

Bachelorkolloquium am 16.12.2024

Thema:

Untersuchung der aerodynamischen Eigenschaften des HART-II Hubschrauberrotors im Schwebeflug mittels der CFD-Simulation

Robin Gerlach, 70461608

Fakultät Maschinenbau

Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften
in Kooperation mit dem DLR Braunschweig

Erstprüfer: Prof. Dr. Ing. F.Klinge

Zweitprüfer: Prof. Dr. Ing. C.Heikel



Ostfalia
Hochschule für angewandte
Wissenschaften



Wissen für Morgen



Agenda

- Einführung
- Methodik
- Simulationsergebnisse
 - Übersicht
 - Ergebnisse
- Zusammenfassung

Anhang



Quelle: <https://www.braunschweiger-zeitung.de/>



Ostfalia
Hochschule für angewandte
Wissenschaften



Wissen für Morgen

Einführung

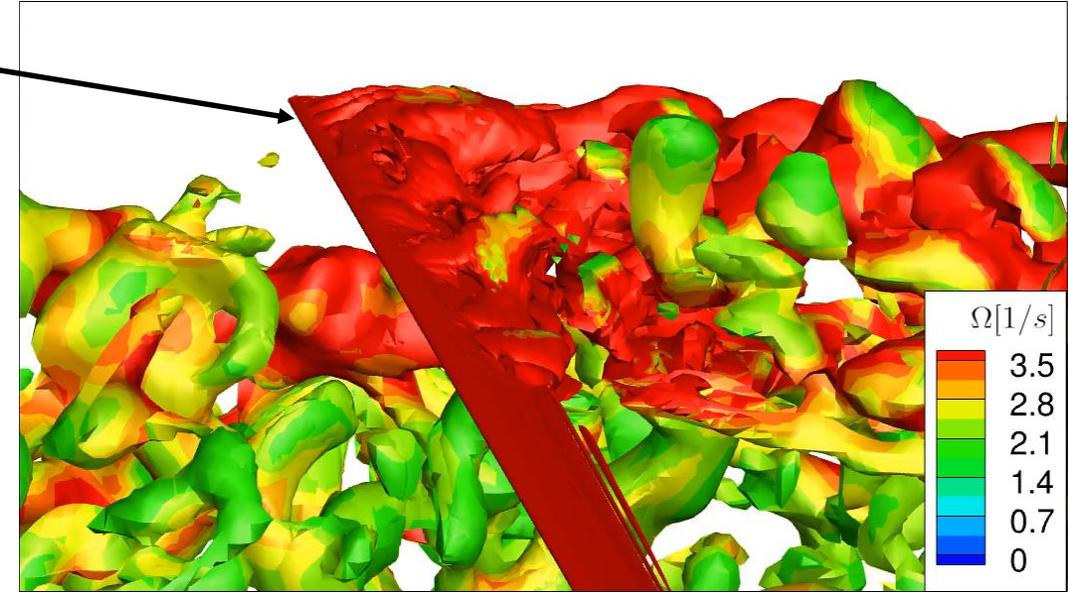
➤ **Ziel:** Effekt von numerischen Einstellungen auf Grenzzustände untersuchen:

- **Maximalschub** (C_{Tmax})
- **Effizienzgrenzen** (FM_{max})
- **Strömungsabriss** (*stall*)

Grund:

- Belastungsgrenzen für Flugsicherheit
- Verbesserung der Vorhersagemodelle
- Effizienzsteigerung

Rotorblatt
pitch=28°



Untersucht wird:

- Räumliche Diskretisierung
- Zeitliche Diskretisierung
- Variation des Netztyps
- Unterschiedliche Simulationsmethoden
- Änderung der Turbulenzmodelle

➡ **Welche Auswirkung auf die Ergebnisse und die Laufzeit (=Kosten)?**



Methodik

➤ Strömungslöser FLOWer

- CFD-Strömungslöser für block-strukturierte Rechengitter
- reibungsfreie Flüsse bis 5. Ordnung
- SA & k- ω Turbulenzmodelle
- hybride Turbulenzmodelle (LES/DES)
- duales Zeitschrittverfahren

➔ bevorzugter Löser bei Hubschraubern, da gute Vorhersage der Blattspitzenwirbel im Rotorabwind

➤ Netzgenerator G-Cube (G³)

- DLR interner Code
- Erzeugung von vollstrukturierten Netzstrukturen für FLOWer



Methodik

Diskretisierung

Zeitliche Diskretisierung

➤ Stationäre Rechnung durch lokales Zeitschrittverfahren

- 5 stufiges, explizites Runge-Kutta Schema
- mit Residuen Glätter

➤ Instationär (zeitgenaue Rechnung durch duales Zeitschrittverfahren – Backward Differentiation Formula)

- **1, 2, 2.48** Ordnung untersucht
- Verfahren nutzt lokale Zeitschritte und bringt physikalische Zeit über Quellterm ein

