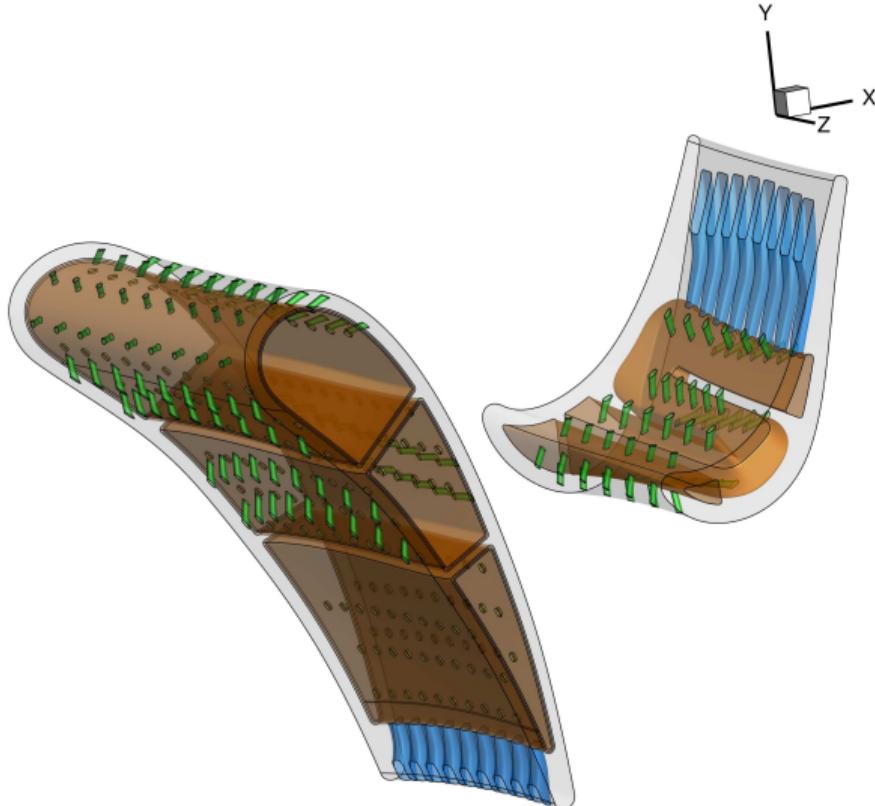
## Geometrien / Überblick

- Kühlkanäle
- Filmkühlung
- Prallkühlung
- Ausblasungsschlitz
- Pin-fins

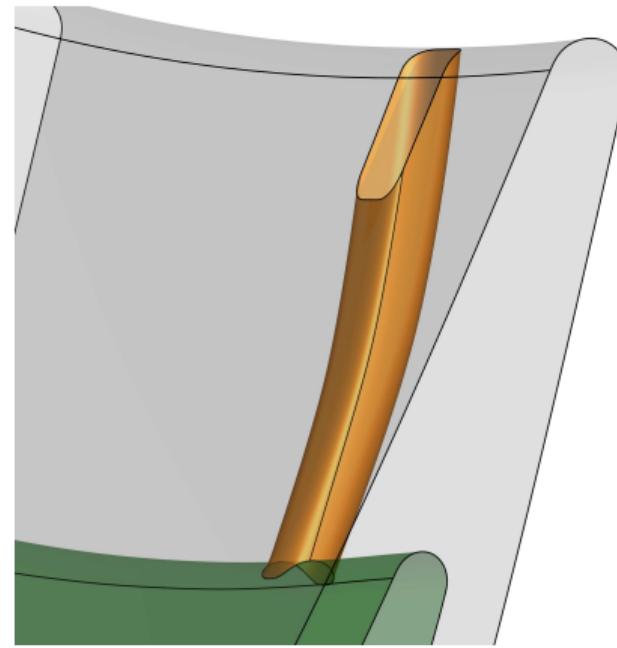
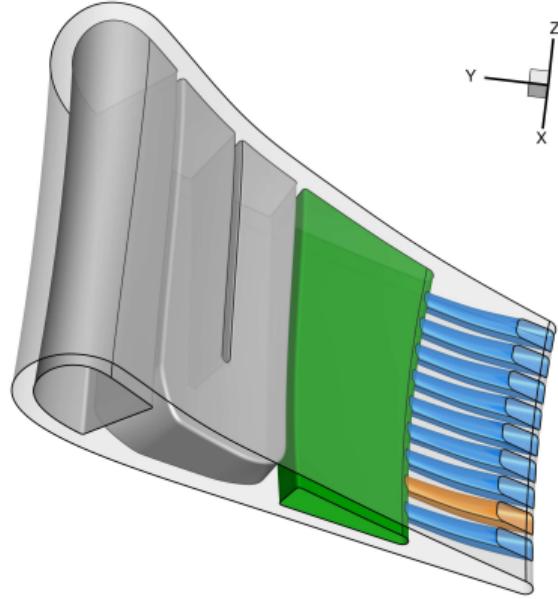


