



# **MODELLIERUNG BEWEGLICHER STEUERFLÄCHEN MILITÄRISCHER KONFIGURATIONEN: EIN VERGLEICH ZWISCHEN NUMERISCHEN METHODEN UND CFD-LÖSERN**

**DLRK 2022 - DIABOLO-SONDERSITZUNG**

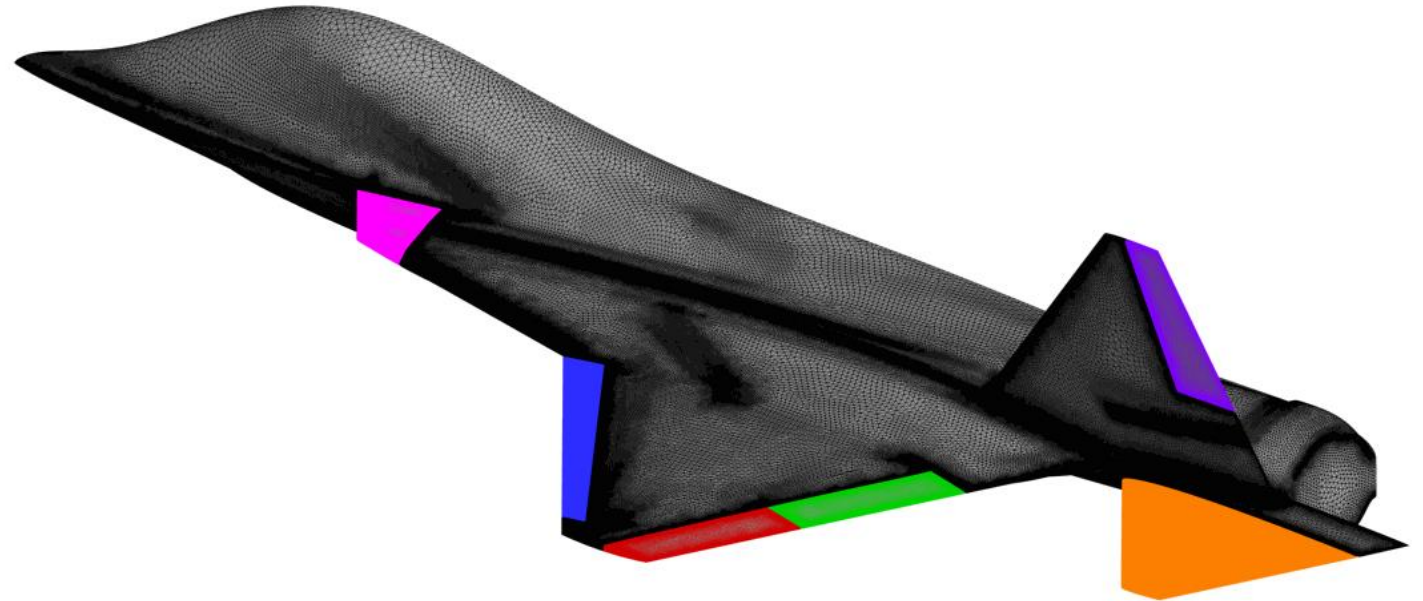
**Larissa B. Streher, Ralf Heinrich**

**Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik – DLR, Braunschweig**

**Dresden, 29.09.2022**



- Motivation
- Methoden zur Steuerflächenmodellierung
  - CFD Gitter
  - Netzdeformationsalgorithmen
  - CFD Löser
    - CODA
    - TAU
- MULDICON Testfall
- Fazit und Ausblick



# Motivation

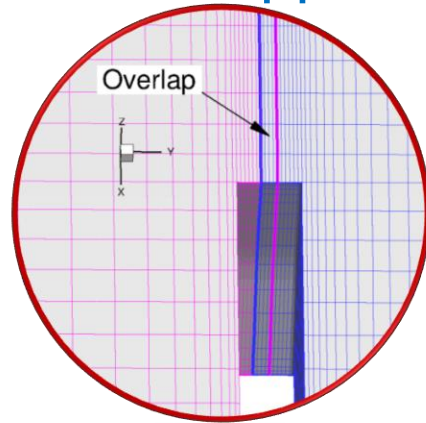


- Entwurf und Optimierung eines Flugzeugs
  - Manövrierfähigkeit des Flugzeugs
  - Steuerflächenwirksamkeit
  - Scharniermomente der Steuerflächen
- Steuerflächenmodellierung
  - Hochgenaue CFD Löser
  - Methoden um Steuerflächen auszuschlagen

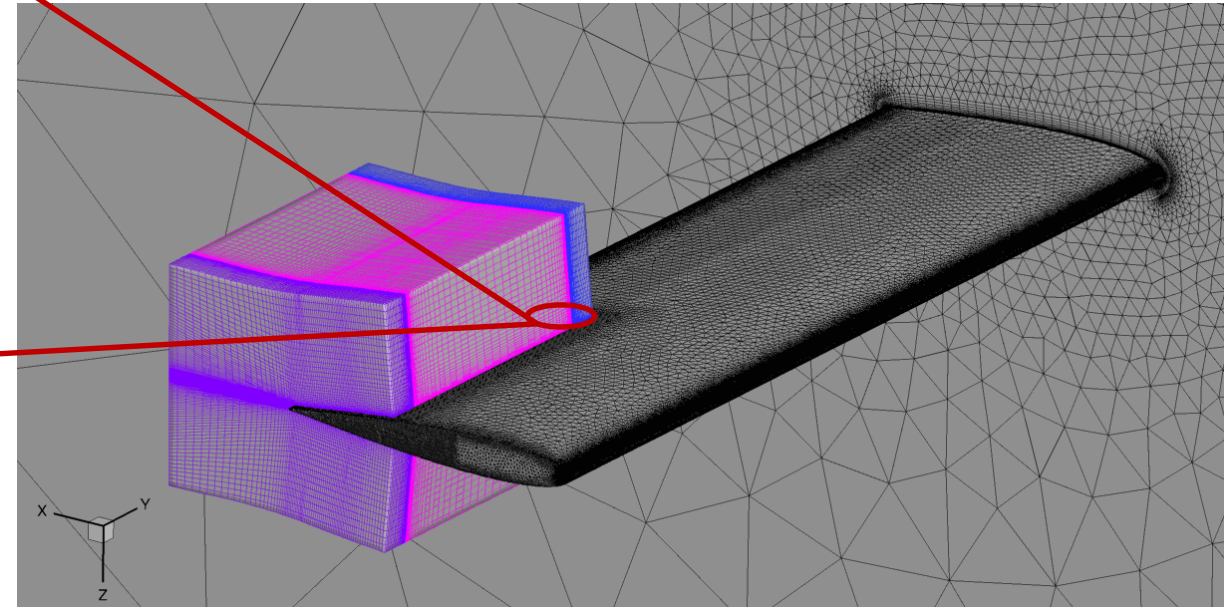
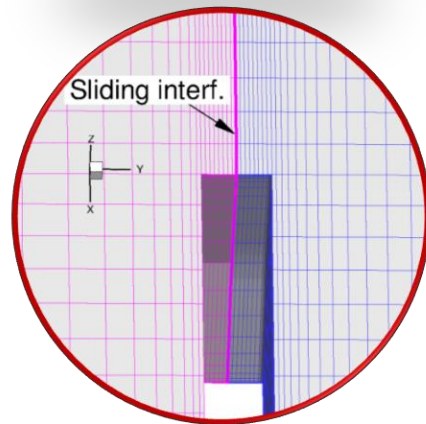




- Netzdeformation + überlappende (Chimera) Gitter



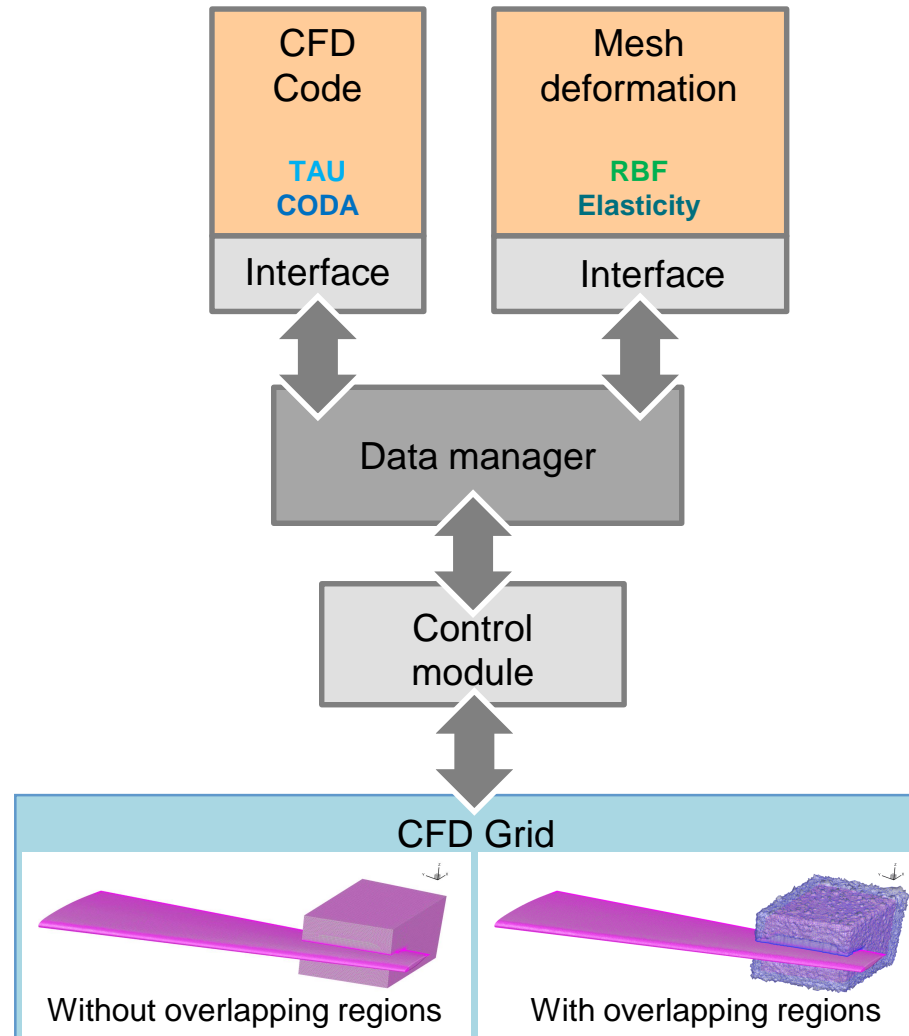
- Netzdeformation + gleitende Ränder



# Methoden zur Steuerflächenmodellierung

## Ablaufplan Steuerflächenmodellierung

- CFD Gitter
  - Skript
    - Steuermodul
- Verknüpfung zwischen CFD und Netzdeformation
  - Datenverwalter
- CFD-Code
  - TAU
  - CODA
- Netzdeformationsalgorithmus
  - RBF Netzdeformation
  - Elastizitätsbasierte Netzdeformation

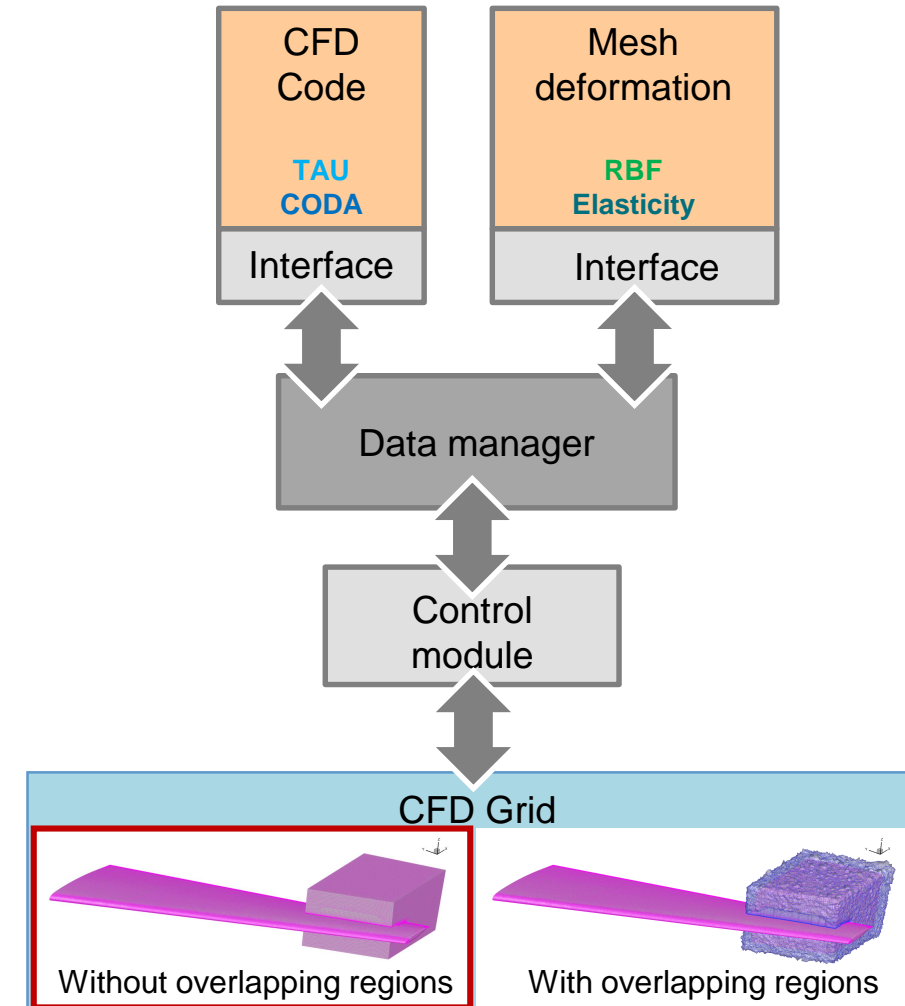
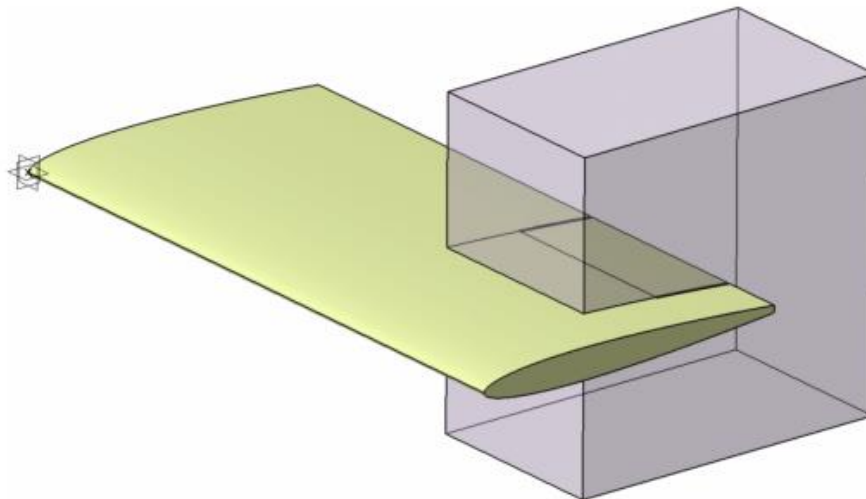


# Methoden zur Steuerflächenmodellierung

## CFD Gitter

### ■ Ohne überlappende Bereiche

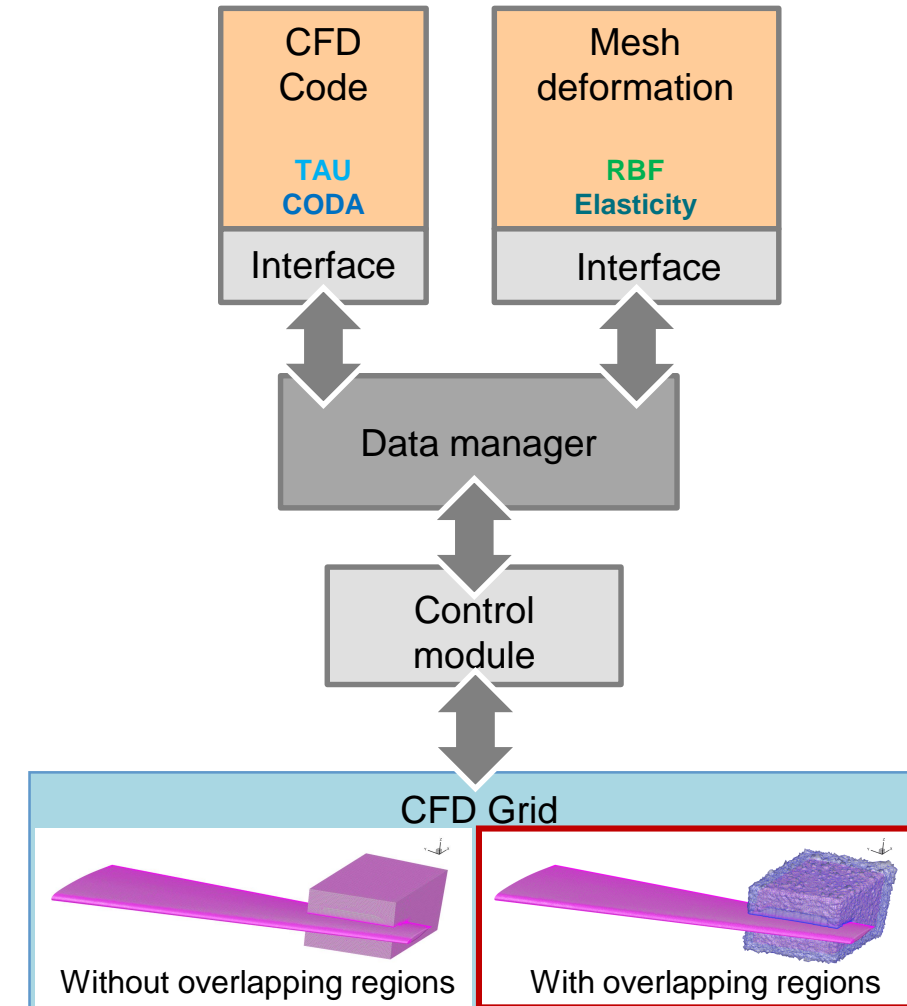
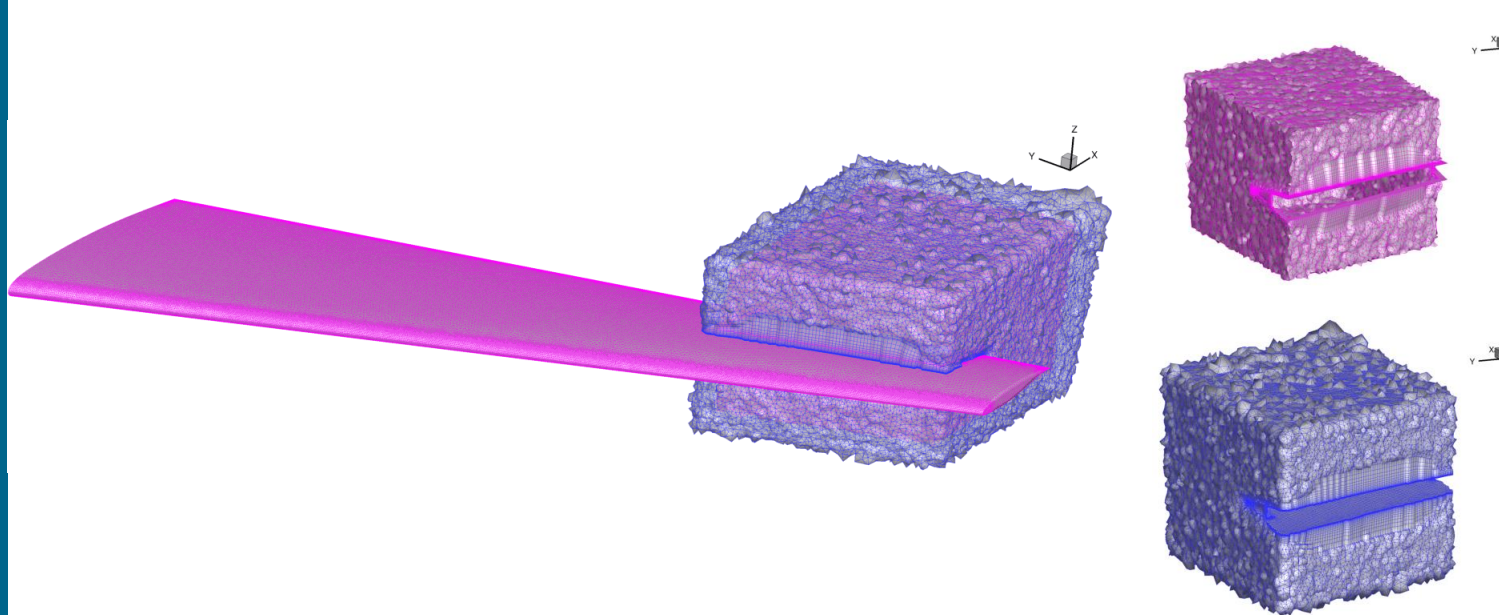
- Gittergenerierung mit kommerziellem Netzgenerator
- Mehrere Gitterblöcke / -zonen
  - Tragflächengitterblock
  - Steuerflächengitterblock
- Schnittstellen zwischen Trag- und Steuerflächen-Gitterblöcken sind Gleitränder