→ nutzt **vorherigen Zeitschritt** um nächsten zu berechnen

➤ Zeitschrittveränderung

- verschiedene Zeitschritte simuliert: **2°, 1° und 0.5°**

Räumliche Diskretisierung

➤ MUSCL-Verfahren

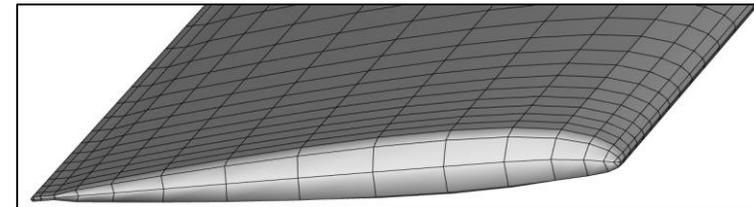
"Räumliche Ordnung des reibungsfreien Flussschemas"

- Methode um Strömung im Raum genauer zu simulieren
- Variation der Ordnung: **2.Ord / 4.Ord.**

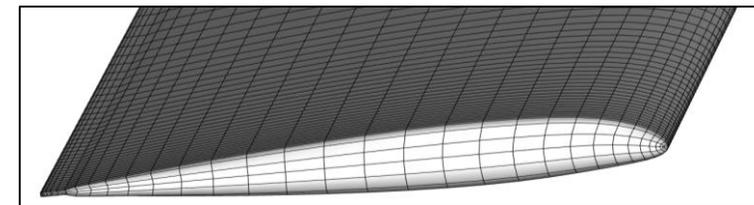
➔ **Mehr Nachbarpunkte bei größerer Ordnung**

➤ Netzqualität (exemplarisch Monocoque)

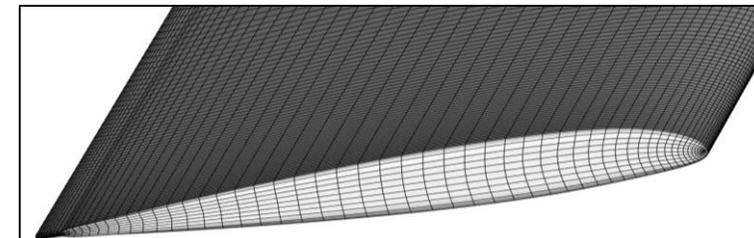
- Variation der Netzqualität in 3 Stufen



Level 3



Level 2



Level 1

Methodik

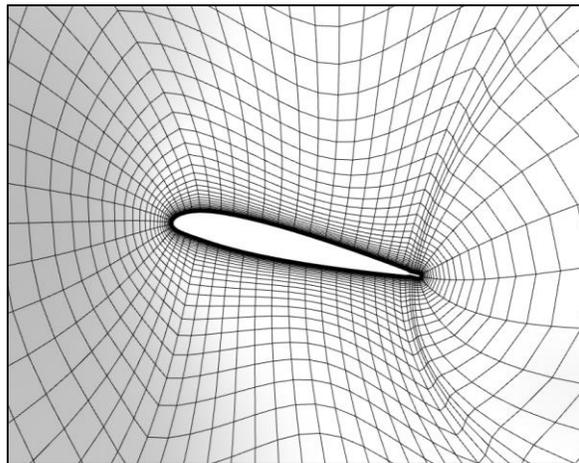
Netztyp

	Monocoque	Chimera
Level 1	2.880.000	1.050.000 + 22.400.000
Level 2	360.400	130.000 + 2.800.000
Level 3	45.000	16.300 + 350.000

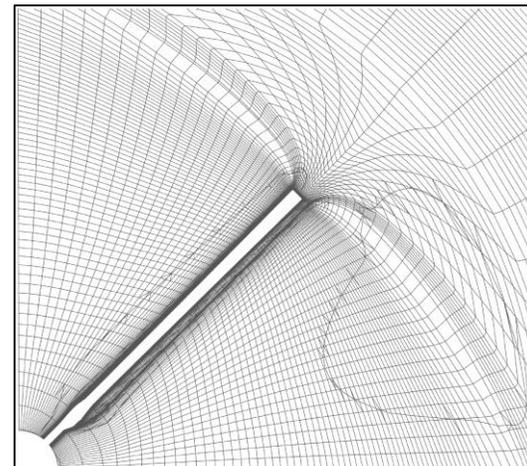
Vergleich der Netz Zellen

➤ Monocoque Netz

- Einheitlicher Gitteraufbau
- **Effizient** (geringeren Bedarf an Netzpunkten)
- Einfacher Rotor hinreichend abbildbar
- **Ungleichmäßige Zellgrößen**
→ Genauigkeitsverluste