## Geometrien / Überblick

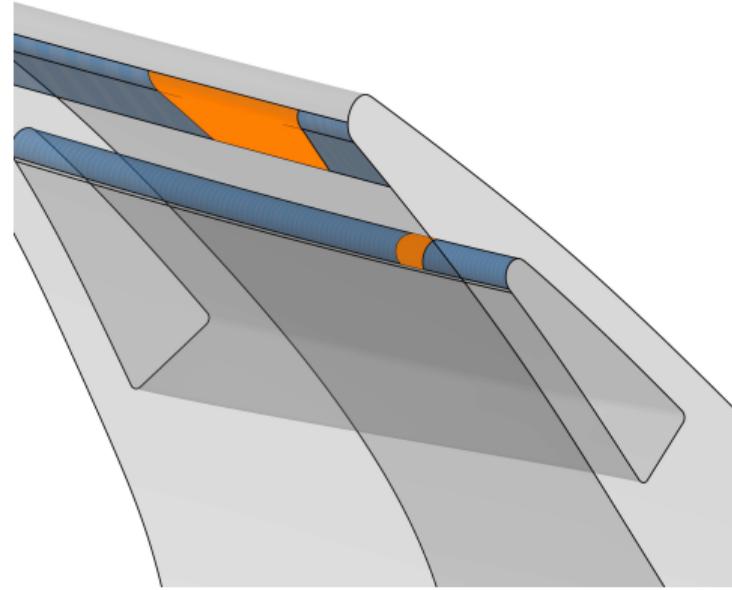
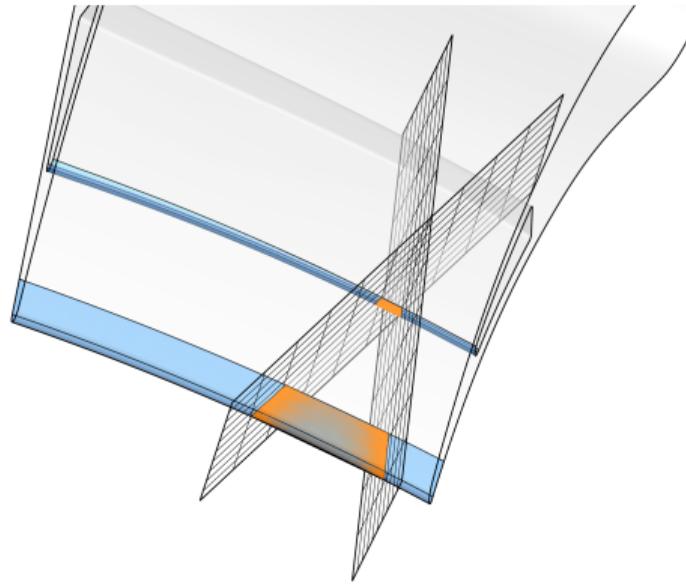
- Kühlkanäle
- Filmkühlung
- Prallkühlung
- ↗ Ausblasungsschlitz
- Pin-fins



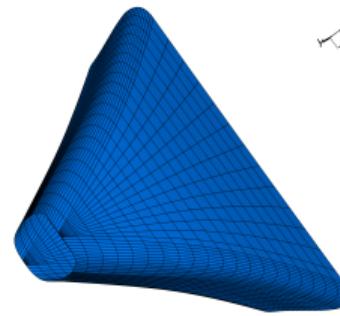
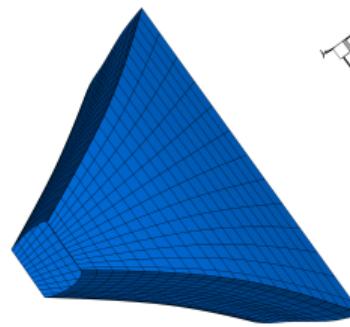
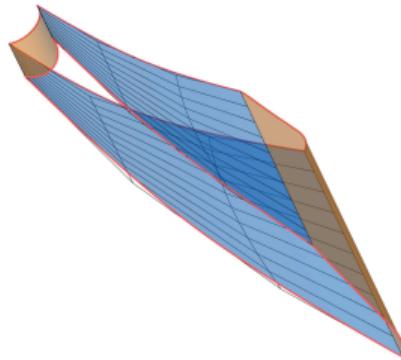
## Geometrien / Slots