# Methoden zur Steuerflächenmodellierung

## CFD Gitter

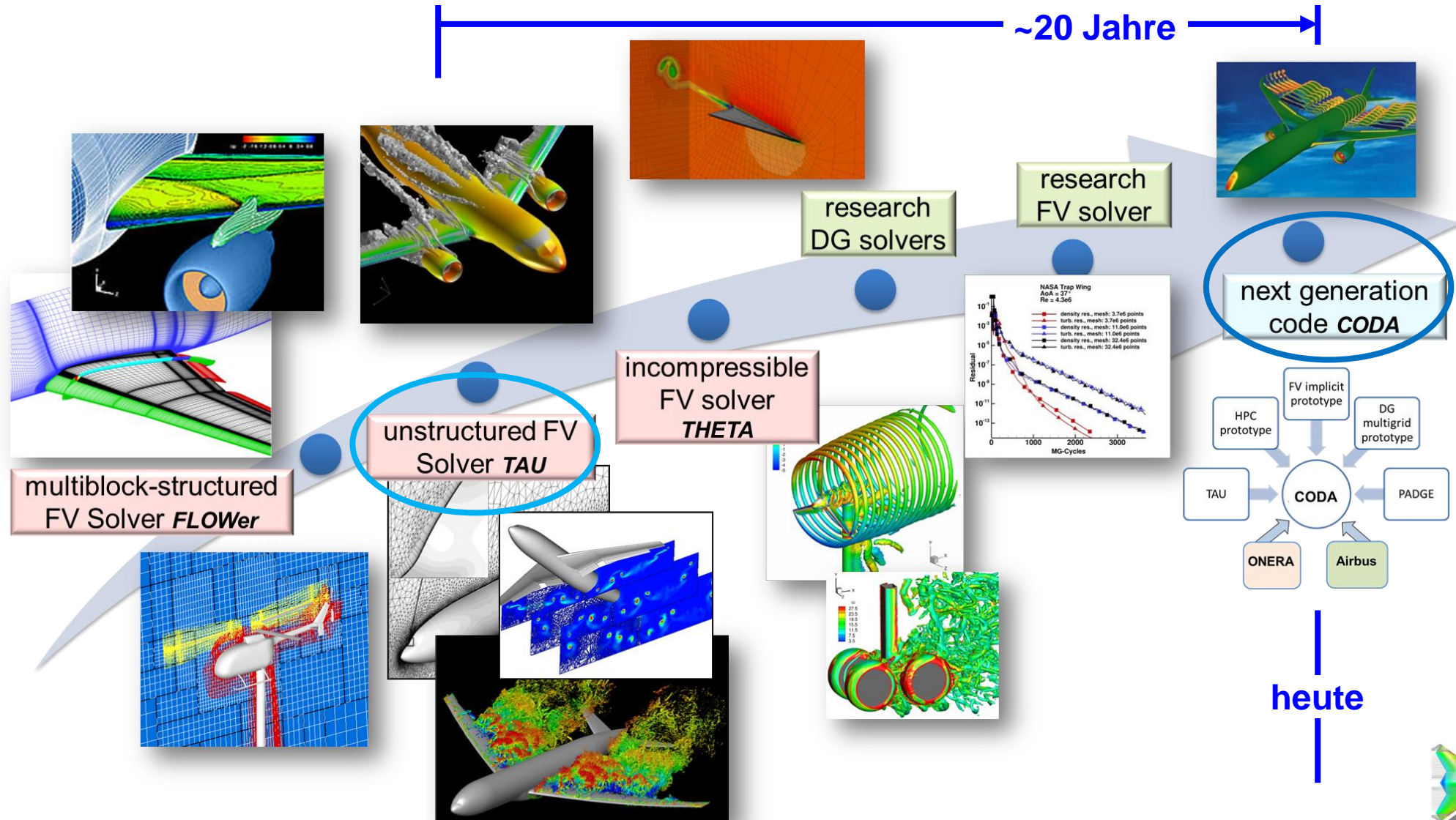
- Mit überlappenden Bereichen (Chimera Gitter)
  - Umständliche und mühsame Netzgenerierung
  - Elemente mit ähnlicher Größe in den überlappenden Bereichen
  - AutoLap (automatic overlapping region generator)





# Methoden zur Steuerflächenmodellierung

## CFD Löser





# Methoden zur Steuerflächenmodellierung

## CFD Löser

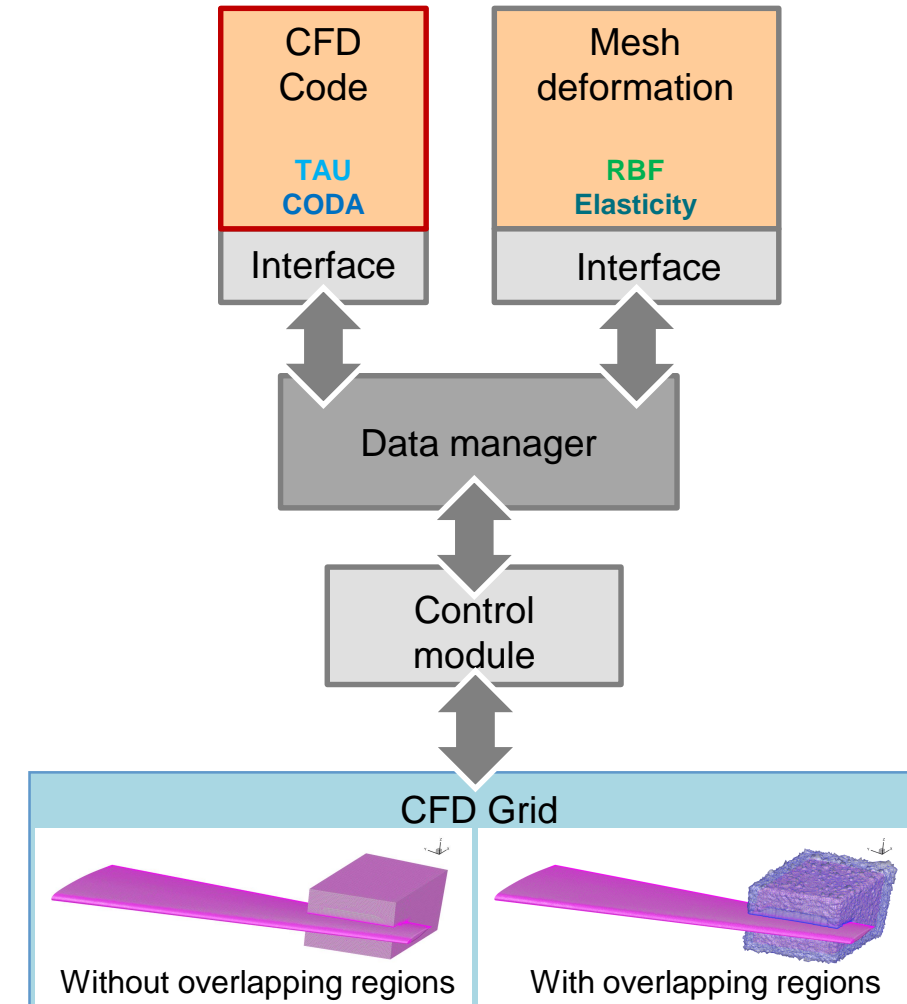


### ■ TAU

- Etablierter CFD-Code des DLR
- Umfassende Nutzung in der europäischen Industrie und Akademie
- Zelleckpunkt-Schema mit dualen Kontrollvolumen
- MPI-Parallelisierung
- Mehrgitterverfahren zur Beschleunigung
- Elemente 2. Ordnung
- Räumliche Diskretisierung: FVM
- Lineare Löser: SGS, LU-SGS, (GMRES)

### ■ CODA\*

- CFD-Code der nächsten Generation
- Zellenzentriertes Schema
- Hybride Parallelisierung (MPI und OpenMP)
- Elemente hoher Ordnung / Hängende Knoten / hohe-Ordnungs-Schemata
- Räumliche Diskretisierung: FVM, DG, DGSEM, ADG
- Lineare Löser: GMRES, Block Jacobi, Gauss Seidel, BICGSTAB



\*CODA is the computational fluid dynamic (CFD) software being developed as part of a collaboration between the French Aerospace Lab ONERA, the German Aerospace Center (DLR), Airbus, and their European research partners. CODA is jointly owned by ONERA, DLR and Airbus.

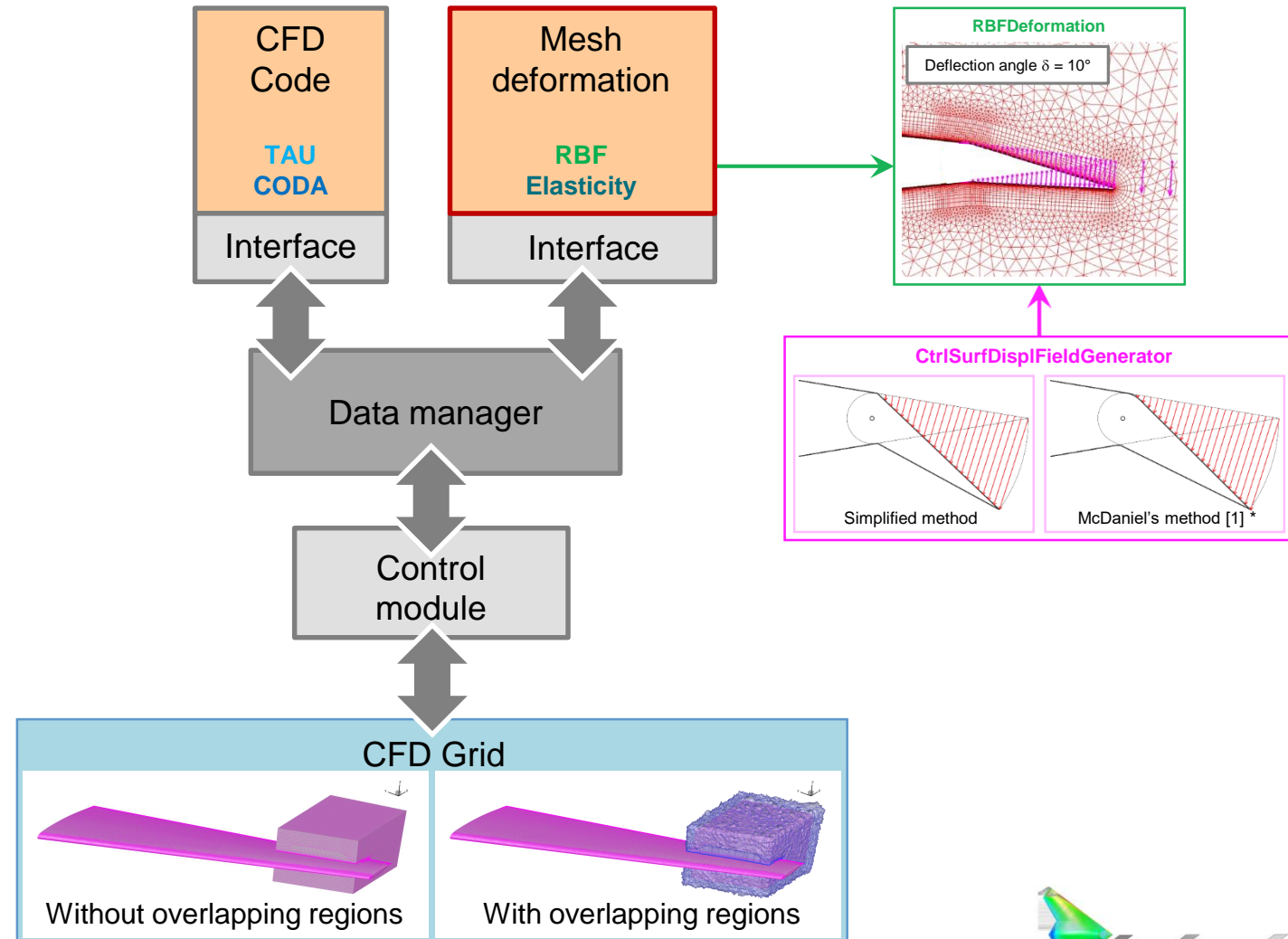


# Methoden zur Steuerflächenmodellierung

## Netzdeformation

### RBF Netzdeformation

- Verschiebungen nur für die Basispunkte berechnet
- Interpolation der Verschiebungen für alle Netzknoten durch radiale Basisfunktionen
- Sehr schnell
- Nicht immer robust
- Netzqualität nicht immer ausreichend

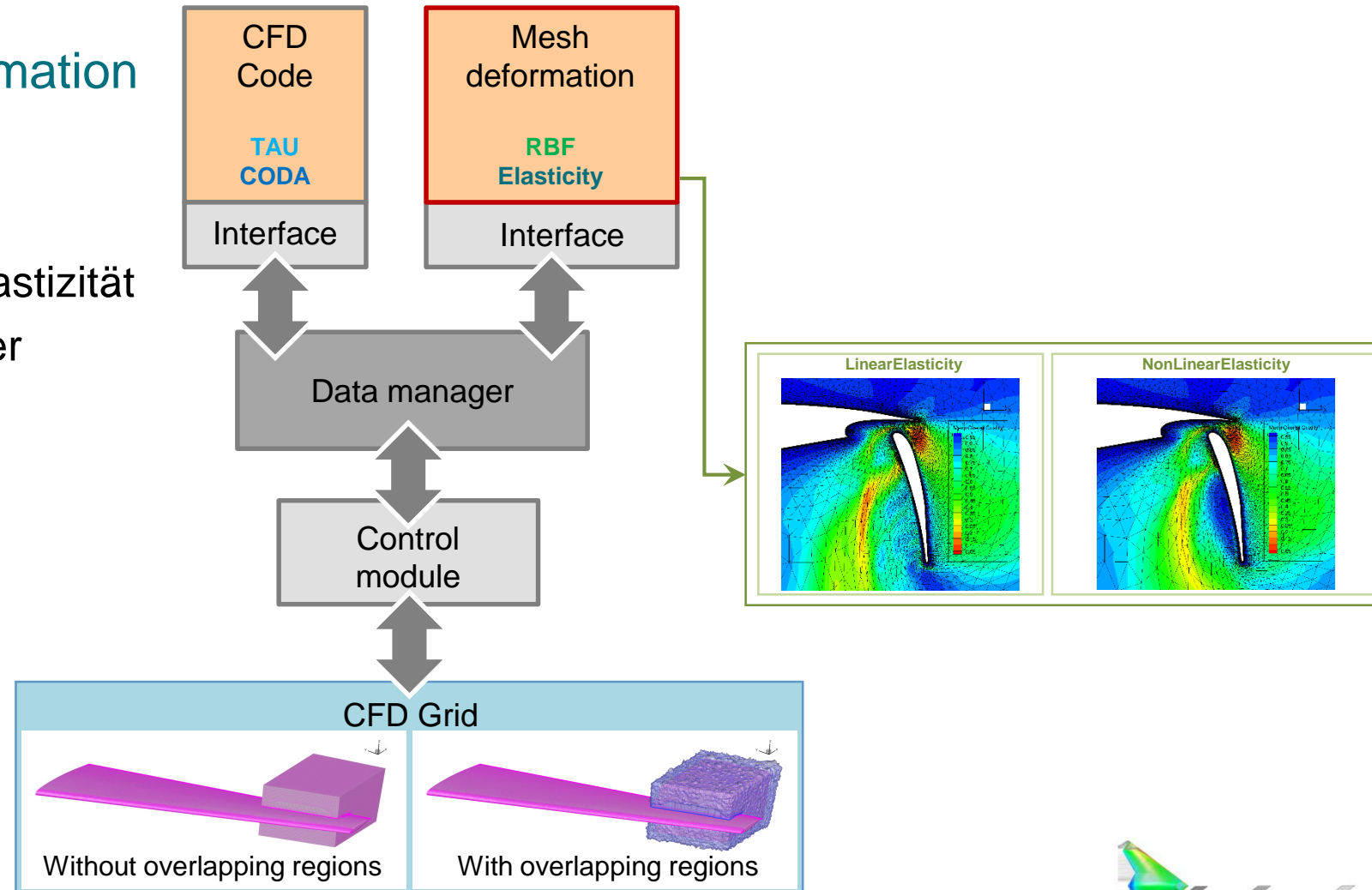


# Methoden zur Steuerflächenmodellierung

## Netzdeformation

### Elastizitätsbasierte Netzdeformation

- Netz als elastischer Körper aufgefasst
  - Lineare Gleichungen der Elastizität
  - Nichtlineare Gleichungen der Elastizität
- Verschiebungen für alle Oberflächenpunkte werden vorgegeben
- Höhere Robustheit
- Gute Netzqualität
- Langsamer





# Methoden zur Steuerflächenmodellierung

## Netzdeformation



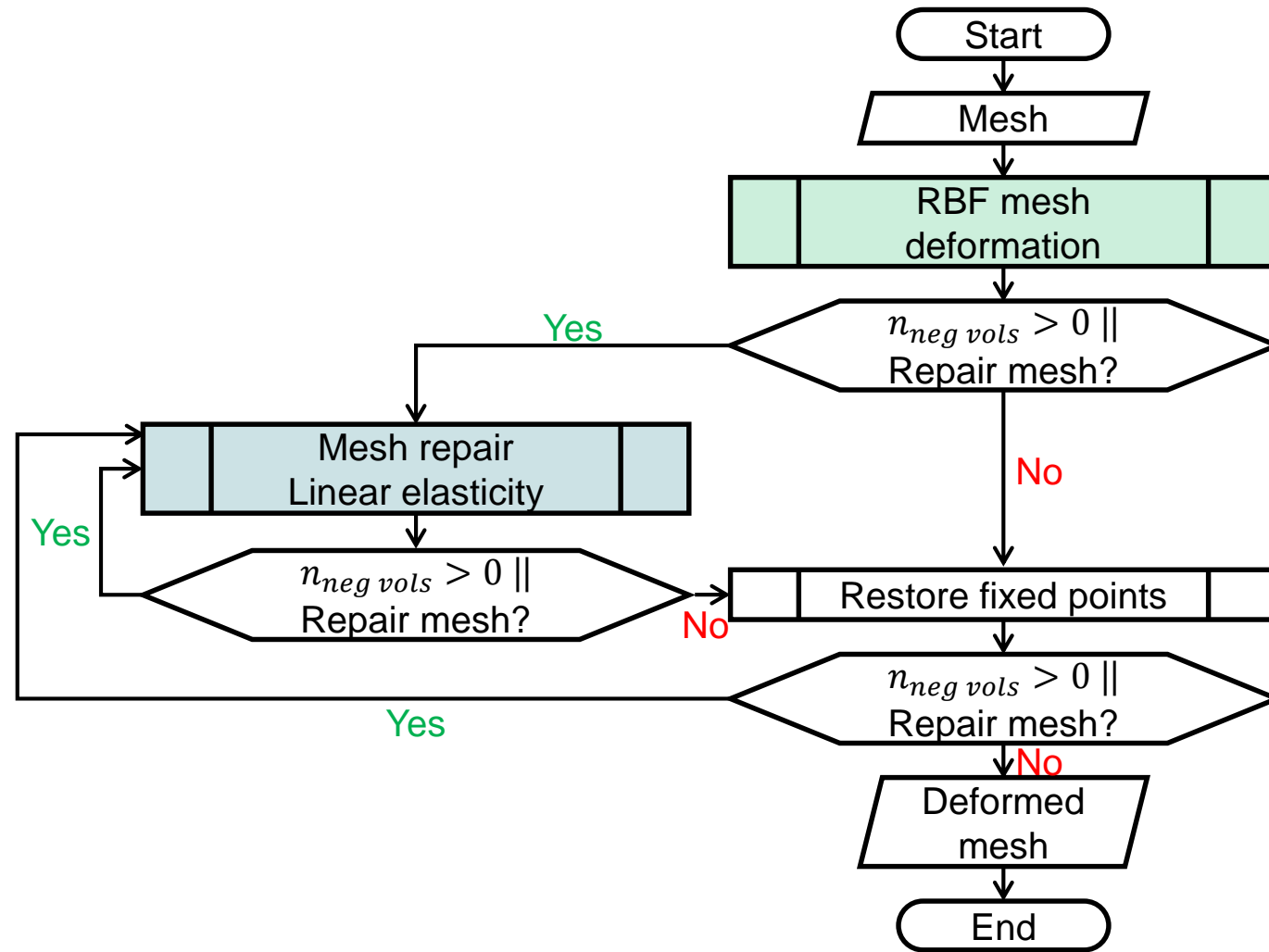
### Hybrider Ansatz

#### ■ RBF Netzdeformation

- RBF Netzdeformation für den Steuerflächenausschlag

#### ■ Elastizitätsbasierte Netzdeformation

- Lineare Gleichung der Elastizität zur lokalen Verbesserung der Netzqualität (Netzreparatur)
- Verschiebung der Knoten auf der Tragfläche zurück in die Ausgangsposition

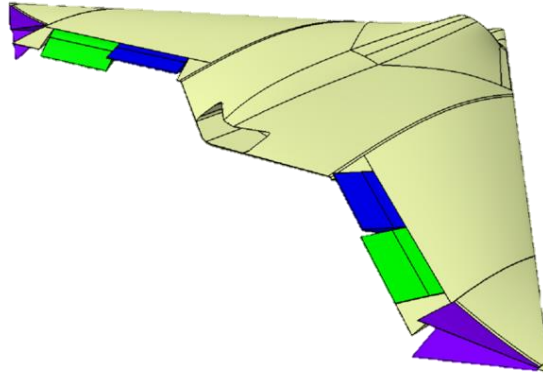


## MULDICON Testfall

# MULDICON-Halbkonfiguration mit Innen- und Außenelevon

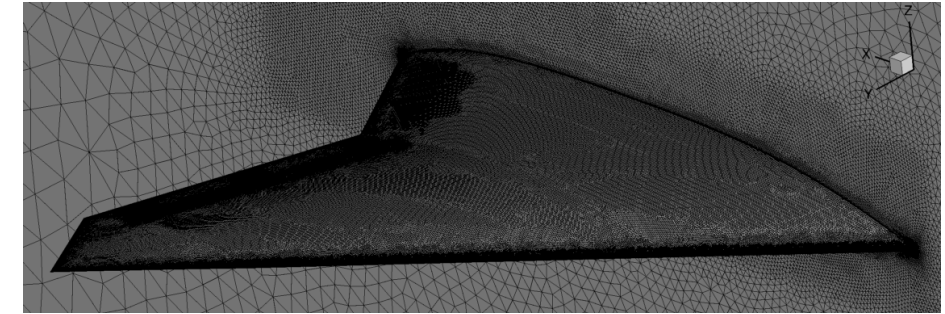
## Vergleich zwischen CODA und TAU für unterschiedliche Gitter

- Unstrukturierte Gitter:
  - Flügel-Gitter;
  - Inneres Elevon-Gitter;
  - Äußeres Elevon-Gitter.