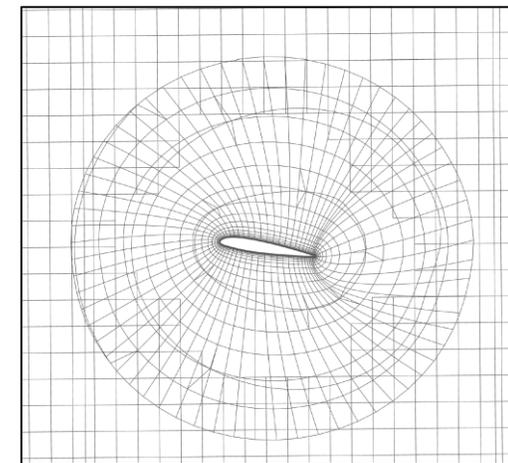
Monocoque - Seitenansicht



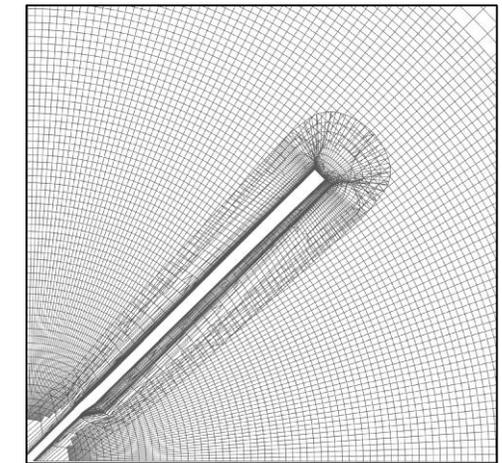
Monocoque - Draufsicht

➤ Chimera Netz

- Überlappende Gitterblöcke **mit Interpolation**
- **Flexibilität** für **komplexe Geometrien**
- Effizient für **bewegte Komponenten (Rotor)**
- **Gleichmäßigere Zellverteilung** im Hintergrund



Chimera - Seitenansicht



Chimera - Draufsicht

Methodik

Simulationsmethoden

- **RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes)**
 - für **stationäre Strömungen**
 - simuliert **gemittelte Turbulenz** über **Raum & Zeit**
 - Einsatz bei **großen** Reynoldszahlen ($Re > 10^5$) (turbulente Grenzschichten)
 - Abbildung **kleinster** turbulenter Wirbel durch **Wirbelviskosität**

- **URANS (Unsteady RANS)**
 - für **Instationäre Strömungen**
 - Mittelung über den Zeitschritt

- **DES (Detached Eddy Simulation)**
 - **Hybridmodell:** Kombiniert **RANS** und **LES** dynamisch
 - **Übergang:** Abhängig von **Wandentfernung** und **lokaler Gitterauflösung**
 - DES-Längenmaß: $l_{DES} = \min(l_{RANS}, C_d \cdot \Delta)$

- **DDES (Delayed DES)**
 - Verhindert ungewollten Wechsel von **RANS** zu **LES** in der Grenzschicht
 - Funktion erkennt ob Strömung in der Grenzschicht liegt

- **LES (Large Eddy Simulation)**
 - **Hohe Rechenzeit** aufgrund **hoher Anforderung** an **Netzpunktzahlen**
 - Wenn Wirbel **größer** als die **Zelle** → Auflösung in den H.S.G. (N.S.)
 - **Kleinere Wirbel** werden im Turbulenzmodell abgebildet
 - Realistisch für **Ablösungsbereiche** und **starke Wirbelstrukturen**



Methodik

Turbulenzmodelle

Spalart-Allmaras (SA-R) mit Rotationskorrektur

- **Ein-Gleichungsmodell:** Löst nur eine Transportgleichung

Vorteile:

- Schnell und ressourcenschonend
- Effektiv bei **angelegten** Strömungen (ohne Ablösung) und **moderaten Turbulenzen**
- **SA-R:** verbesserte Simulation von **Blattspitzenwirbeln** durch Unterdrücken des Produktionsterm in Wirbelkern

Nachteile:

- Begrenzte Eignung für komplexe Turbulenzen
- Schwierigkeiten bei stark abgelösten Strömungen

Menter Shear Stress Transport (SST)

- **Zwei-Gleichungsmodell**
 - Kombination von **k- ω** und **k- ϵ** :
 - **k- ω** für **wandnahe Bereiche** (präzise Modellierung der Grenzschicht)
 - **k- ϵ** für **freiströmende Bereiche** (robust und stabil bei großen Wirbeln)
- Blending-Faktor wird für Kombination genutzt

Weiterentwicklung bei SST-2003:

- Optimierte Wirbelviskosität
- **Produktionslimitierung** von Turbulenz



Methodik

Konvergenzkriterium

➤ Warum Konvergenz wichtig ist?