## Geometrien / Slots

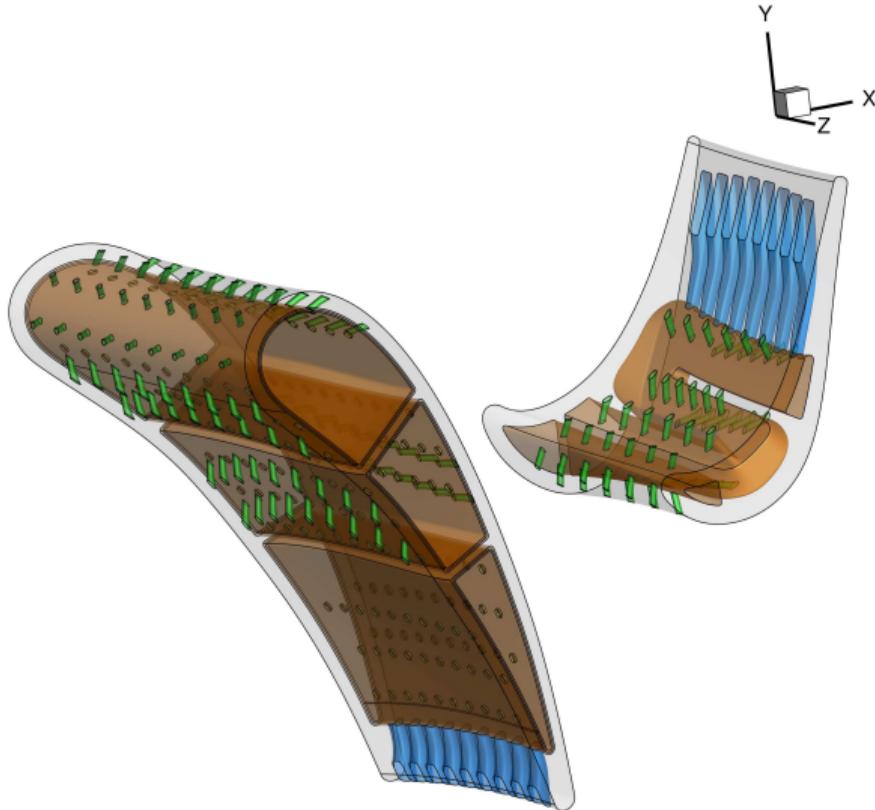


## Geometrien / Slots



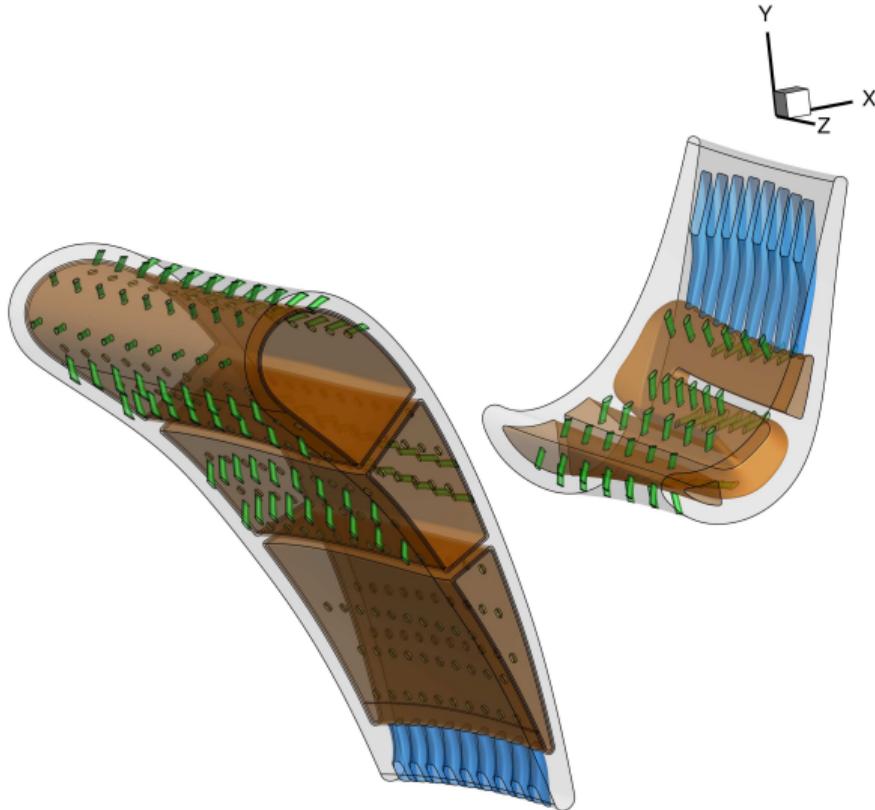
## Geometrien / Überblick

- Kühlkanäle
- Filmkühlung
- Prallkühlung
- Ausblasungsschlitz
- Pin-fins



## Geometrien / Überblick

- Kühlkanäle
- Filmkühlung
- Prallkühlung
- Ausblasungsschlitz
- ↗ Pin-fins



## Geometrien / Pin-fins