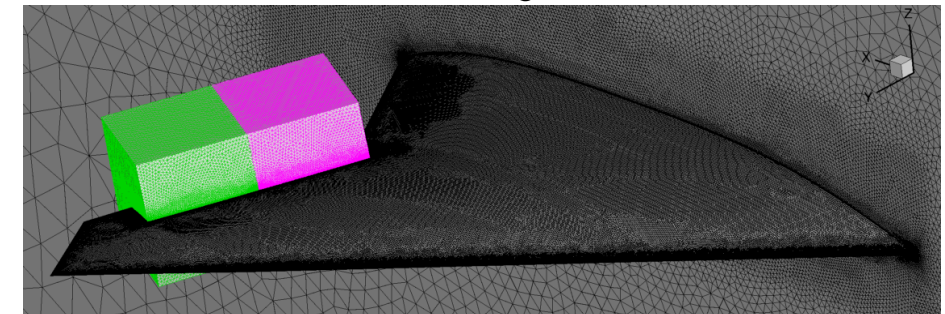


Gitter	Anzahl der Freiheitsgrade	
	TAU	CODA
Referenzgitter	18.1 M	55.4 M
Gepatchtes Gitter	18.2 M	55.4 M
Chimera Gitter	18.6 M	57.0 M

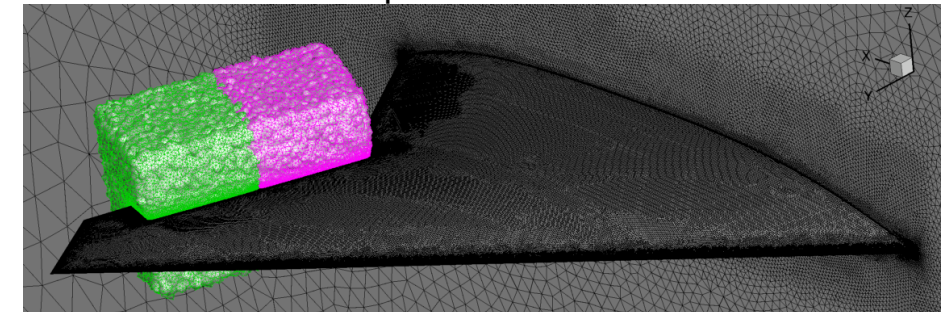
- Anströmbedingungen:
  - $Ma_\infty = 0.4$ ,  $Re_\infty = 55.8 \times 10^6$  und  $\alpha = 2^\circ$ .



Referenzgitter



Gepatchtes Gitter



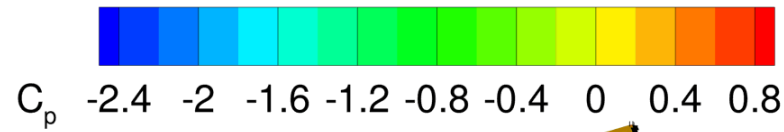
Chimera (AutoLap) Gitter



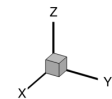
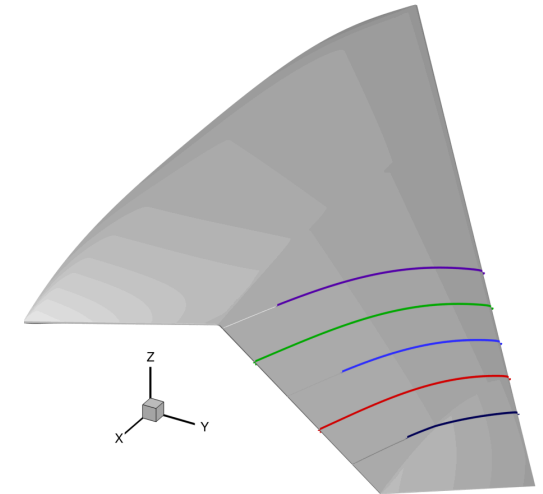
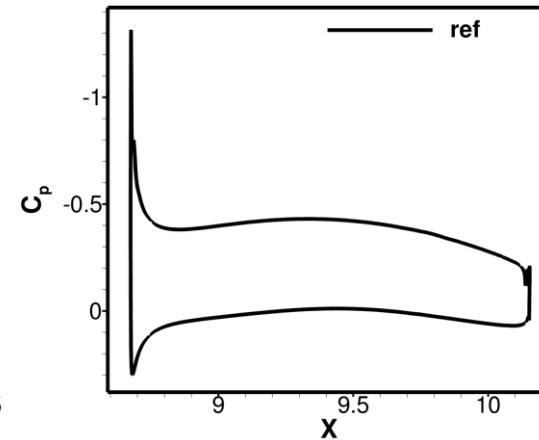
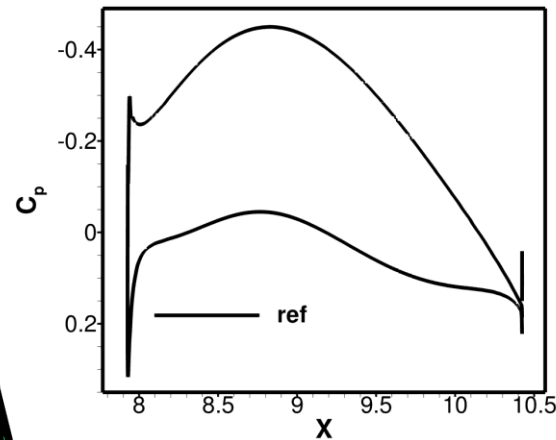
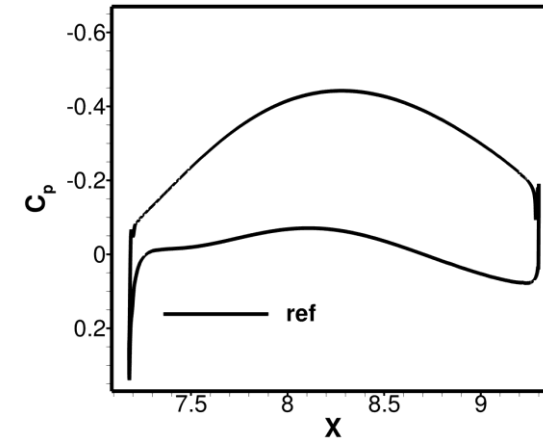
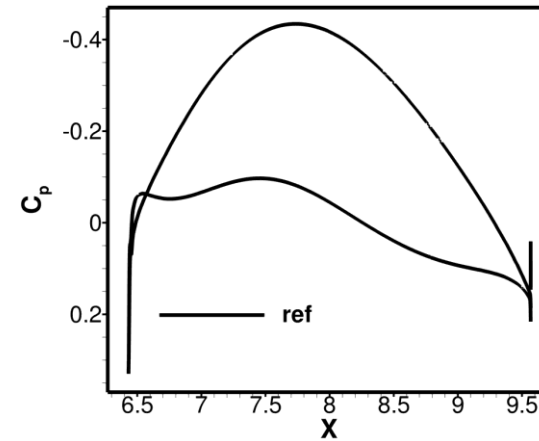
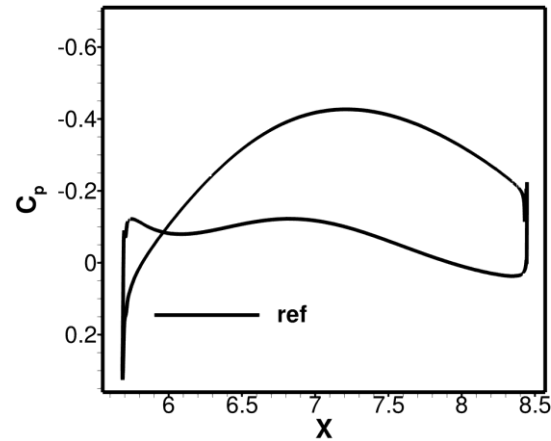
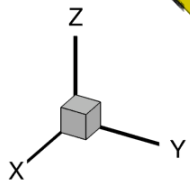
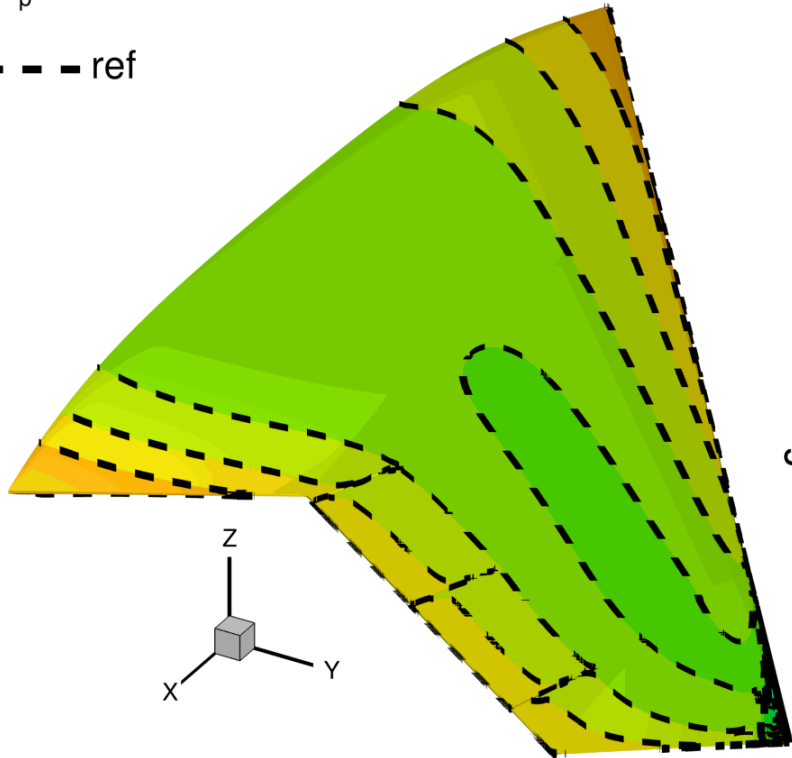
# MULDICON-Halbkonfiguration mit Innen- und Außenelevon

## CODA - Vergleich zwischen unterschiedliche Gitter

$$\delta_{RIB} = 0^\circ, \delta_{ROB} = 0^\circ$$



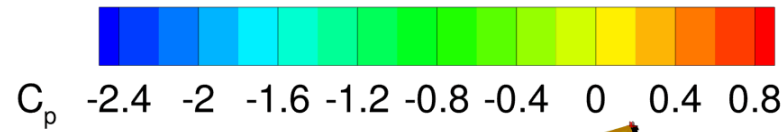
--- ref



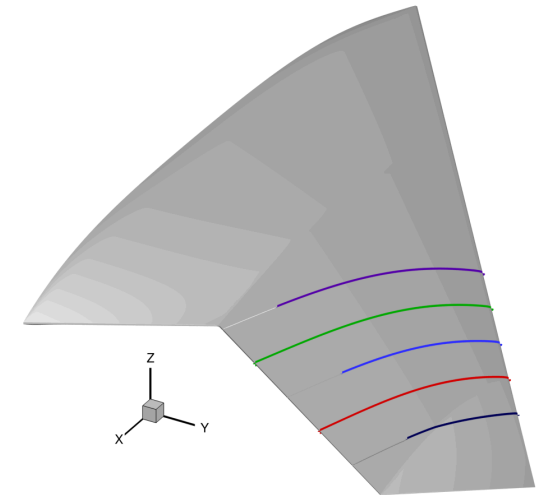
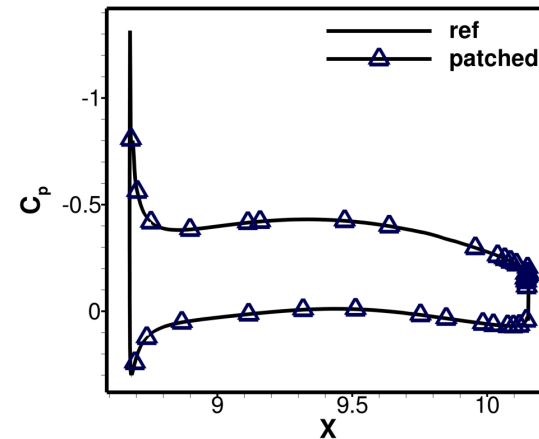
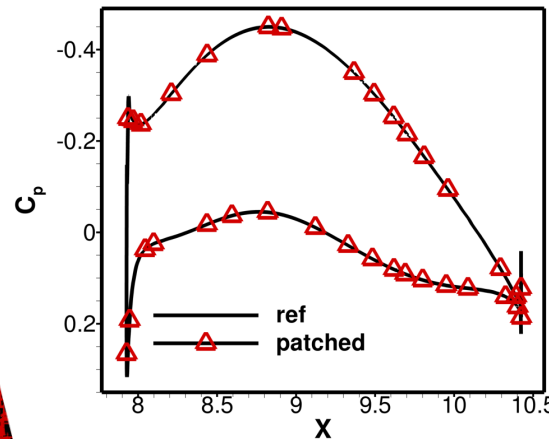
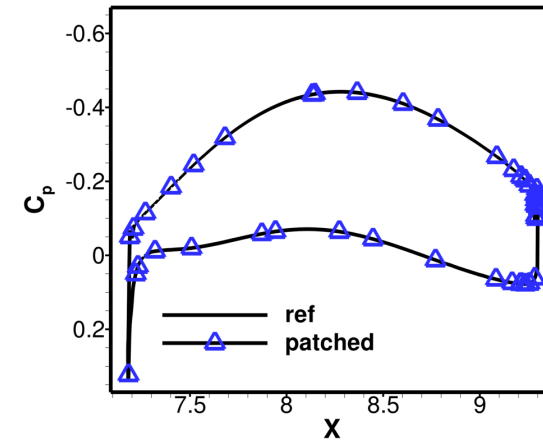
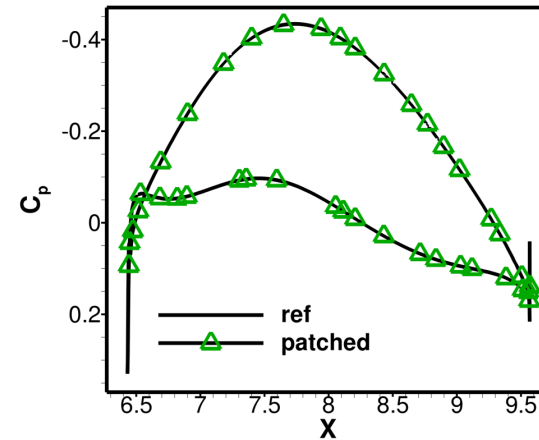
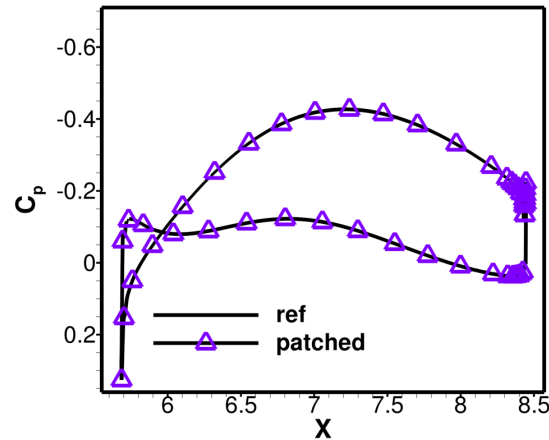
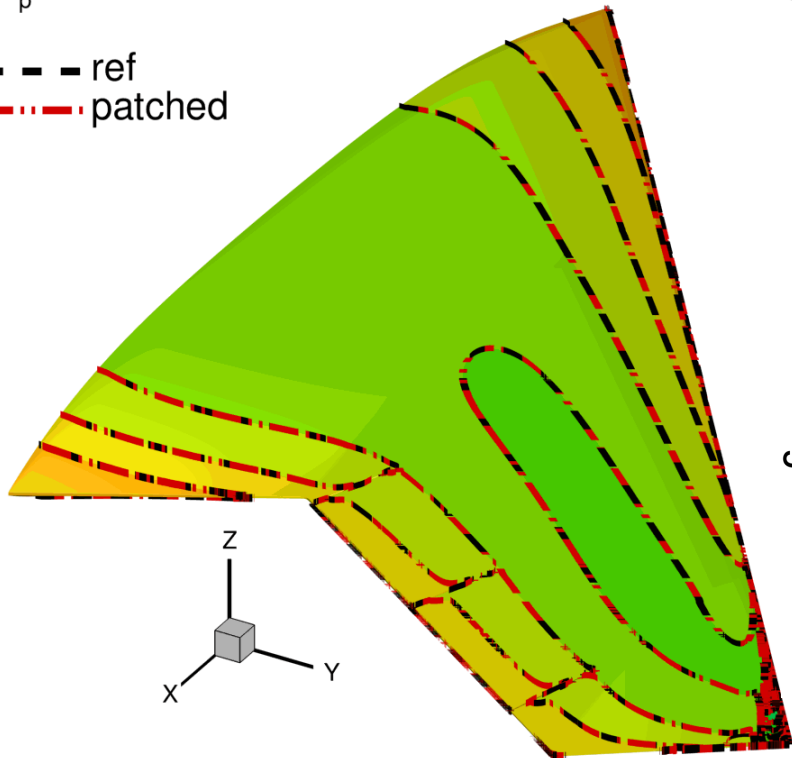
# MULDICON-Halbkonfiguration mit Innen- und Außenelevon