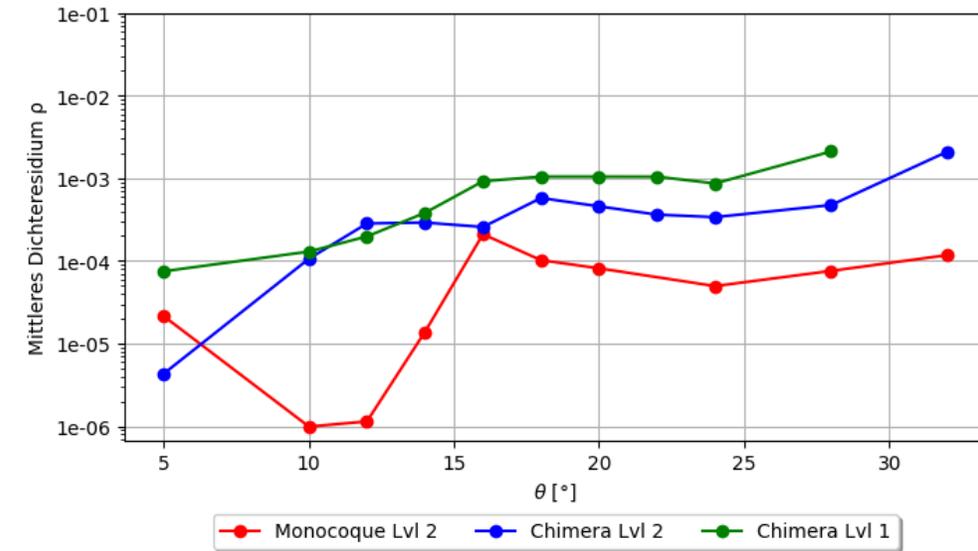
- **Konsistenz** der Simulation
→ benötigt **stabile** Verfahren
- **Hinreichende** Konvergenz **Fall-abhängig** und bestimmt maßgeblich die **Kosten** einer CFD Rechnung

→ ohne eine **hinreichende Konvergenz** sind Ergebnisse **unzulässig** bzw. **unbrauchbar**

➤ Kriterien

- Abnahme der (Dichte-)Residuen auf ca. 10^{-4} bis 10^{-6}
- Stabilisierung relevanter physikalischer Größen (z. B. Auftrieb, Druckverteilung)

Beispiel:



➤ Mittleres Dichte-Residuum (ρ):

- Zur **Einschätzung** der Lösungsgüte
- Indikator für **unphysikalische** Ergebnisse

➤ Beeinflussung durch:

- Netzauflösung
- Zeitschritte und numerische Einstellungen
- Turbulenzmodell
- Komplexität der Strömung



Methodik

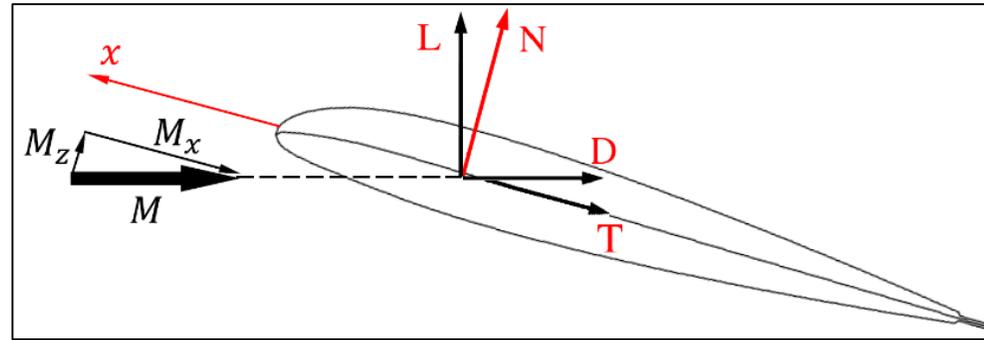
Kräfte am Rotor

Werte aus CFD

- Temperaturverteilungen
- Druckverteilungen
- Geschwindigkeitsverteilungen

Integration über
Blattlänge

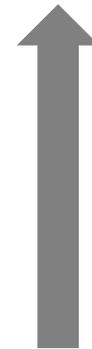
- θ (Einstellwinkel) wird vorgegeben
- α (Anstellwinkel) nicht bekannt



Kräfte am Rotorblatt

Auswertegrößen

$$\frac{C_T}{\sigma} \quad \frac{C_P}{\sigma} \quad FM$$



Normierung durch σ

- σ : Rotordichte

$$\sigma = \frac{\text{Blattfläche}}{\text{Kreisfläche}} = 0.077 \text{ (HART II)}$$

→ Ziel: Blattbelastung
vergleichbar machen

Koeffizienten berechnen

$$C_T = \frac{T}{\rho \cdot A \cdot (\Omega R)^2}$$

$$C_P = \frac{P}{\rho_\infty \pi R^2 (\Omega R)^3}$$

$$FM = \frac{C_T^{3/2}}{C_P}$$

$$FM = \frac{P_{\text{ideal}}}{P_{\text{real}}} \quad \text{FM (Figure of Merit):}$$

→ Effizienz des Rotors

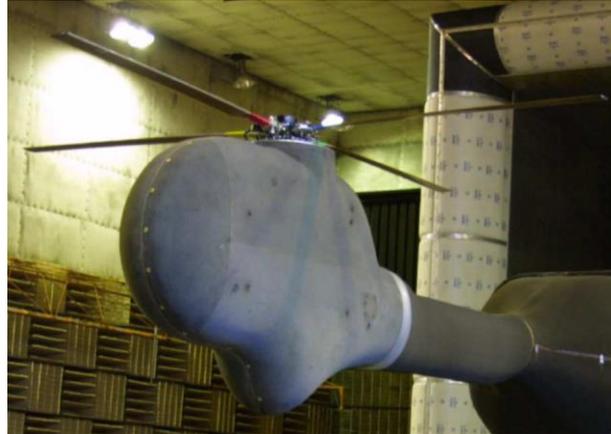


Referenzrotor & Testfälle

Übersicht

➤ HART-II Rotor

- einfache Geometrie
- bietet umfassende Dokumentation
- Öffentlich zugängliche Testdaten



HART II
Quelle: DNW

Parameter	Wert
Anzahl der Blätter	4
Radius	2 m
Sehne	0.121 m
Verwindung	-8°/R
Profil	NACA23012
Form	rechteckig
Umgebungstemperatur	290,46 K
Umgebungsdruck	100.970 Pa
Drehzahl	1042 RPM (109 rad/s)

Studie	Turb. Modell		Netz / Level	Zusätzliche Parameter	
1 Räumliche Diskretisierung	SA	RANS	Monoq.	1	
				2	
				3	
			1		
2	4. Räumliche Ord.				
2 Zeitschrittverfahren	SA	(U)-RANS	Monoq.	1	
				2	
				Stationär	
				Instat. / BDF1 / 1°	
				Instat. / BDF2 / 1°	
				Instat. / BDF2OPT / 1°	
Instat. / BDF2OPT / 2°					
Instat. / BDF2OPT / 0.5°					
3 Netzvergleich	SA	URANS	Monoq.	2	
			Chimera	2	
				1	
4. Räumliche Ord.					

4.1 Wirbelkorrektur	SA	URANS	Chimera	2	-
		DDES			Wirbelkorrektur
	SST	URANS			-
		DDES			Wirbelkorrektur
4.2 DES Varianten	SA	URANS	Chimera	2	$C_{D1}=8$
		DDES			$C_{D1}=20$
					$C_{D1}=20$ /Wirbelkorrektur
4.3 Transition	SA	DDES	Chimera	2	Voll Turbulent (FT)
	SST				
	SA				
	SST				
4.4 Auflösung	SA	DDES	Chimera	1	Voll Turbulent (FT)
				2	
				1	Laminar Turbulent (LT)
				2	