## CODA - Vergleich zwischen unterschiedliche Gitter

$$\delta_{RIB} = 0^\circ, \delta_{ROB} = 0^\circ$$



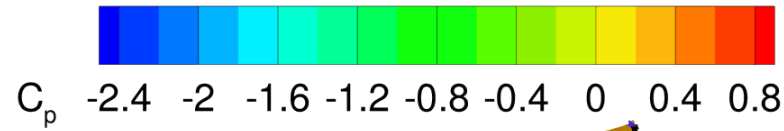
--- ref  
- - - patched



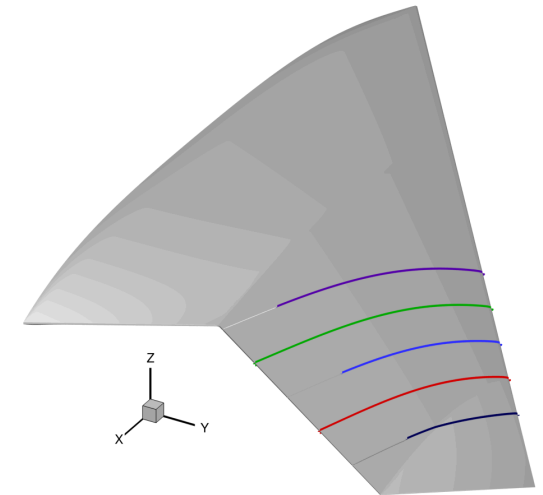
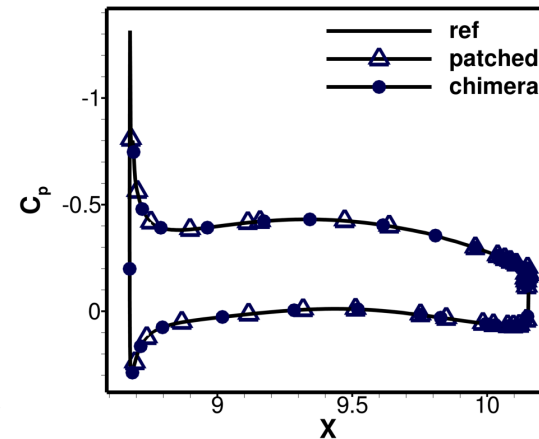
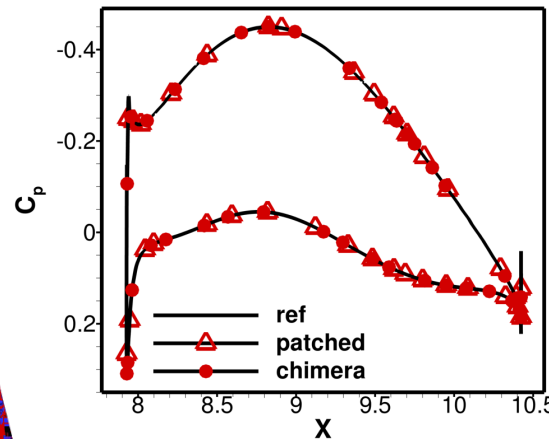
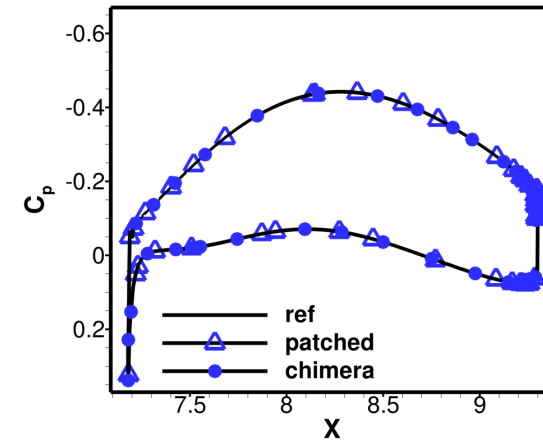
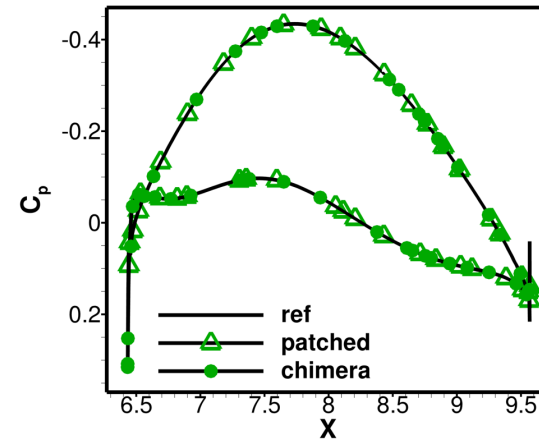
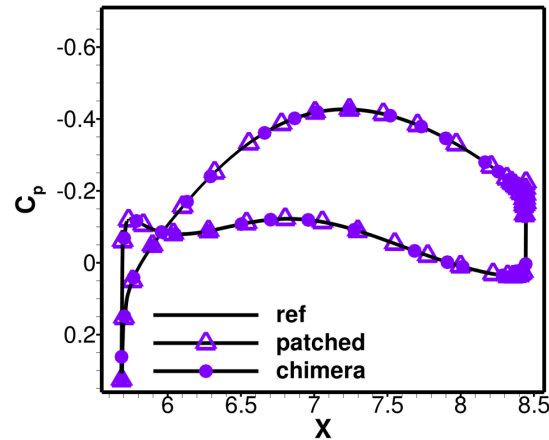
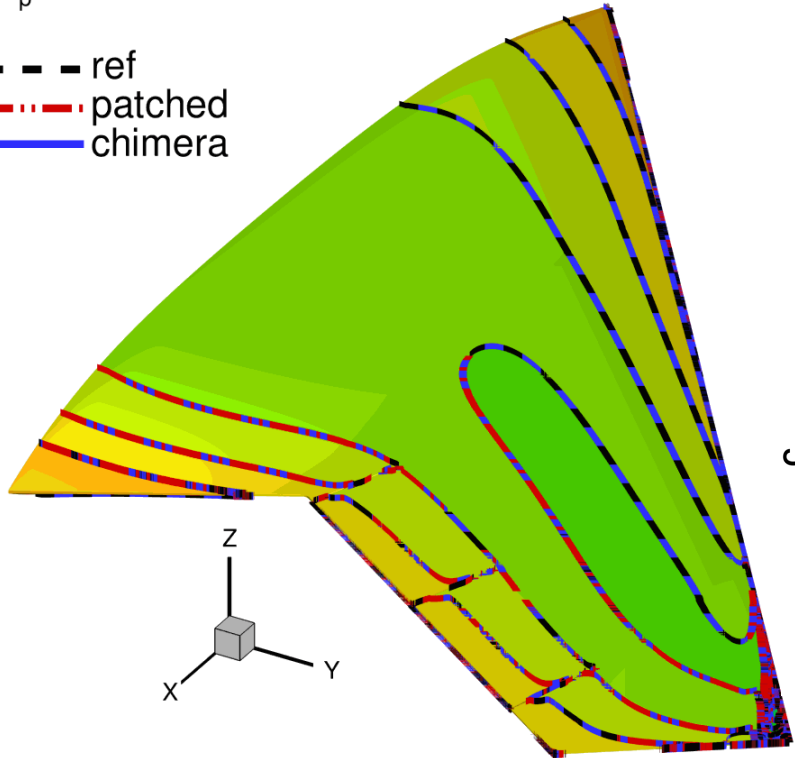
# MULDICON-Halbkonfiguration mit Innen- und Außenelevon

## CODA - Vergleich zwischen unterschiedliche Gitter

$$\delta_{RIB} = 0^\circ, \delta_{ROB} = 0^\circ$$



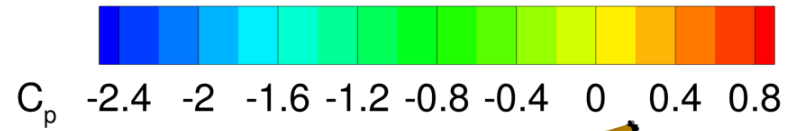
- - - ref  
 - . - . patched  
 - - - chimera



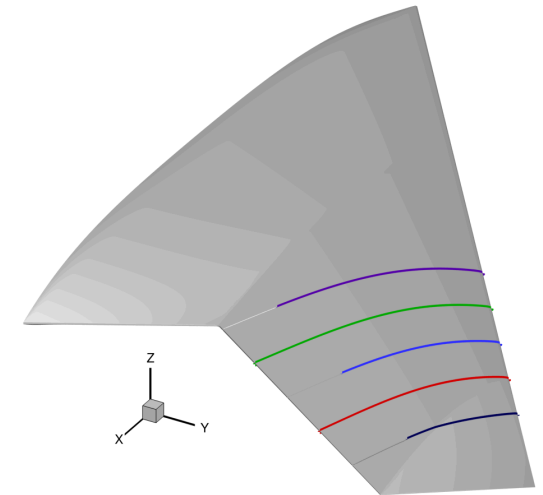
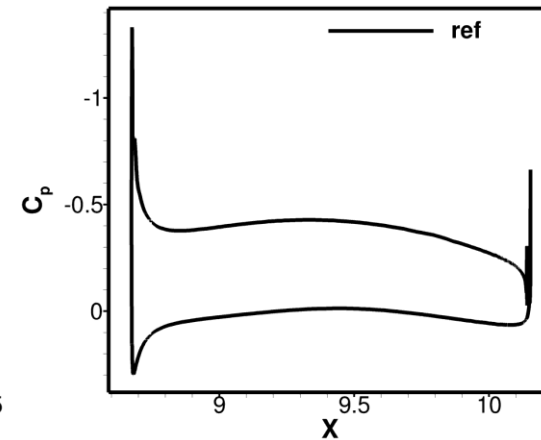
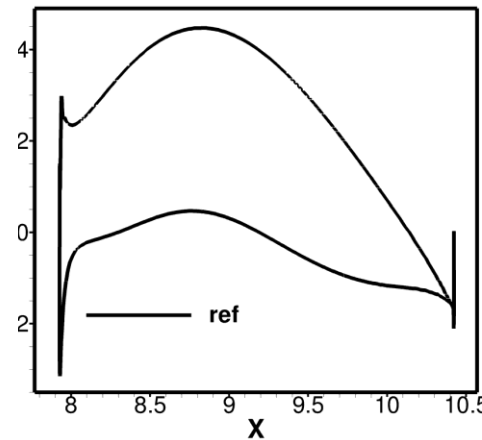
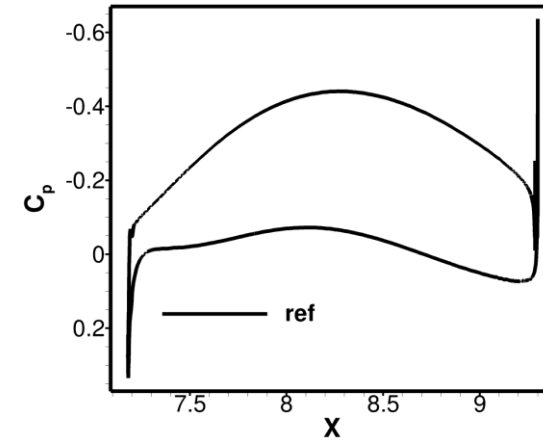
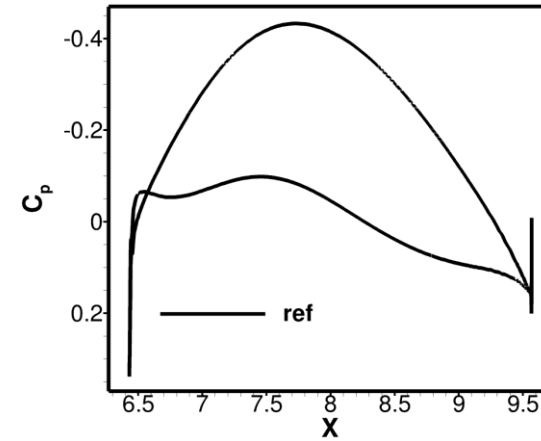
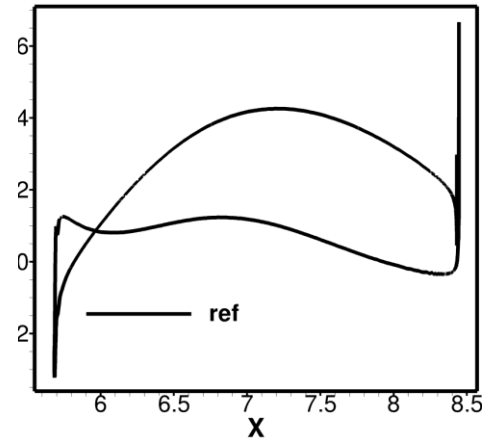
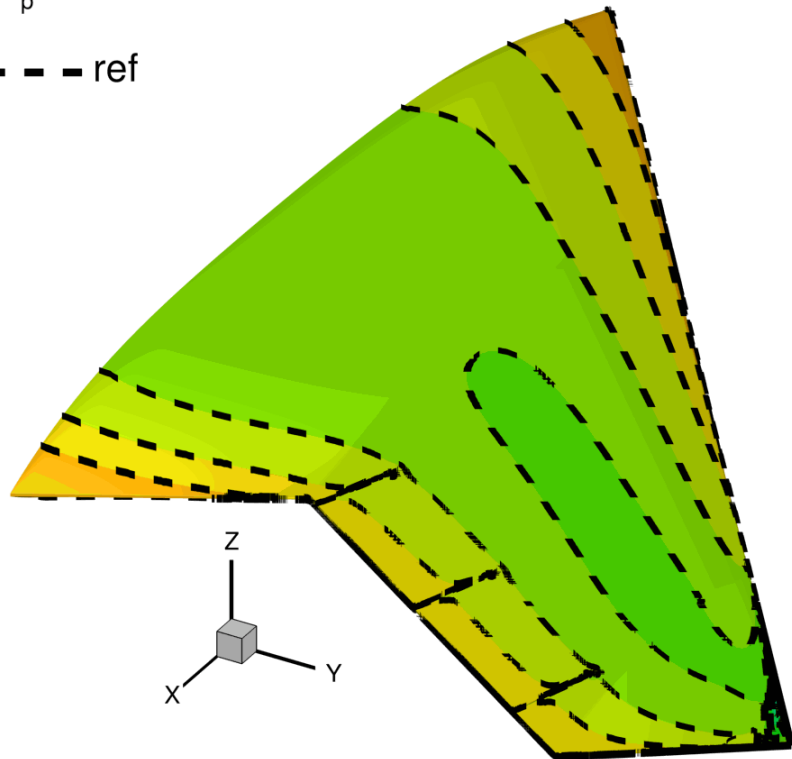


# MULDICON-Halbkonfiguration mit Innen- und Außenelevon TAU - Vergleich zwischen unterschiedliche Gitter

$$\delta_{RIB} = 0^\circ, \delta_{ROB} = 0^\circ$$

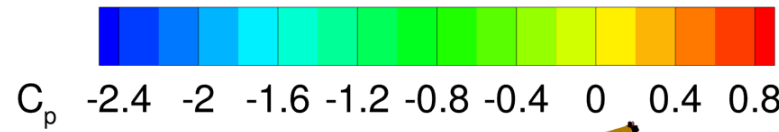


--- ref

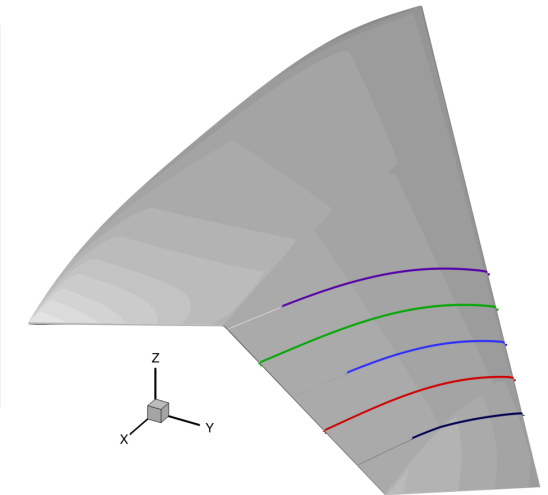
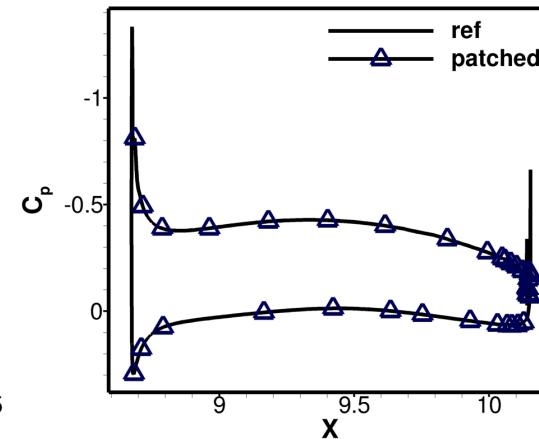
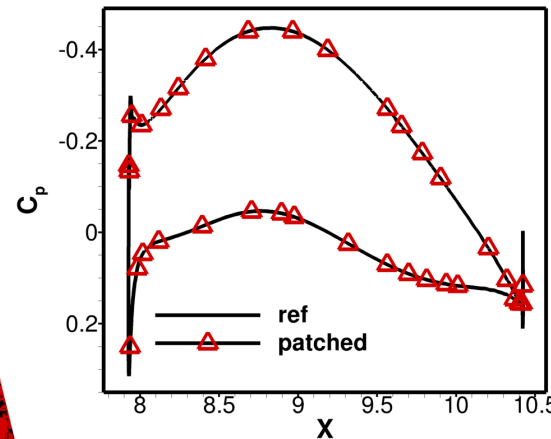
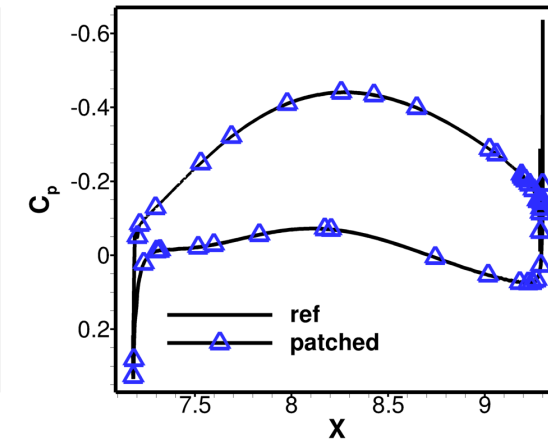
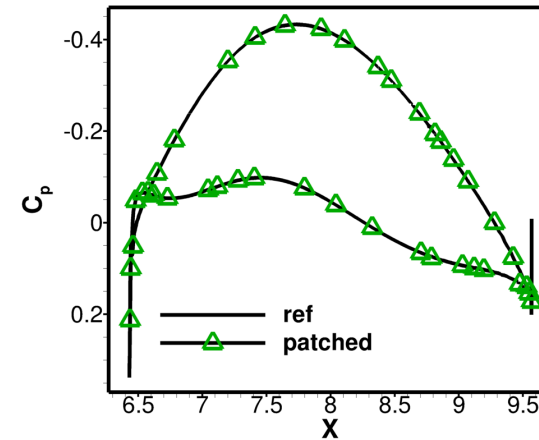
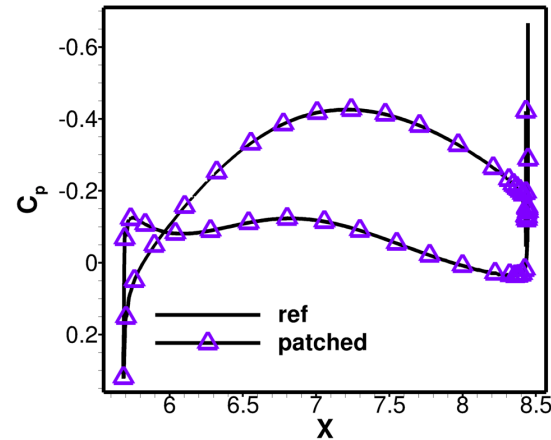
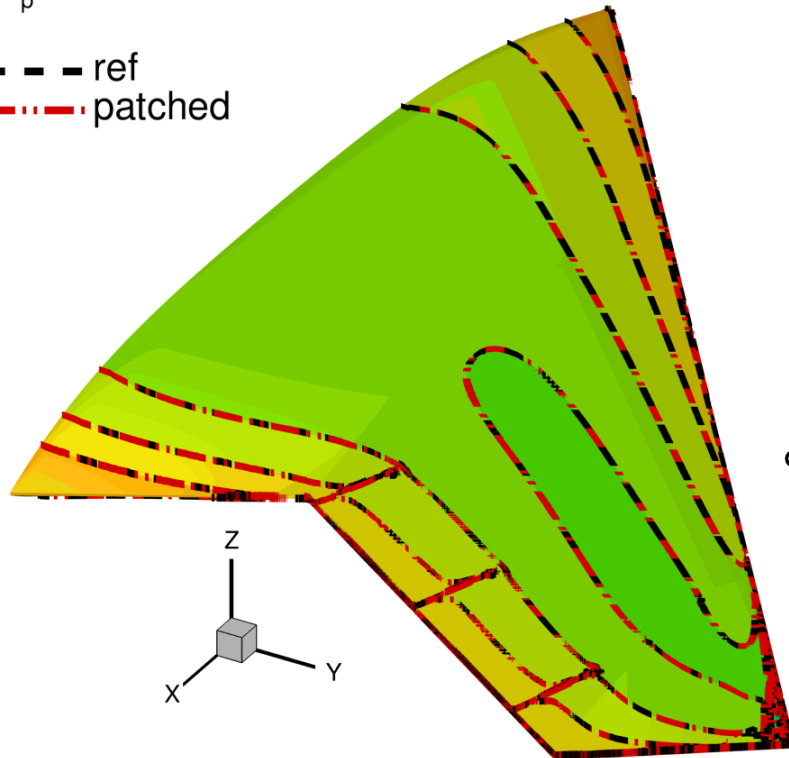