Ergebnisse

Räumliche Diskretisierung

1

Räumliche
Diskretisierung

SA

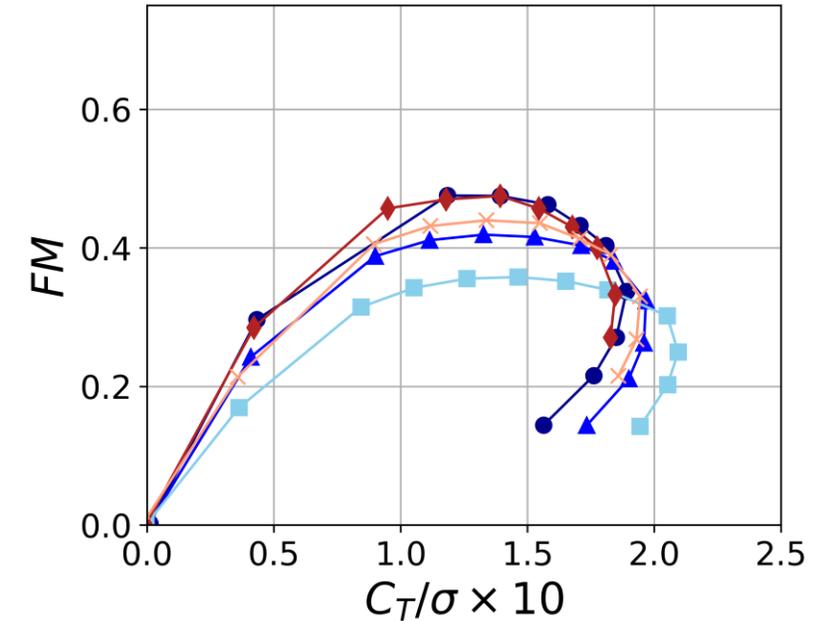
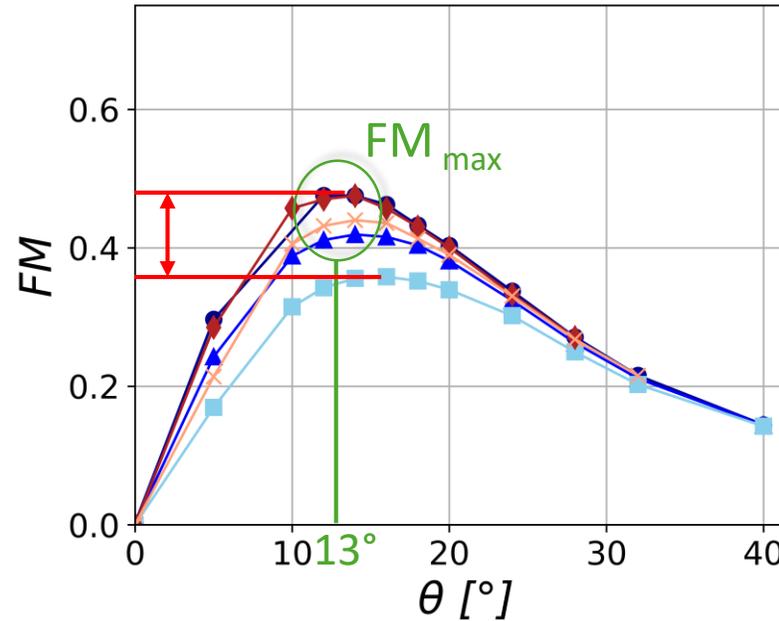
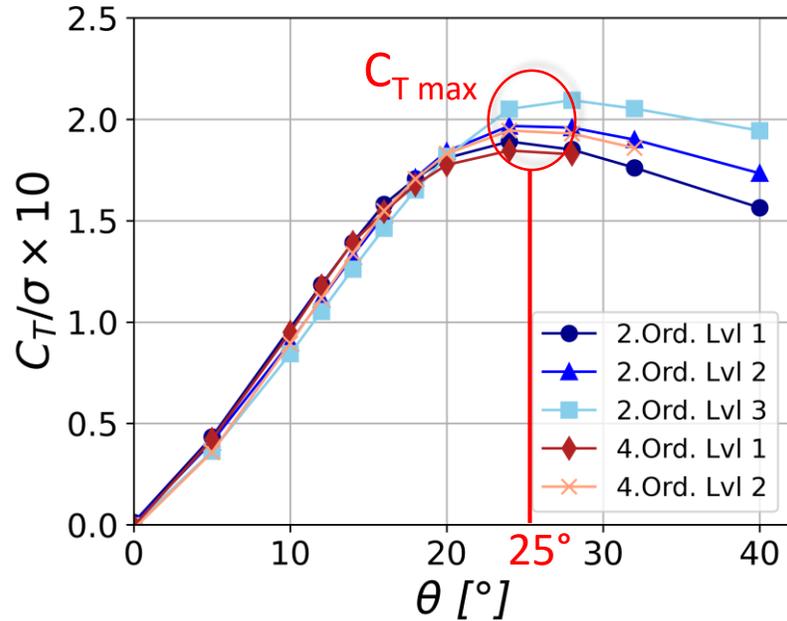
RANS

Monoq.

1
2
3
1
2

2. Räumliche Ord.

4. Räumliche Ord.



Schlussfolgerungen:

- Genauigkeitsgewinn mit **4. Ordnung**
- **Feineres Netz** → höheren **effizientesten Betriebspunkt** (FM_{\max})

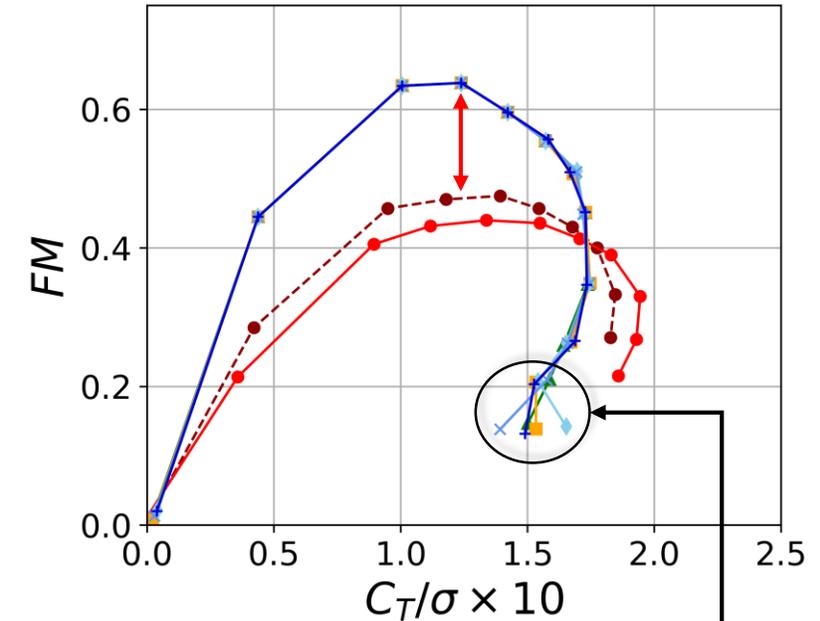
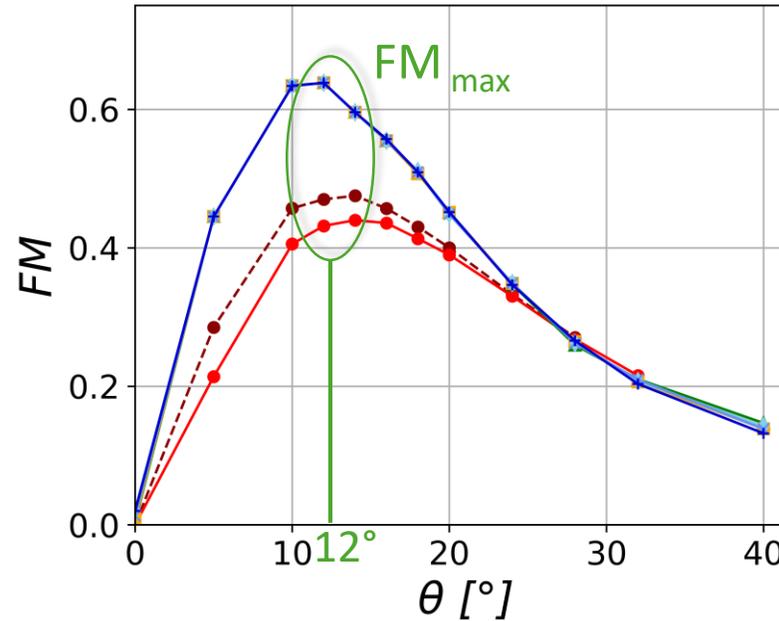
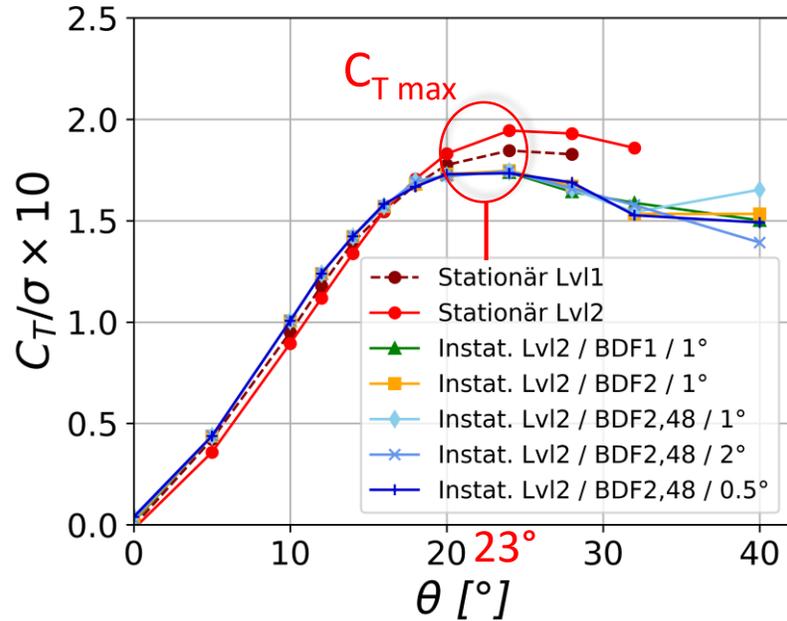
→ Einfluss der **Netzfeinheit** ist größer als Einfluss der **Räumlichen Ordnung**



Ergebnisse

Zeitliche Diskretisierung

2	Zeitschrittverfahren	SA	(U)-RANS	Monoq.	1	Stationär
					2	Instat. / BDF1 / 1°
					2	Instat. / BDF2 / 1°
					2	Instat. / BDF2OPT / 1°
					2	Instat. / BDF2OPT / 2°
					2	Instat. / BDF2OPT / 0.5°



Schlussfolgerungen:

- höhere **Netzqualität** beeinflusst **positiv** Ergebnisse
- **Instationär** liefert **höhere** Ergebnisse in der Effizienz → **Hauptunterschied**
→ Vernachlässigung physikalischer Effekte (z.B. BVI) bei stationärer Simulation
- Einfluss des **Zeitschrittes** und der **BDF-Methode** vernachlässigbar klein