# MULDICON-Halbkonfiguration mit Innen- und Außenelevon TAU - Vergleich zwischen unterschiedliche Gitter

$$\delta_{RIB} = 0^\circ, \delta_{ROB} = 0^\circ$$

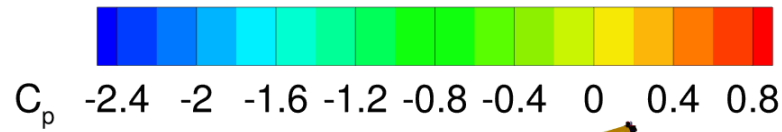


--- ref  
- - - patched

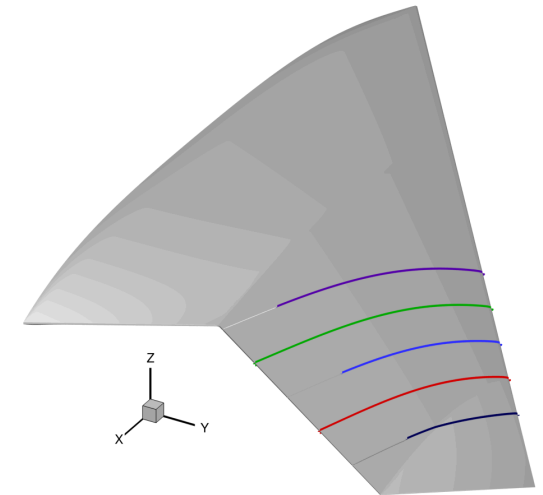
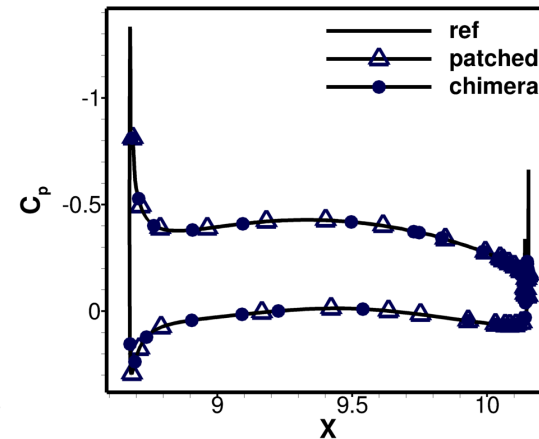
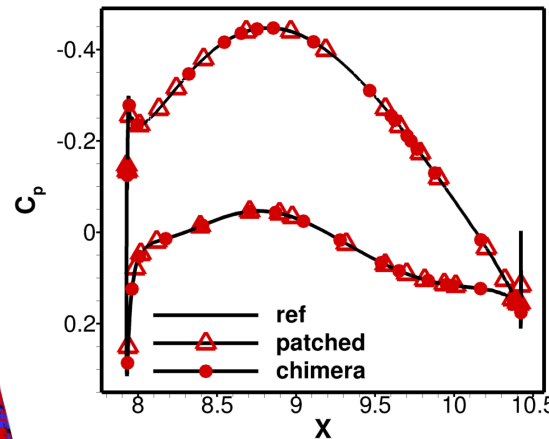
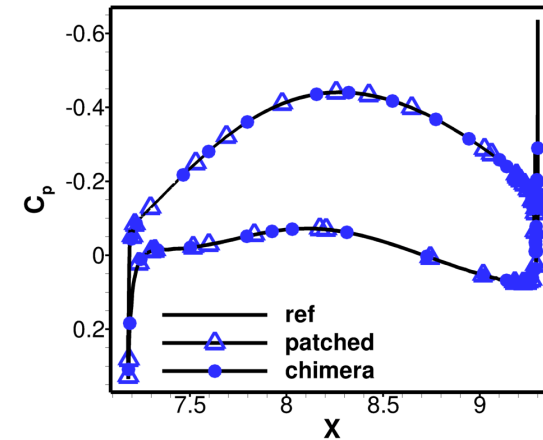
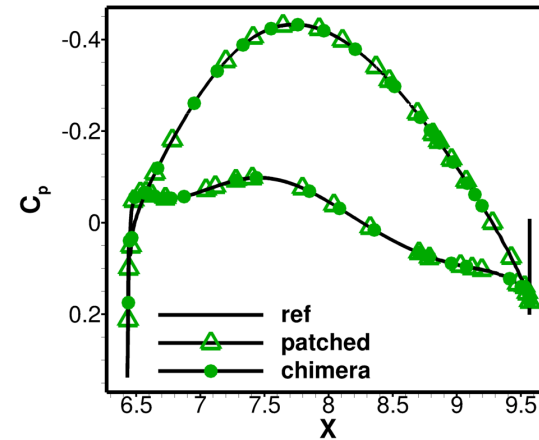
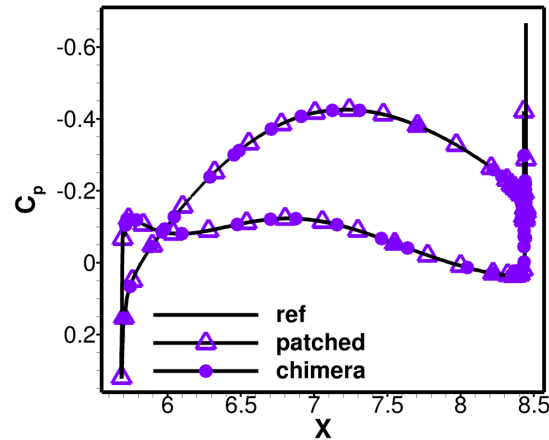
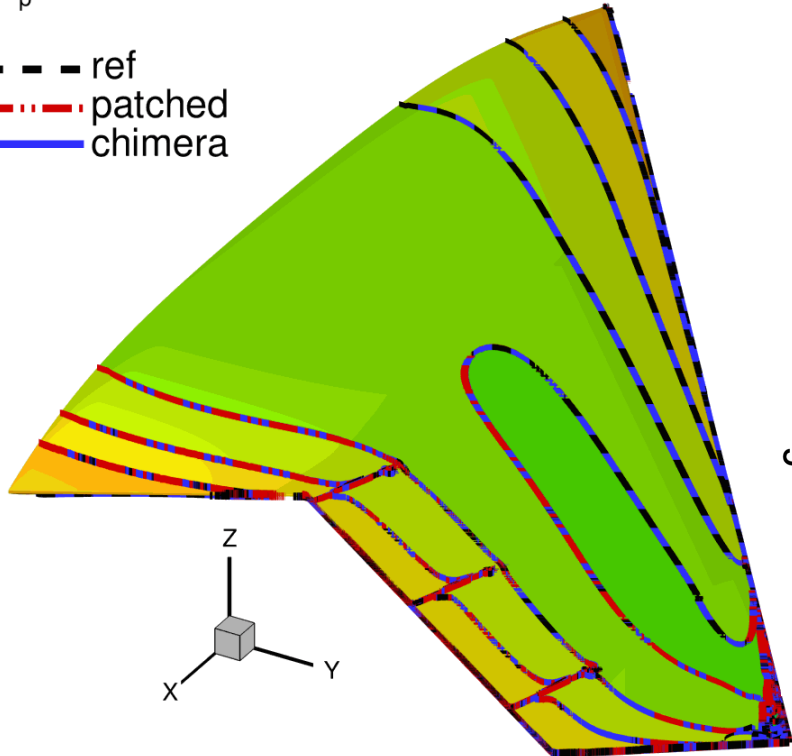


# MULDICON-Halbkonfiguration mit Innen- und Außenelevon TAU - Vergleich zwischen unterschiedliche Gitter

$$\delta_{RIB} = 0^\circ, \delta_{ROB} = 0^\circ$$



- - - ref  
 - . - . patched  
 - - - chimera





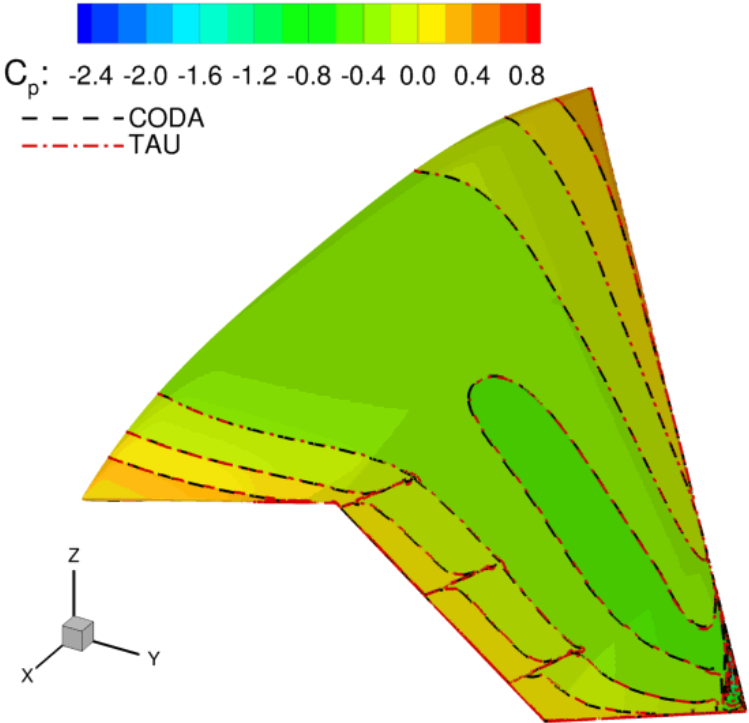
# MULDICON-Halbkonfiguration mit Innen- und Außenelevon

## Vergleich zwischen CODA und TAU für unterschiedliche Gitter

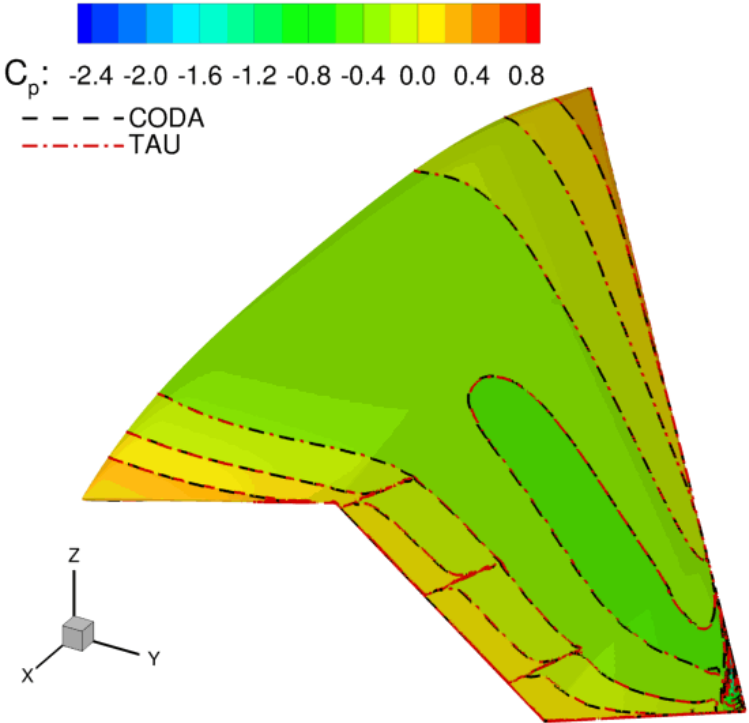


$\delta_{RIB} = 0^\circ, \delta_{ROB} = 0^\circ$

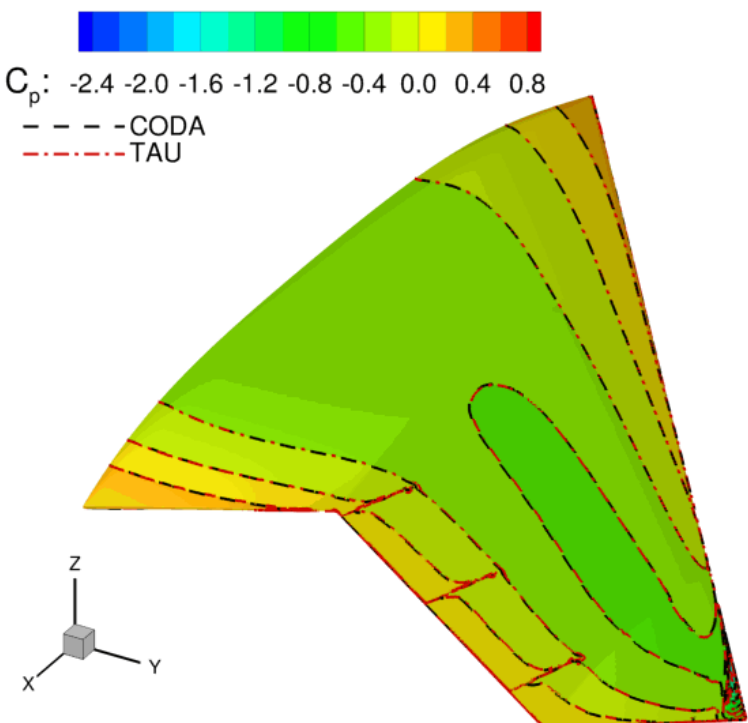
	TAU	CODA
Konvektiver Fluss	Zentral mit Matrixdissipation	Roe
Turbulenzmodell	SA-neg	SA-neg
Linearer Löser	3 SGS (2v)	20 GMRES - 100 Jacobi LU



Referenzgitter



Gepatchtes Gitter



Chimera Gitter



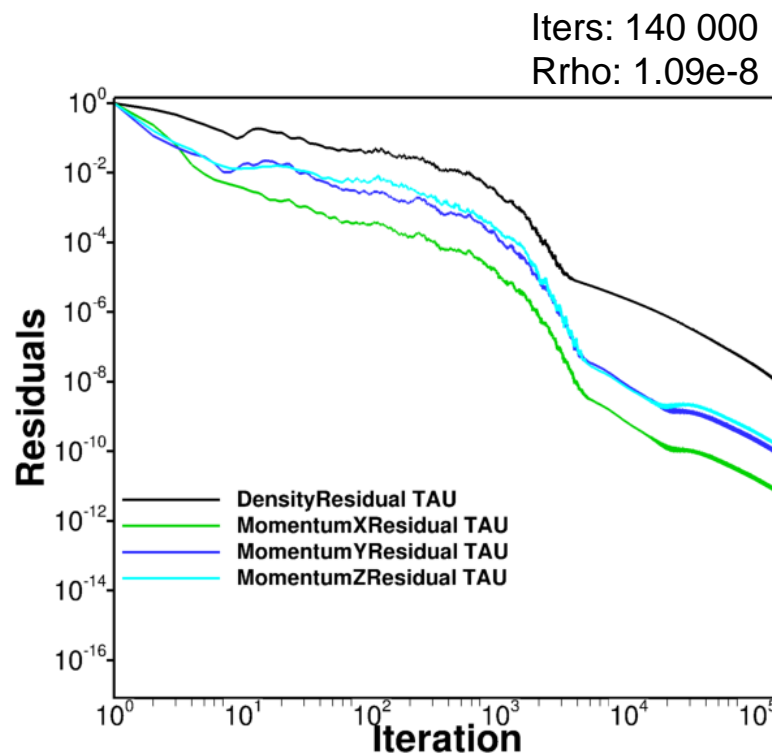
# MULDICON-Halbkonfiguration mit Innen- und Außenelevon

## Vergleich zwischen CODA und TAU für unterschiedliche Gitter



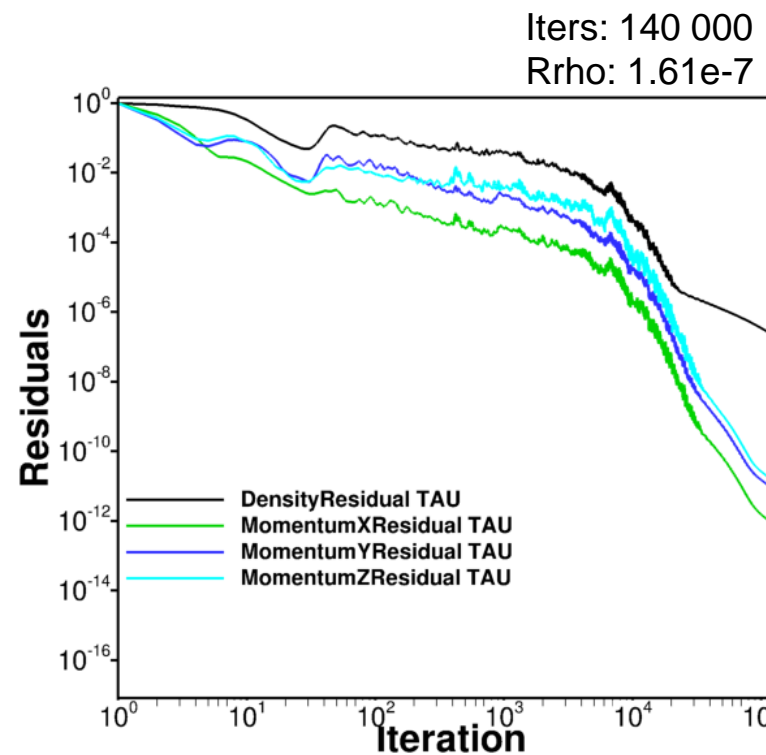
$$\delta_{RIB} = 0^\circ, \delta_{ROB} = 0^\circ$$

Referenzgitter



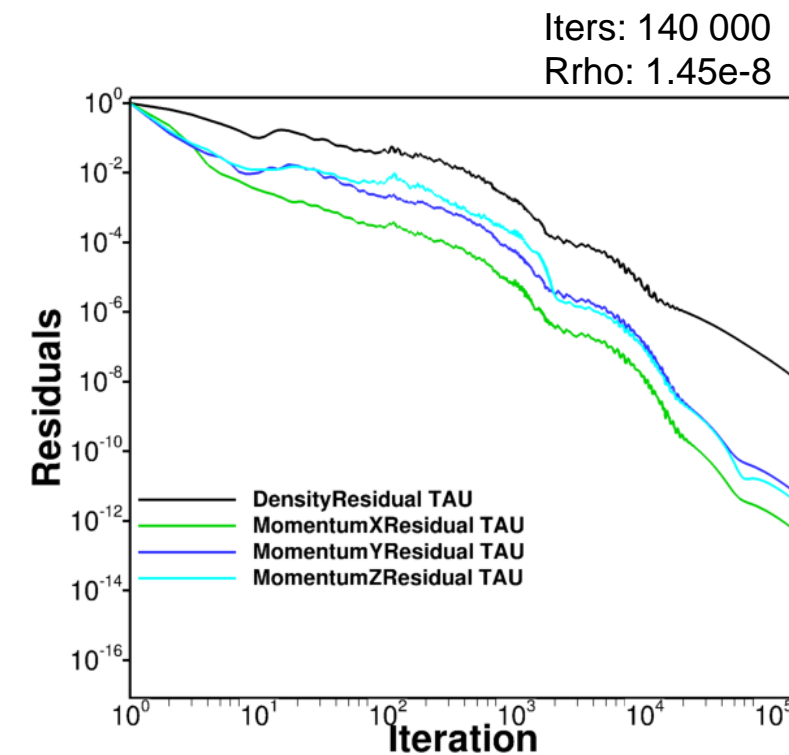
Kumulative CPU Zeit (h)  
TAU: 14 785

Gepatchtes Gitter



Kumulative CPU Zeit (h)  
TAU: 15 106

Chimera Gitter



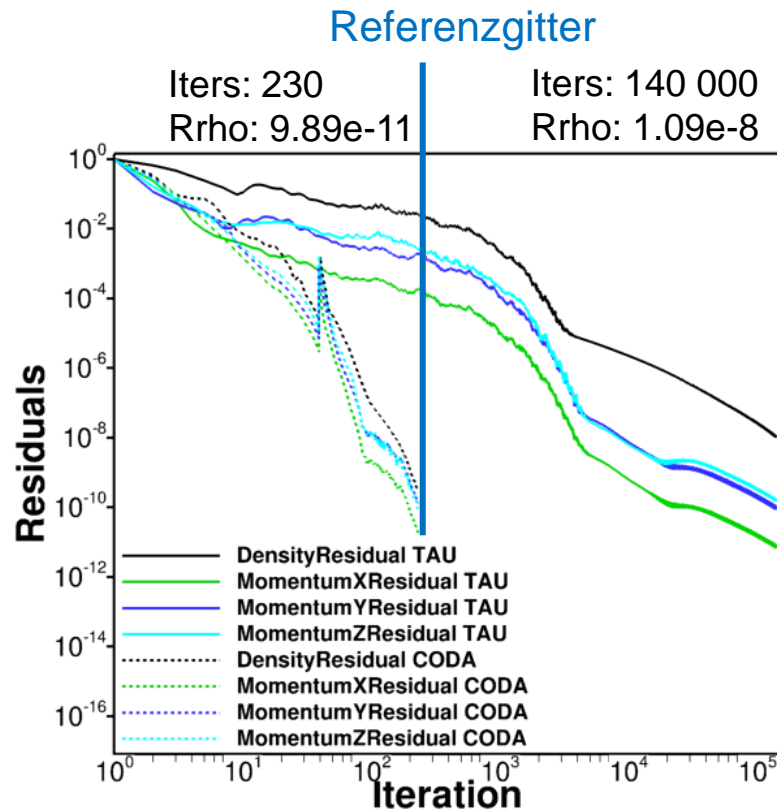
Kumulative CPU Zeit (h)  
TAU: 15 130

# MULDICON-Halbkonfiguration mit Innen- und Außenelevon

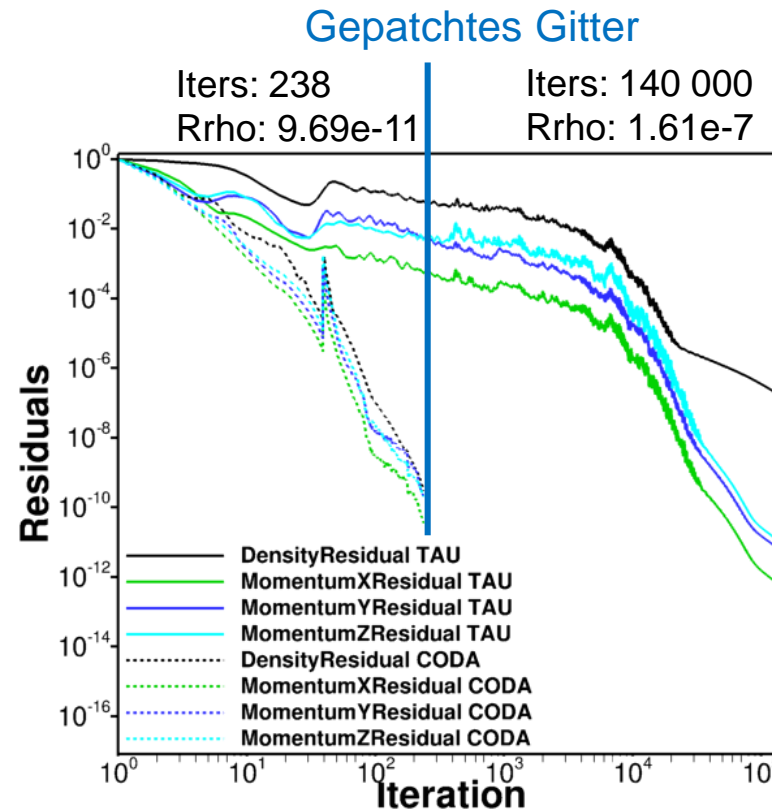
## Vergleich zwischen CODA und TAU für unterschiedliche Gitter



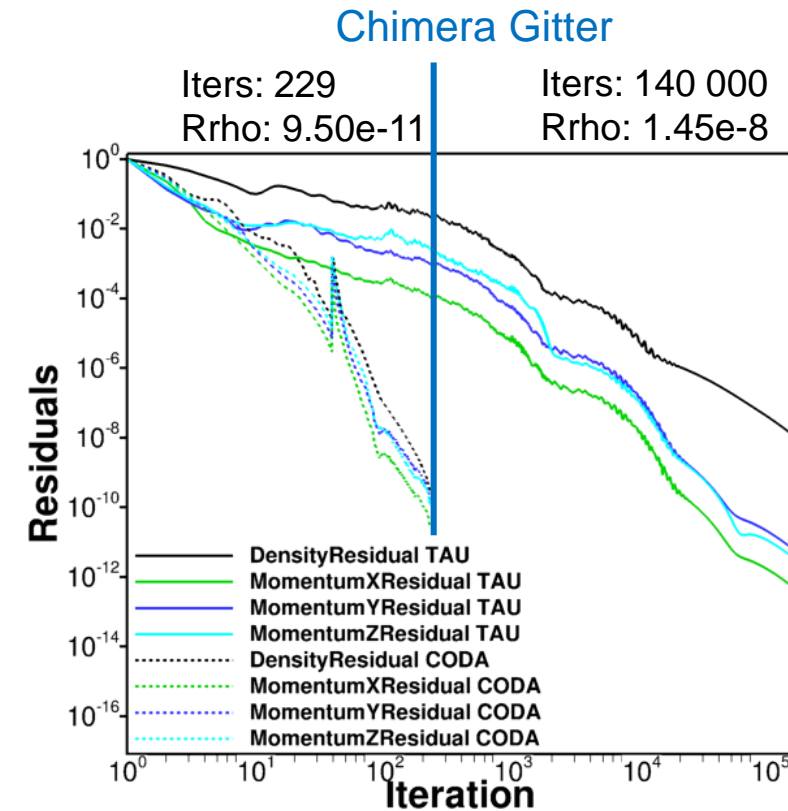
$$\delta_{RIB} = 0^\circ, \delta_{ROB} = 0^\circ$$



Kumulative CPU Zeit (h)  
TAU: 14 785  
CODA: 5 532



Kumulative CPU Zeit (h)  
TAU: 15 106  
CODA: 5 925



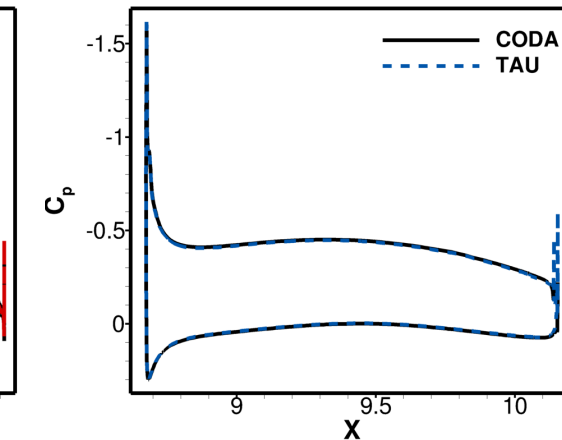
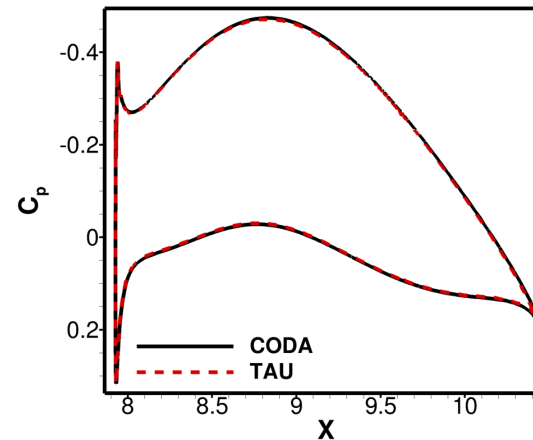
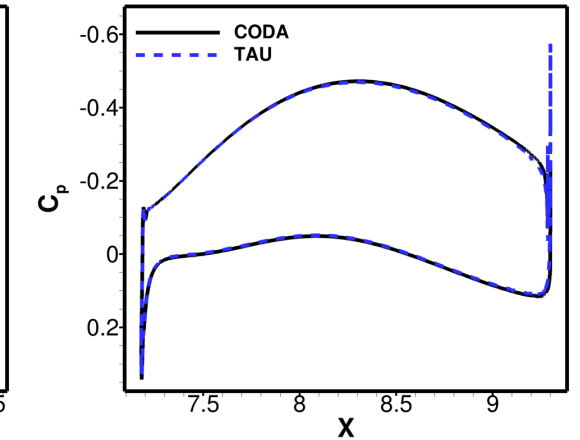
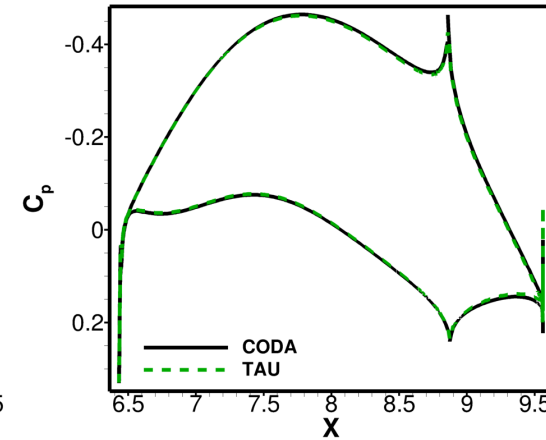
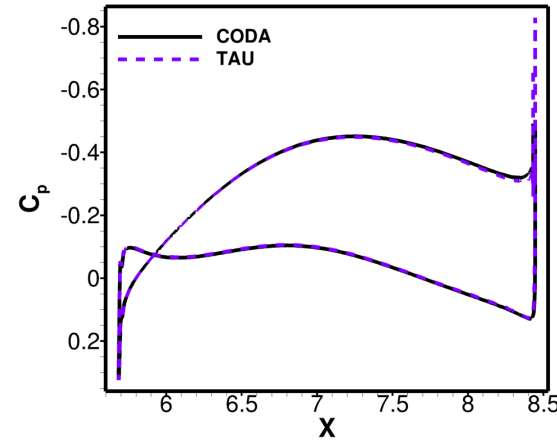
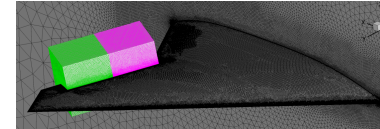
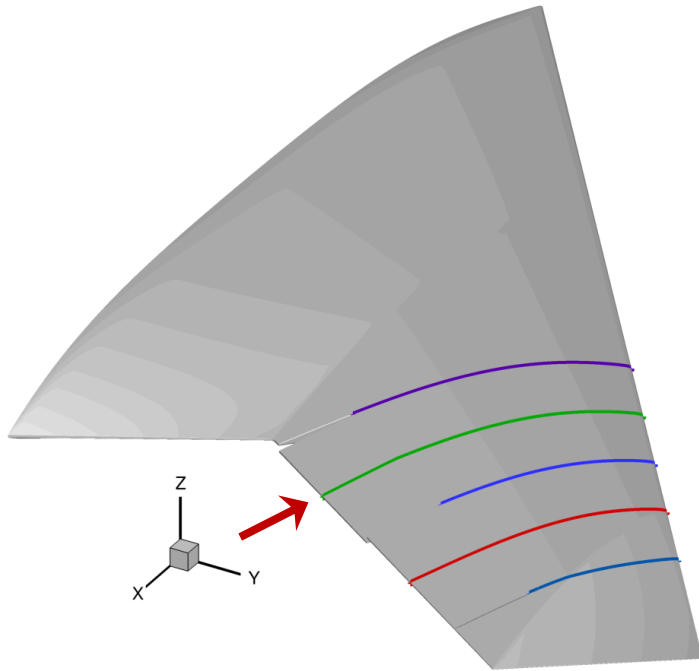
Kumulative CPU Zeit (h)  
TAU: 15 130  
CODA: 5 703

# MULDICON-Halbkonfiguration mit Innen- und Außenelevon

## Vergleich zwischen CODA und TAU

### Gepatchtes Gitter

$$\delta_{RIB} = 5^\circ, \delta_{ROB} = 0^\circ$$





# MULDICON-Halbkonfiguration mit Innen- und Außenelevon

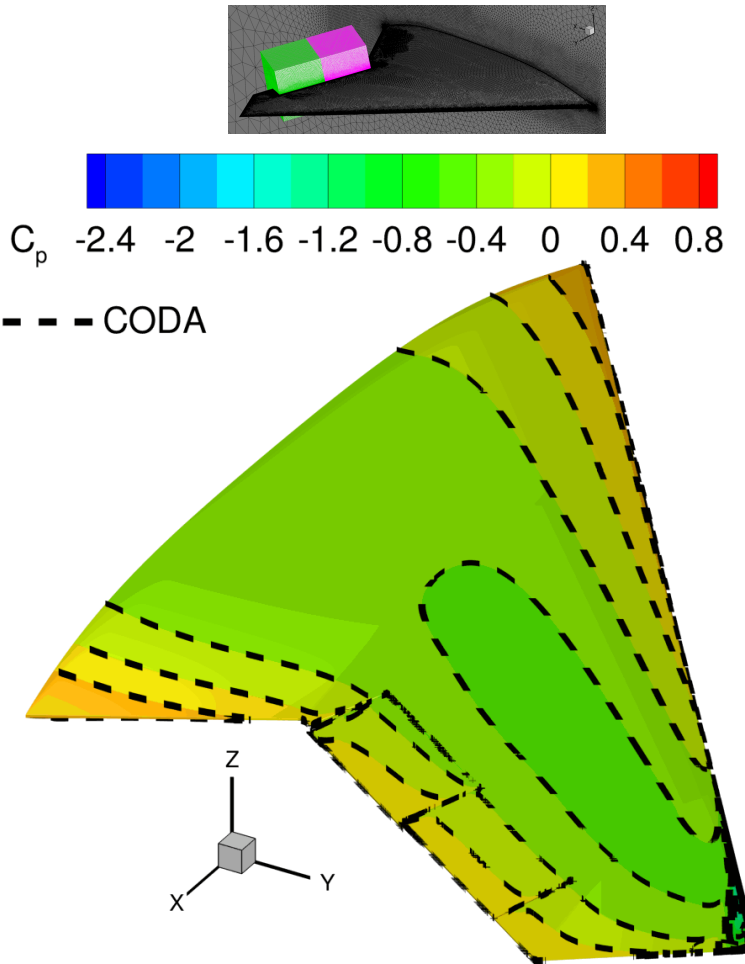
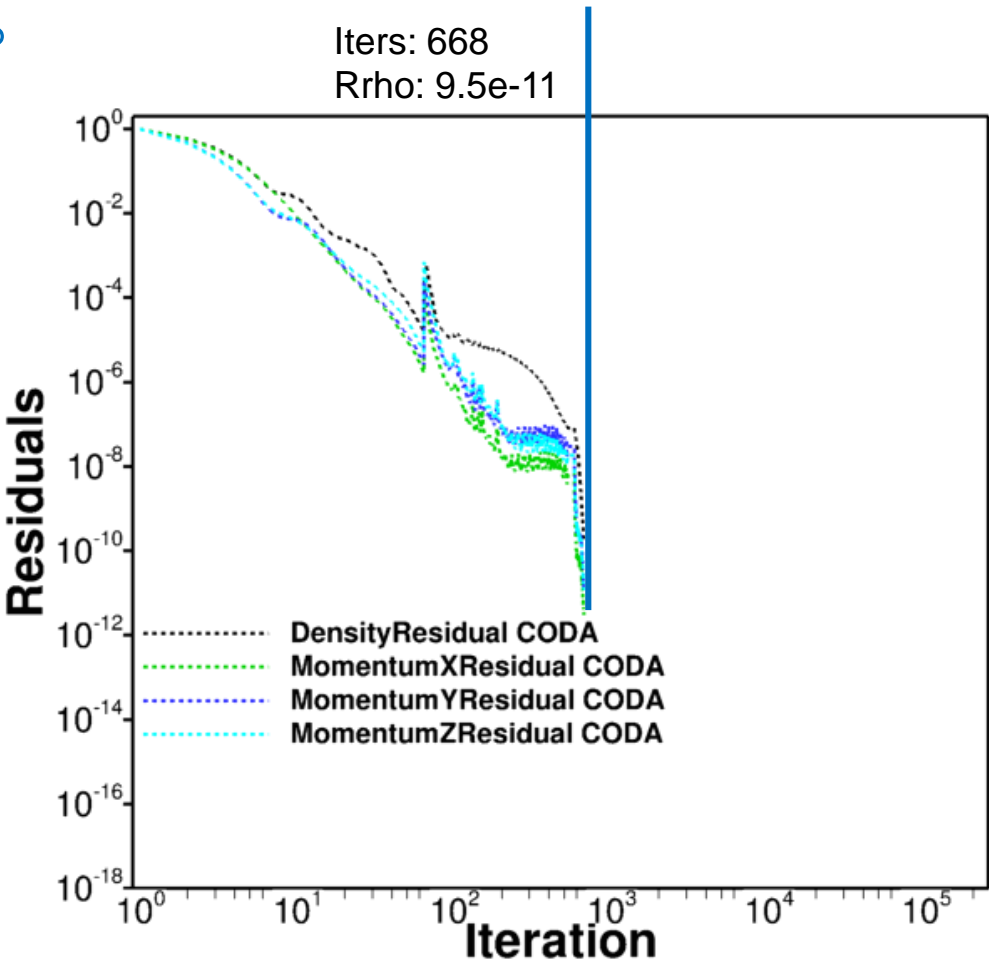
## Vergleich zwischen CODA und TAU



### Gepatchtes Gitter

$$\delta_{RIB} = 5^\circ, \delta_{ROB} = 0^\circ$$

Linearer Löser	
CODA	20 / 60 GMRES 200 / 400 Jacobi LU
TAU	
Kumulative CPU Zeit (h)	
CODA	52 918
TAU	
Anzahl Prozessoren	
CODA	20 * 16 (MPI) * 4 (OpenMP) = 1280
TAU	
Zeit bis zur Lösung (h)	
CODA	41.34
TAU	



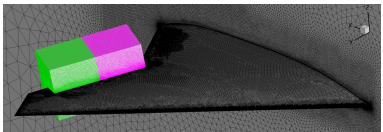
# MULDICON-Halbkonfiguration mit Innen- und Außenelevon

## Vergleich zwischen CODA und TAU

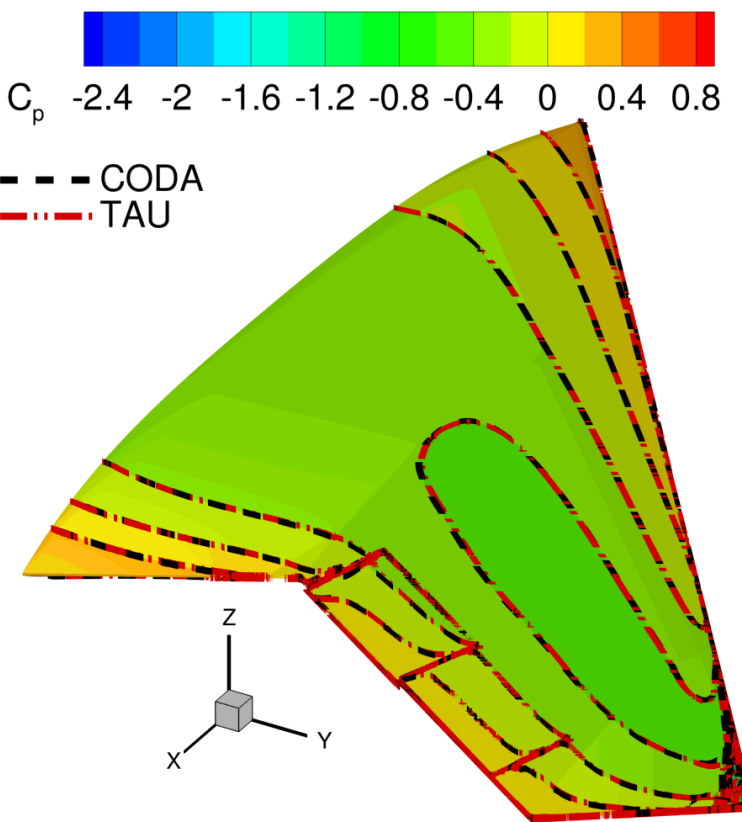
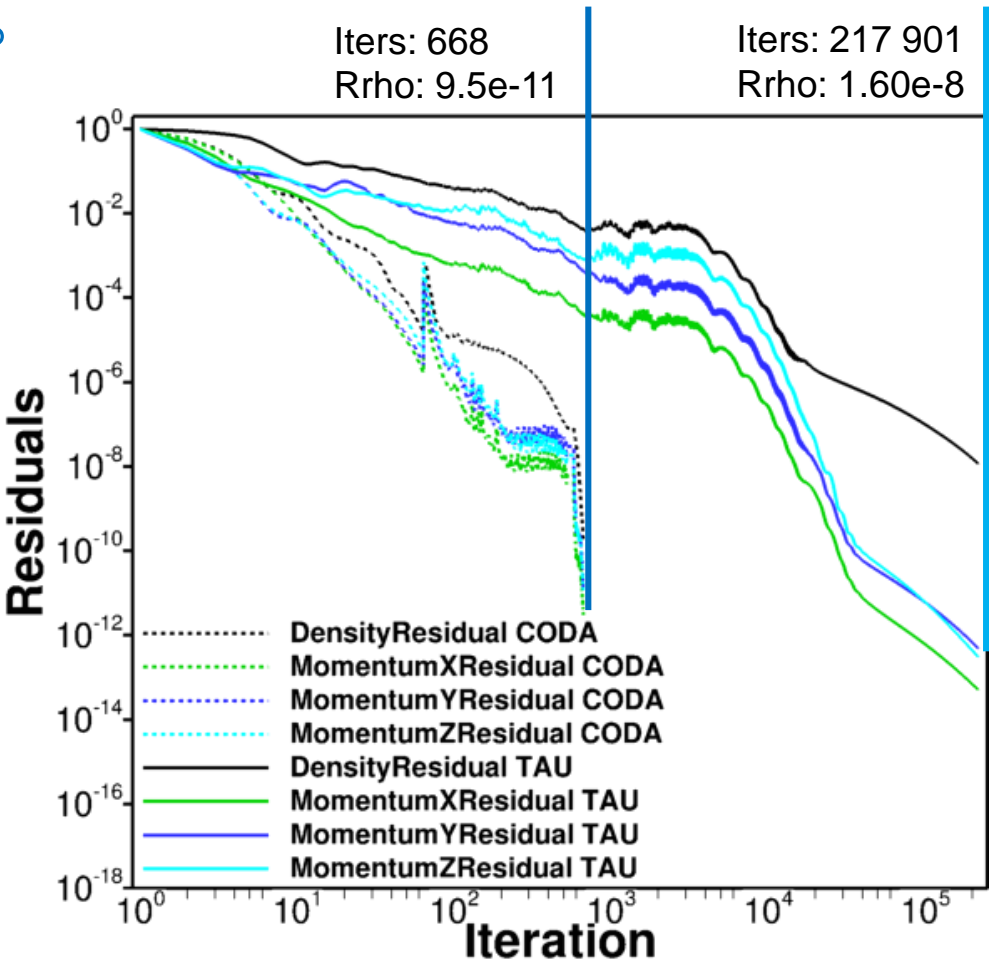


### Gepatchtes Gitter

$\delta_{RIB} = 5^\circ, \delta_{ROB} = 0^\circ$



Linearer Löser	
CODA	20 / 60 GMRES 200 / 400 Jacobi LU
TAU	SGS 3 (3w++)
Kumulative CPU Zeit (h)	
CODA	52 918
TAU	33 766
Anzahl Prozessoren	
CODA	20 * 16 (MPI) * 4 (OpenMP) = 1280
TAU	4 * 64 (MPI) = 256
Zeit bis zur Lösung (h)	
CODA	41.34
TAU	131.90

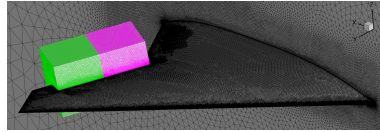


# MULDICON-Halbkonfiguration mit Innen- und Außenelevon

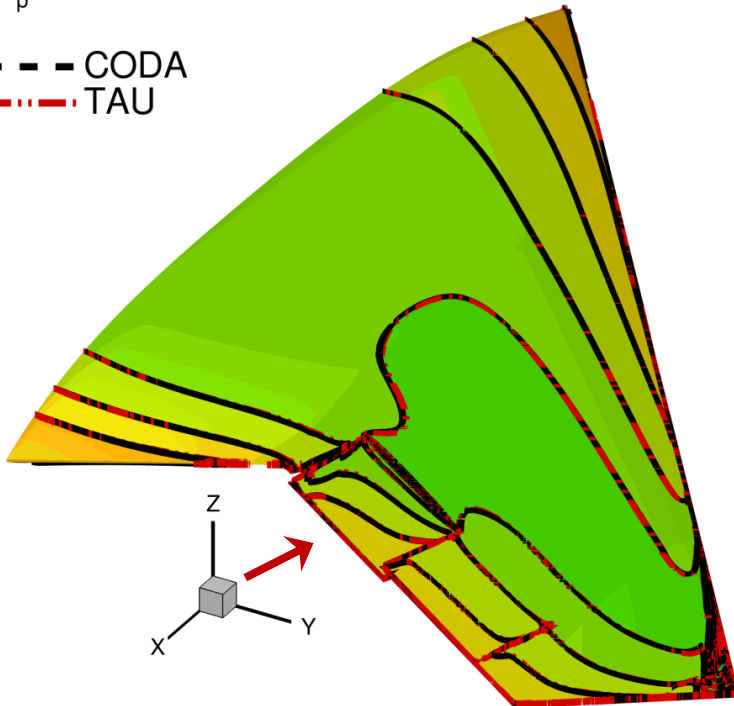
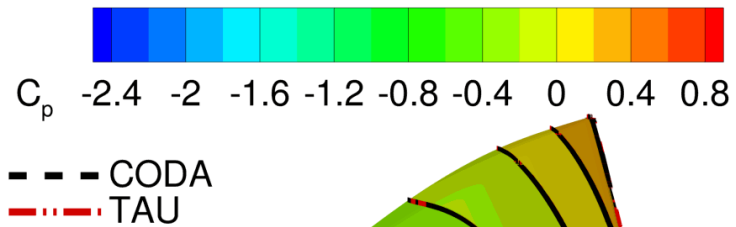
## Vergleich zwischen CODA und TAU



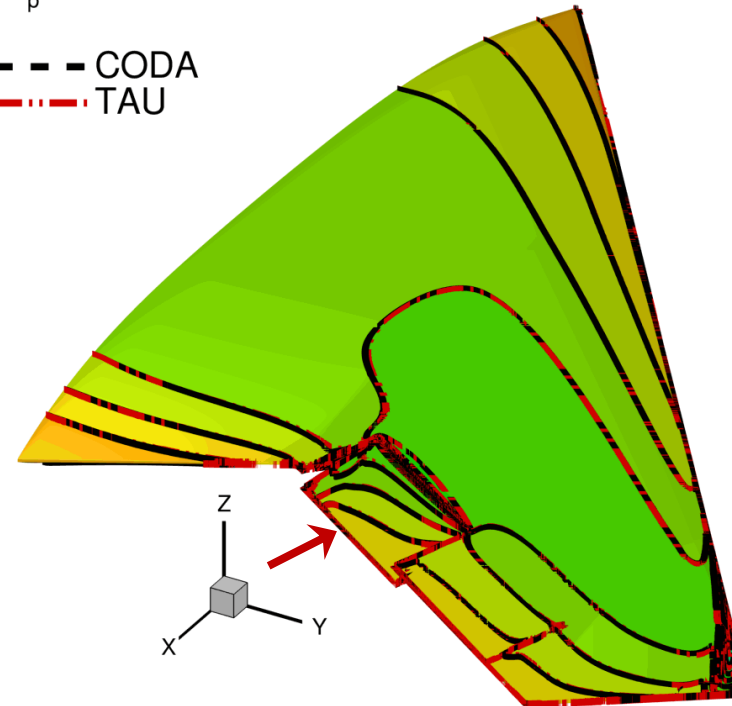
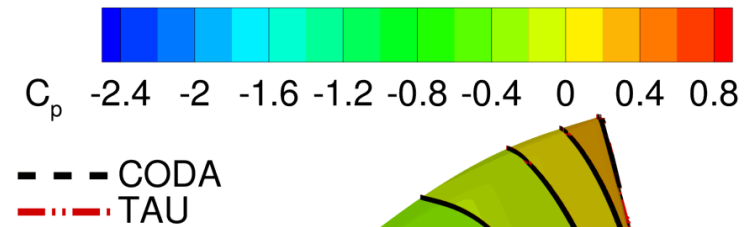
### Gepatchtes Gitter



$$\delta_{RIB} = 10^\circ, \delta_{ROB} = 0^\circ$$



$$\delta_{RIB} = 15^\circ, \delta_{ROB} = 0^\circ$$

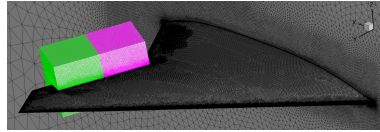


# MULDICON-Halbkonfiguration mit Innen- und Außenelevon

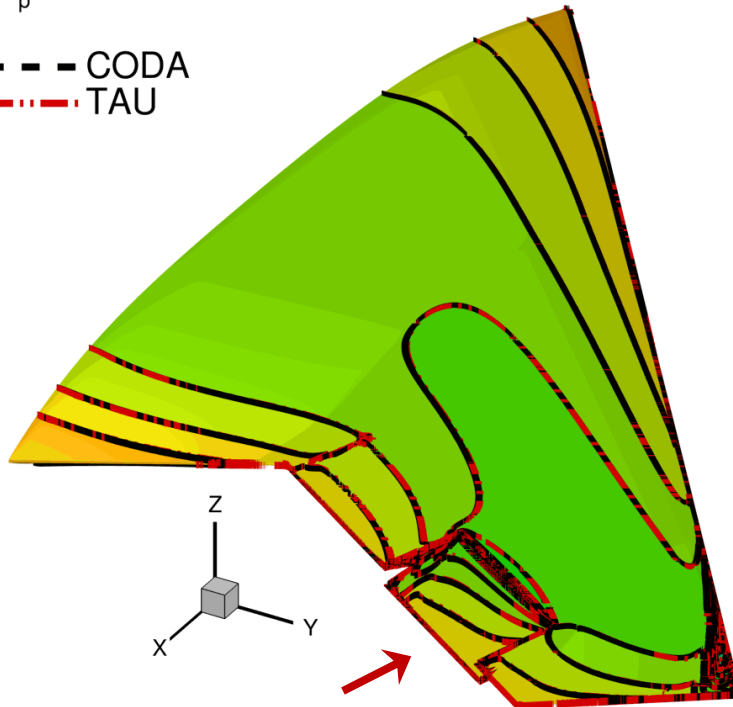
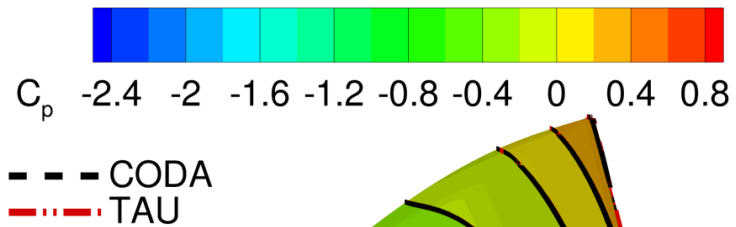
## Vergleich zwischen CODA und TAU



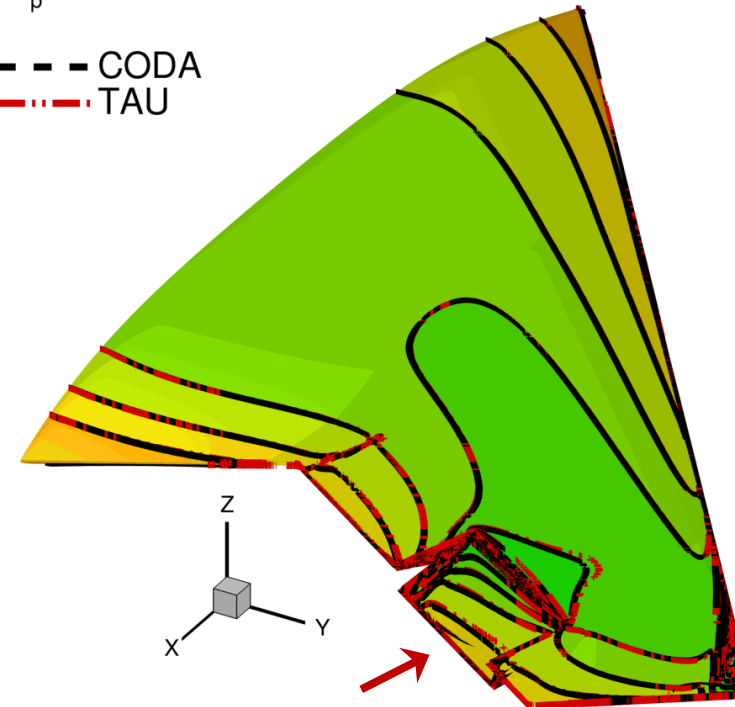
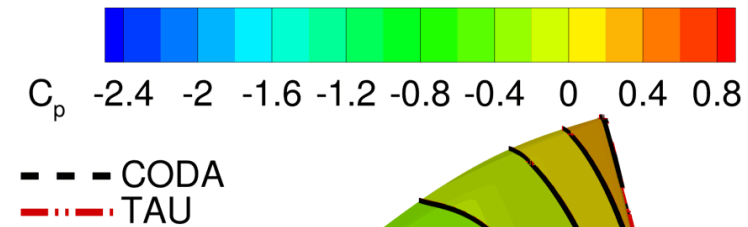
### Gepatchtes Gitter



$$\delta_{RIB} = 0^\circ, \delta_{ROB} = 15^\circ$$



$$\delta_{RIB} = 0^\circ, \delta_{ROB} = 20^\circ$$



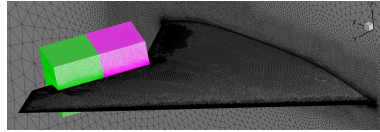


# MULDICON-Halbkonfiguration mit Innen- und Außenelevon

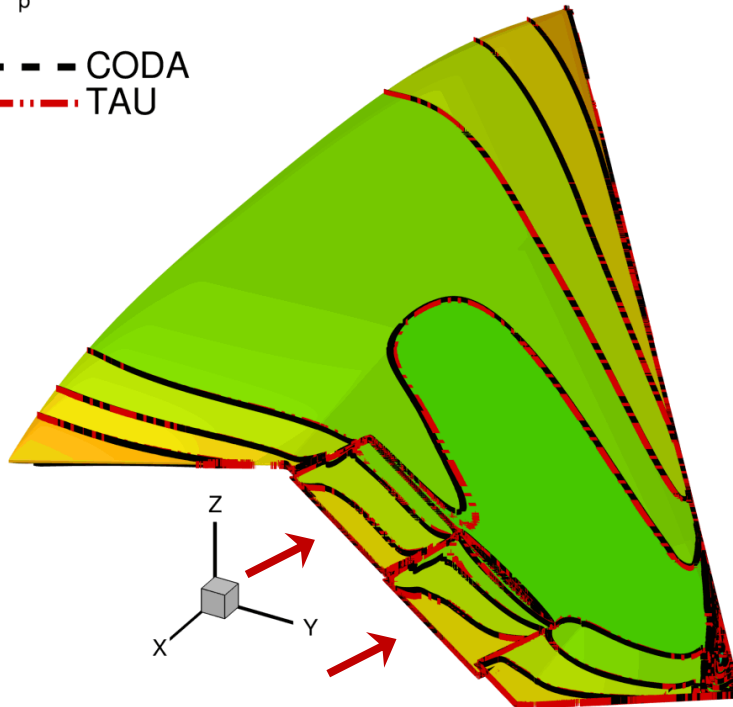
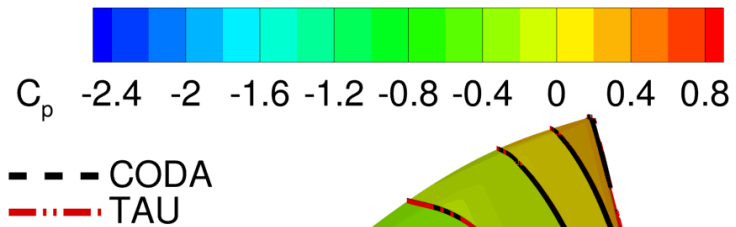
## Vergleich zwischen CODA und TAU – Gepatchtes Gitter



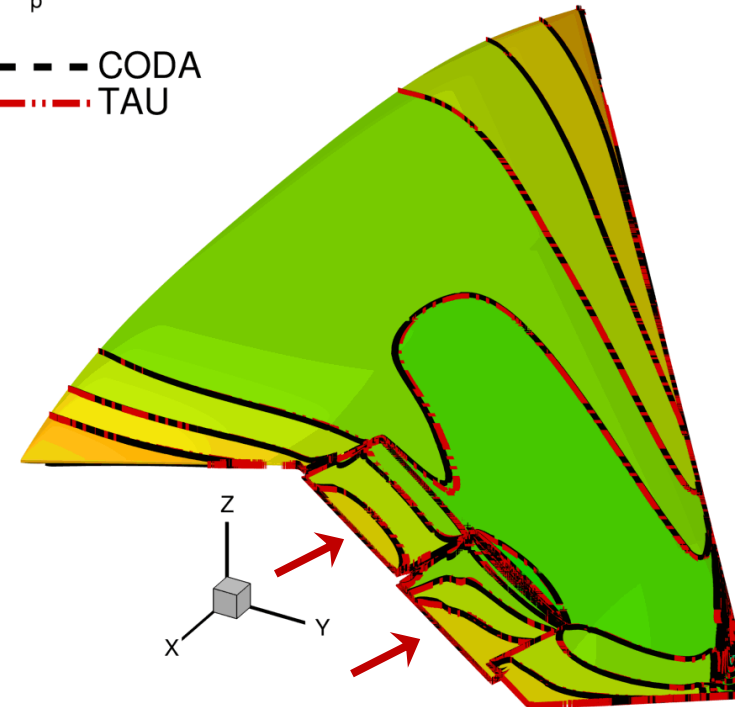
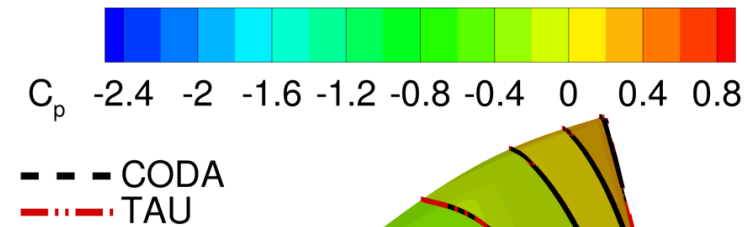
### Gepatchtes Gitter



$$\delta_{RIB} = 5^\circ, \delta_{ROB} = 10^\circ$$



$$\delta_{RIB} = 5^\circ, \delta_{ROB} = 15^\circ$$



# MULDICON-Halbkonfiguration mit Innen- und Außenelevon

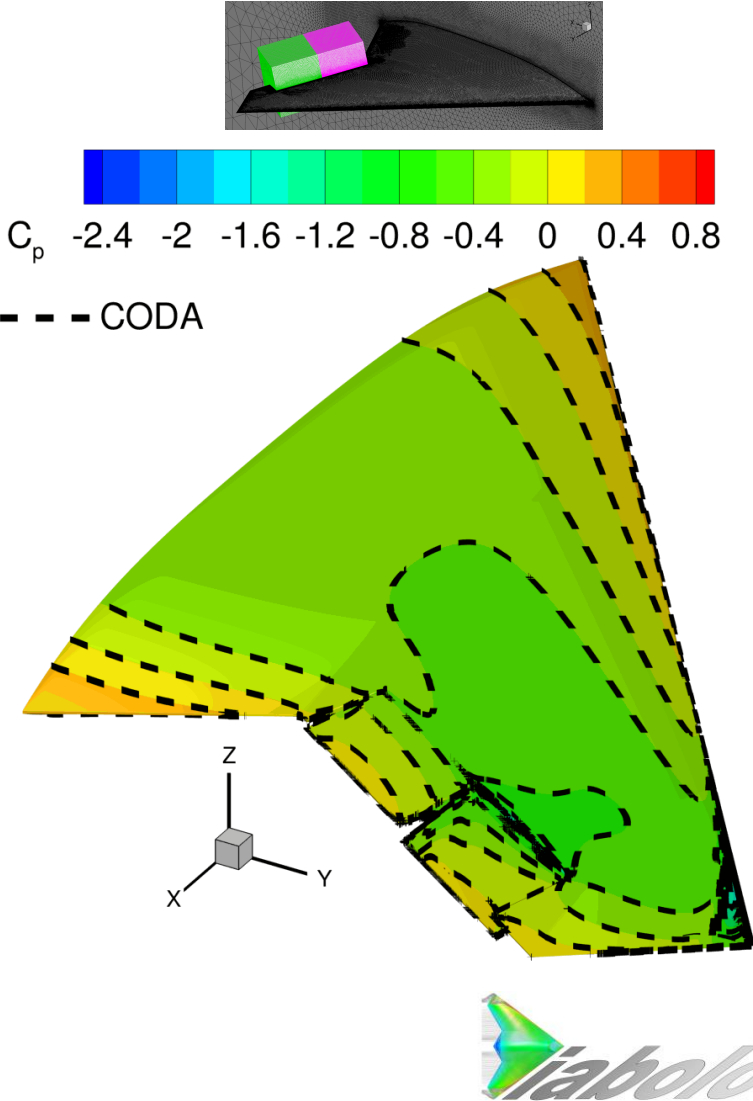
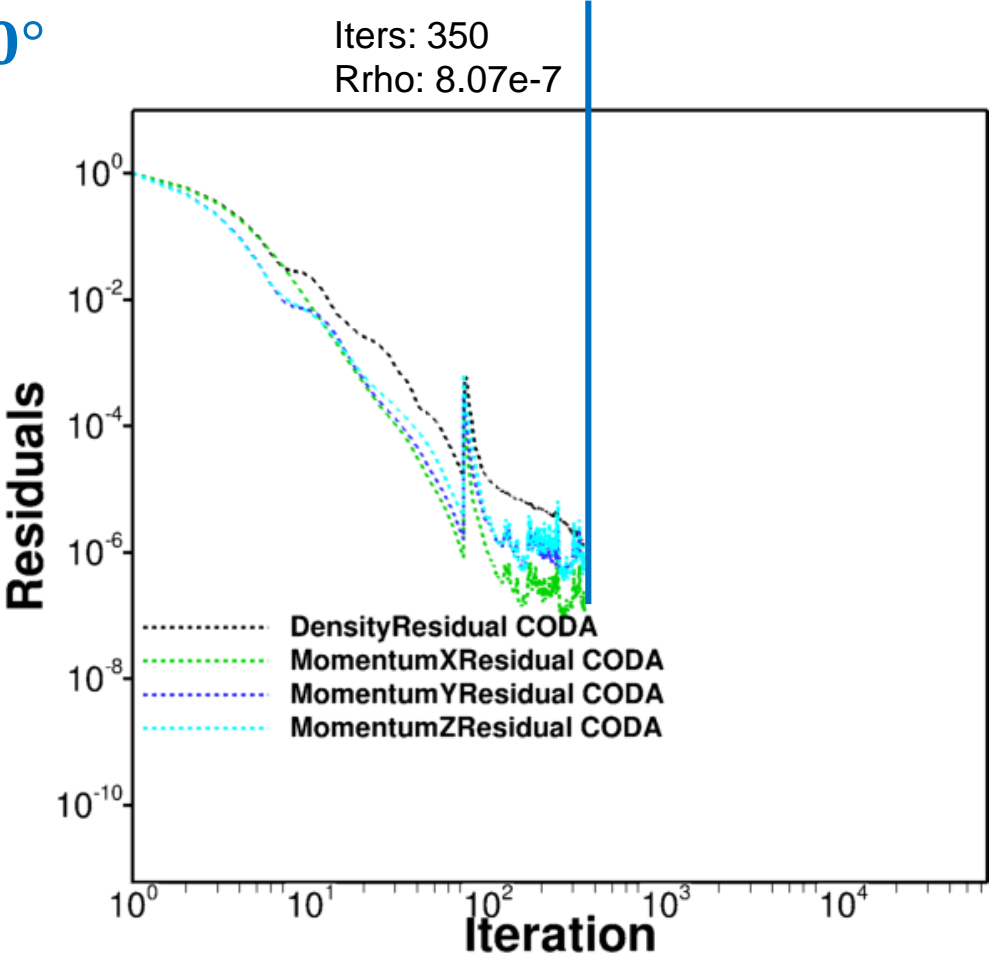
## Vergleich zwischen CODA und TAU – Gepatchtes Gitter



### Gepatchtes Gitter

$$\delta_{RIB} = 5^\circ, \delta_{ROB} = 20^\circ$$

Linearer Löser	
CODA	60 GMRES 400 Jacobi LU
TAU	
Kumulative CPU Zeit (h)	
CODA	85 000
TAU	
Anzahl Prozessoren	
CODA	20 * 16 (MPI) * 4 (OpenMP) = 1280
TAU	
Zeit bis zur Lösung (h)	
CODA	66.4
TAU	



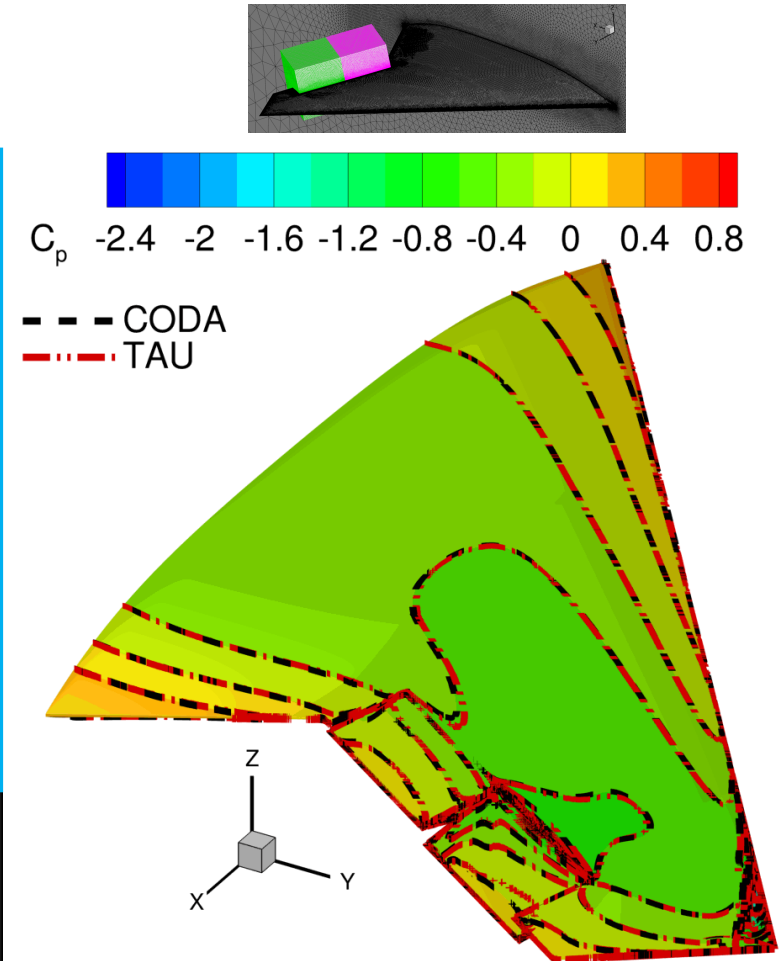
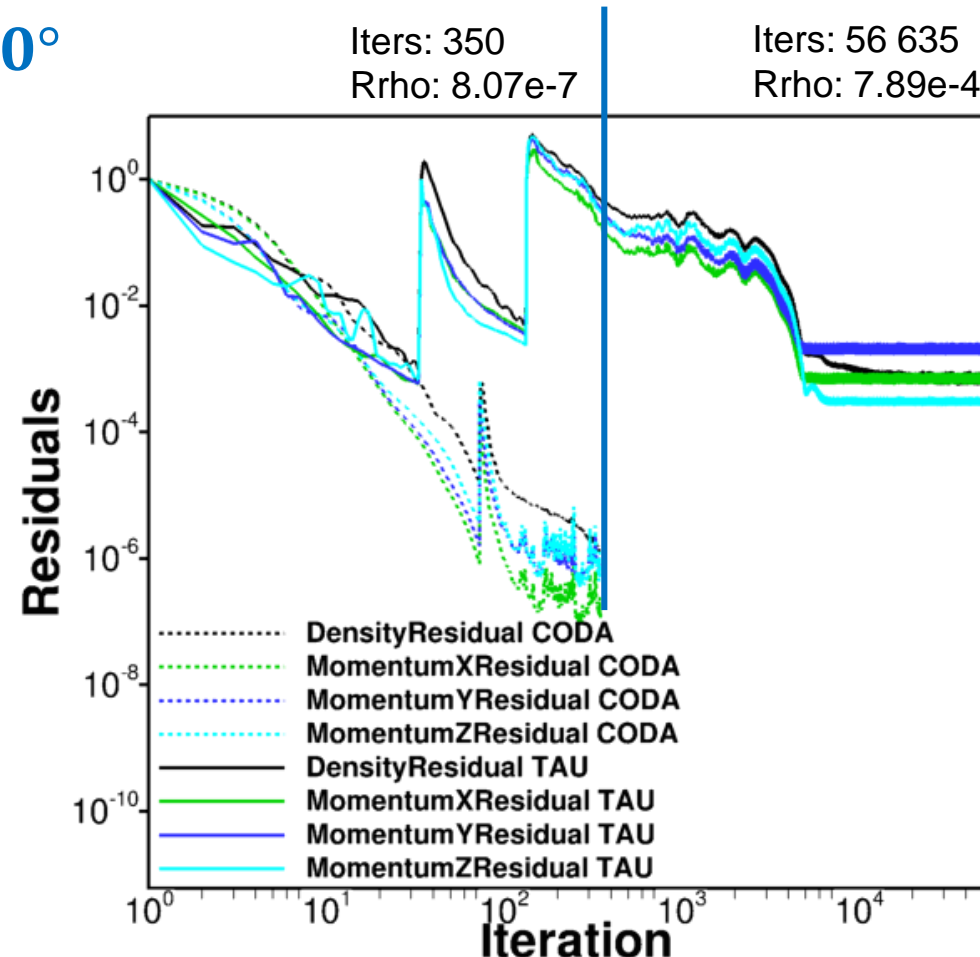
# MULDICON-Halbkonfiguration mit Innen- und Außenelevon

## Vergleich zwischen CODA und TAU – Gepatchtes Gitter

### Gepatchtes Gitter

$$\delta_{RIB} = 5^\circ, \delta_{ROB} = 20^\circ$$

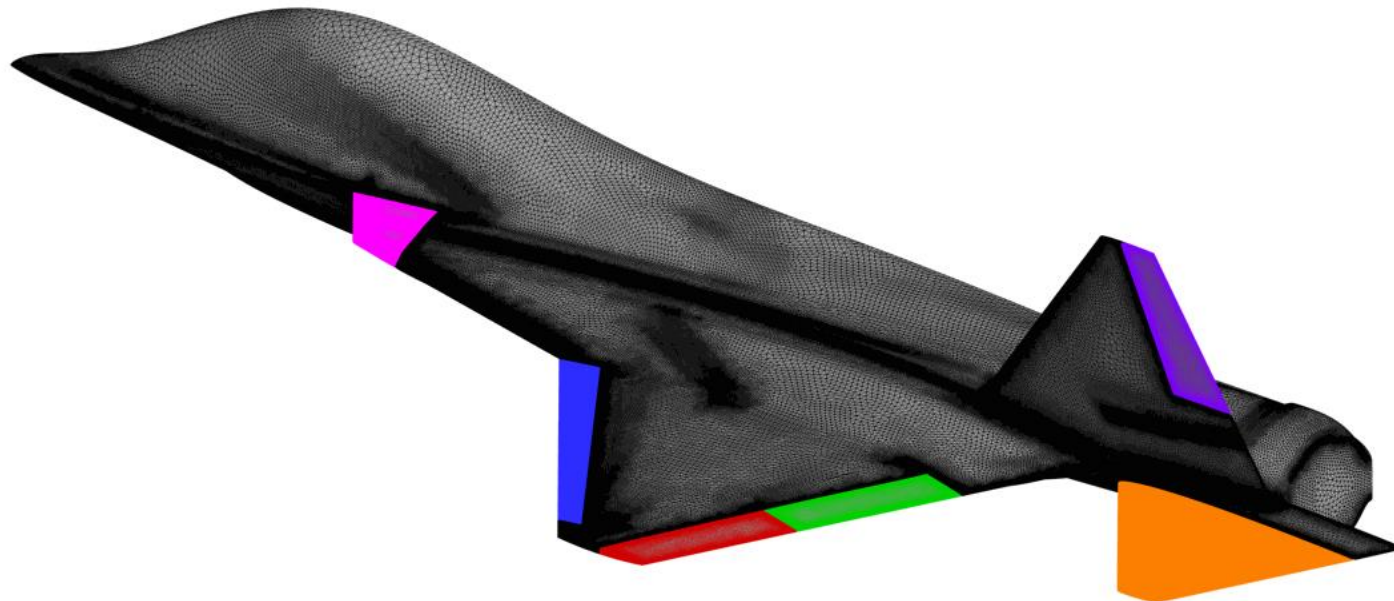
Linearer Löser	
CODA	60 GMRES 400 Jacobi LU
TAU	SGS 3 (3w++ start level = 3)
Kumulative CPU Zeit (h)	
CODA	85 000
TAU	6 155
Anzahl Prozessoren	
CODA	20 * 16 (MPI) * 4 (OpenMP) = 1280
TAU	4 * 64 (MPI) = 256
Zeit bis zur Lösung (h)	
CODA	66.4
TAU	35.0



- Modellierung von Steuerflächen kann mit zwei verschiedenen Gitteransätzen durchgeführt werden:
  - Mit überlappenden Bereiche
  - Ohne überlappende Bereiche
- Hybrider Ansatz zur Netzdeformation gewährleistet schnelle und robuste Netzdeformation.
- MULDICON-Halbkonfiguration wurde für verschiedene Kombinationen von Ausschlagwinkeln für das innere und äußere Elevon getestet:
  - Vergleichbare Ergebnisse wurden mit TAU und CODA erreicht.
  - CODA hat den Vorteil, über stärkere lineare Löser zu verfügen, was in der Regel zu besseren Konvergenzverläufen führt.
  - Die parallele Skalierbarkeit von CODA ist aufgrund des hybriden Parallelisierungsansatzes besser.
- Die Implementierung eines Gleitränderalgorithmus war von Anfang an eine Priorität in CODA. In TAU ist ein solcher Algorithmus erst seit Ende 2021 verfügbar.



- Sobald der ALE-Algorithmus in CODA verfügbar ist, wird ein Vergleich zwischen TAU und CODA für bewegliche Steuerflächen durchgeführt.
- Die mit der MULDICON-Konfiguration gewonnenen Erkenntnisse werden als Grundlage für die Untersuchung der FFD-Konfiguration mit 6 Steuerflächen verwendet.



Thema: **DLRK 2022 Diabolo-Sondersitzung:**  
Modellierung beweglicher Steuerflächen militärischer  
Konfigurationen: ein Vergleich zwischen numerischen  
Methoden und CFD-Lösern

Datum: 29.09.2022

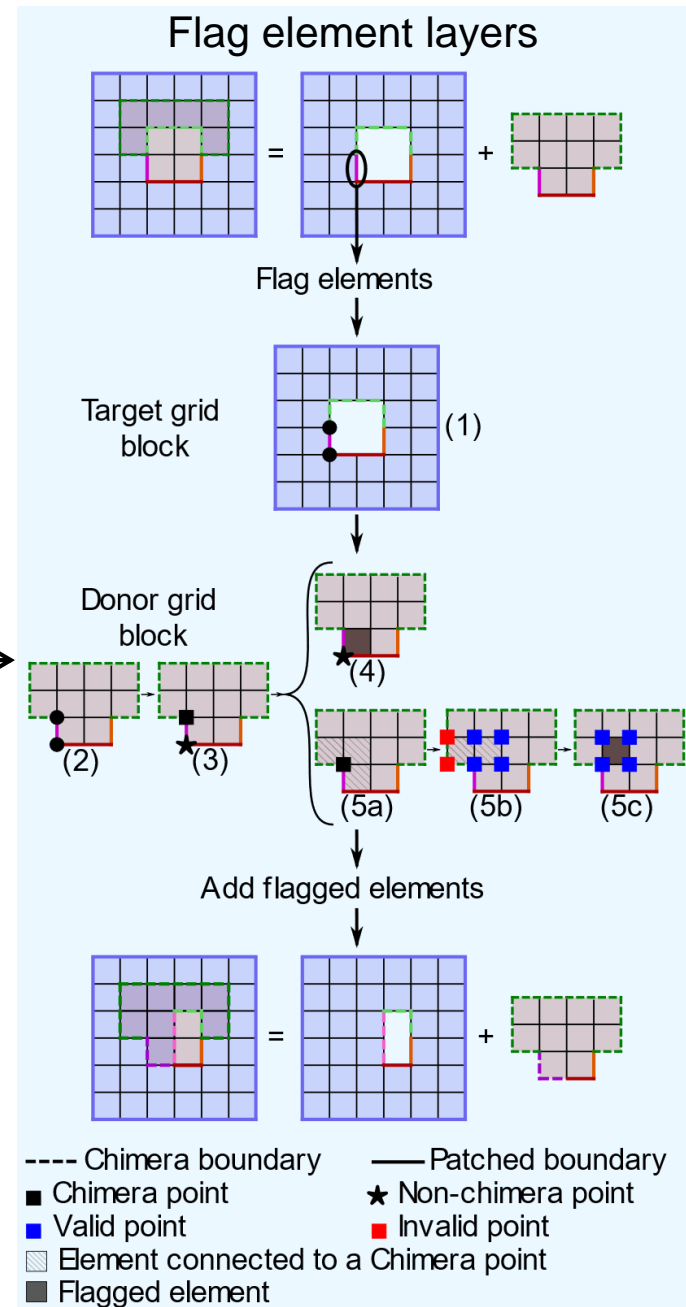
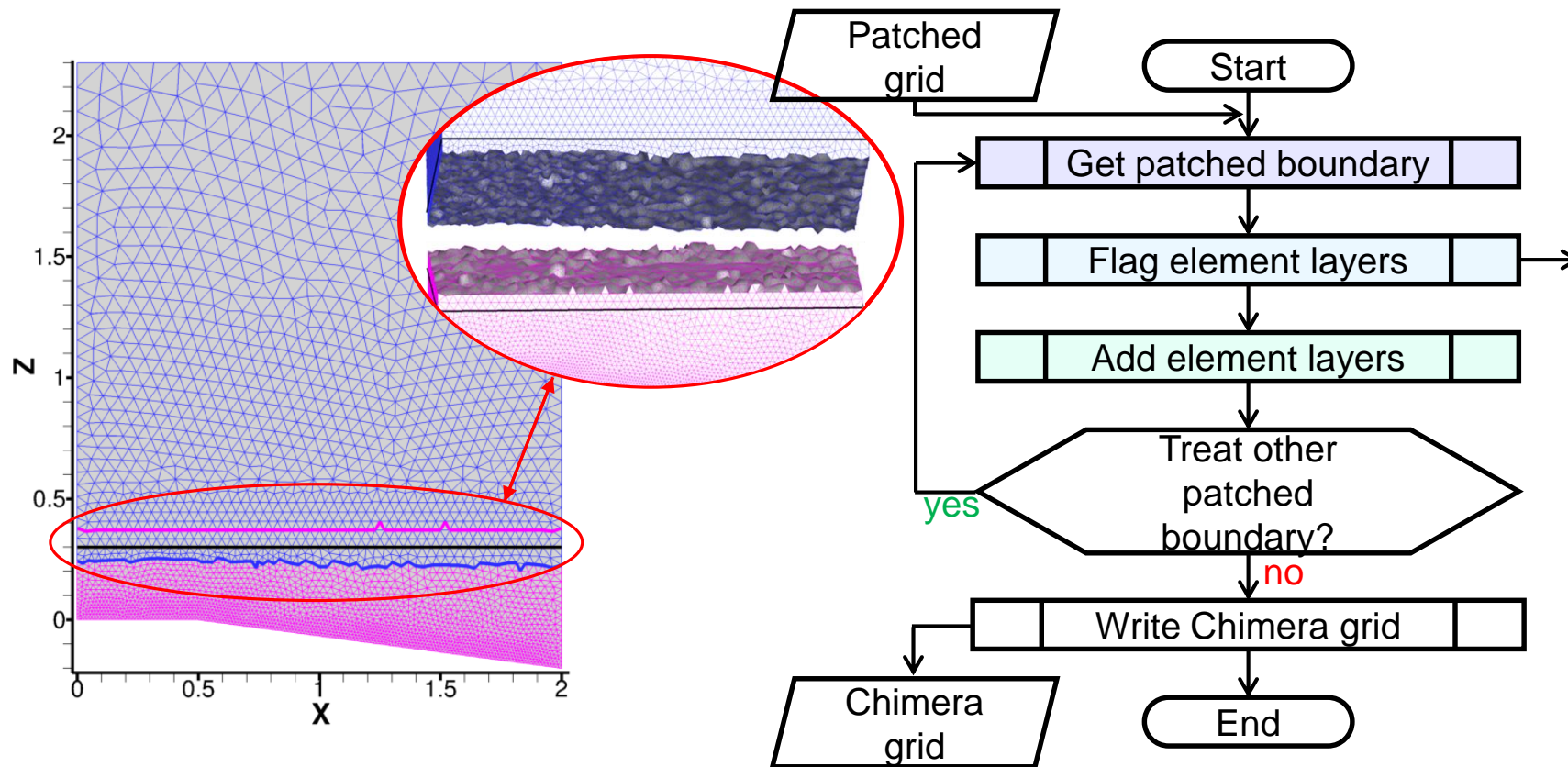
Autoren: Larissa B. Streher, Ralf Heinrich

Institut: Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Braunschweig

Bildrechte: DLR

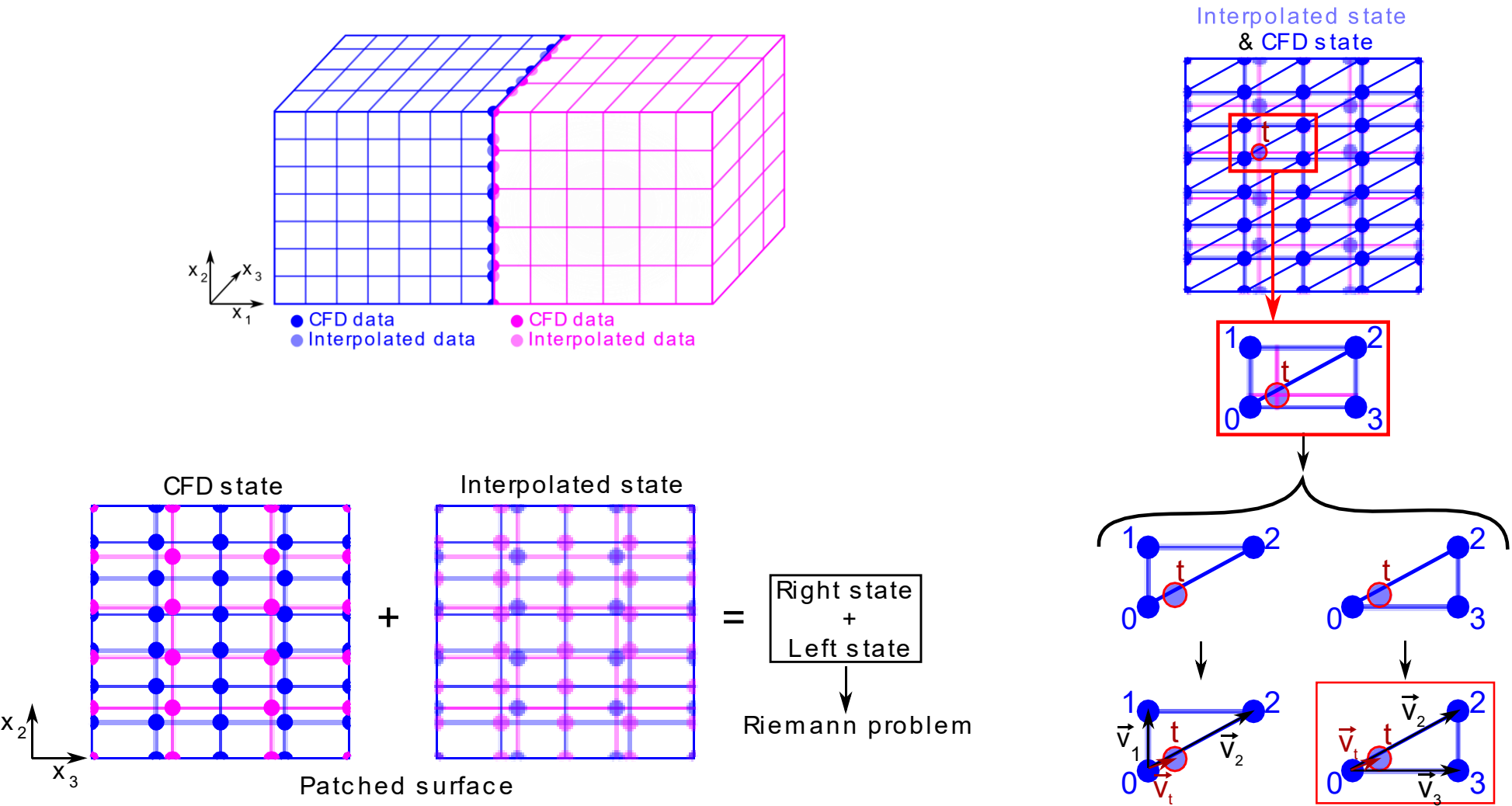
# Methoden zur Steuerflächenmodellierung

## AutoLap



# Methoden zur Steuerflächenmodellierung

## Gleitende Ränder in TAU



# Methoden zur Steuerflächenmodellierung

## Netzdeformation

- RBF Netzdeformation bevorzugt
  - Kürzere Rechenzeit
- Mehrere Splines
  - Steuerfläche ( $\Delta \neq 0$ )
  - Tragfläche + Gleitende Ränder ( $\Delta = 0$ )
  - Gleitende Ränder ( $\Delta_{normal} = 0$ )
- „Blending“ zwischen Splines
  - Klaffung an der Oberfläche kann auftreten