Ergebnisse

Änderung des Netztyps

3 Netzvergleich

SA

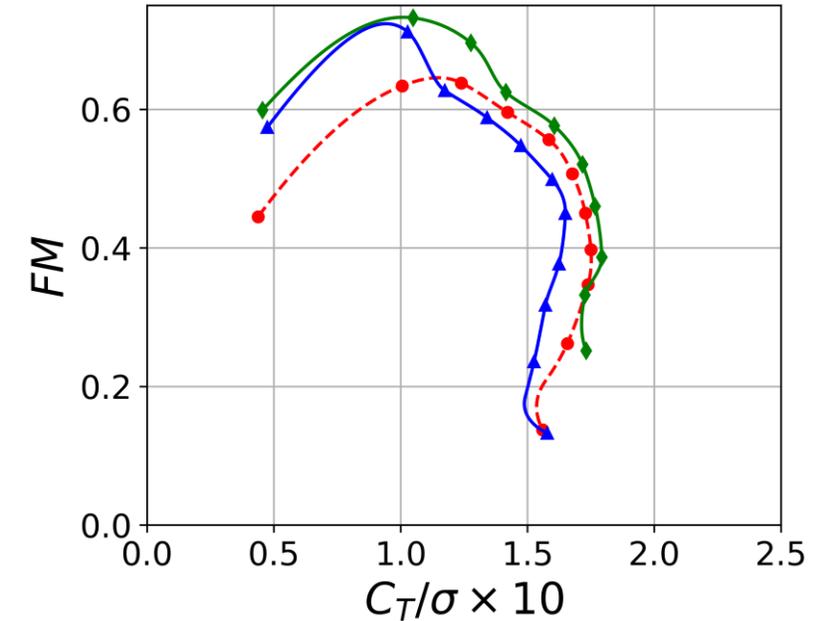
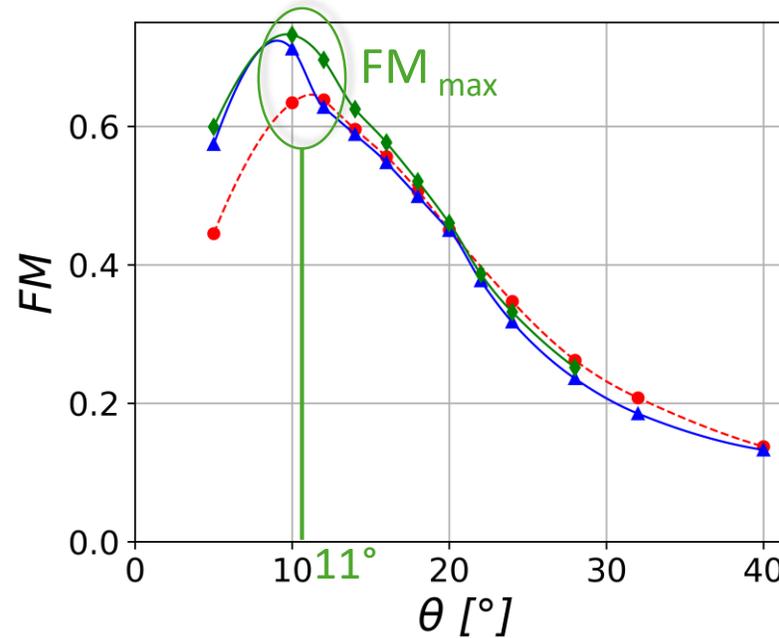
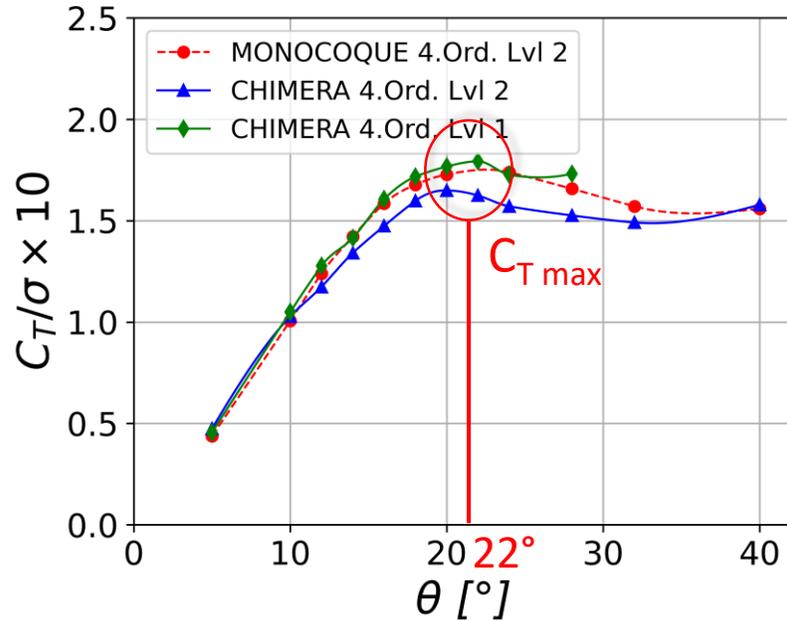
URANS

Monoq. 2

Chimera 2

1

4. Räumliche Ord.



Schlussfolgerungen:

- Chimera Netz erreicht **höheren effizientesten Betriebspunkt** als Monocoque Netz

→ **Chimera Netz** wird im weiteren Verlauf für **Turbulenzmodellierung** verwendet

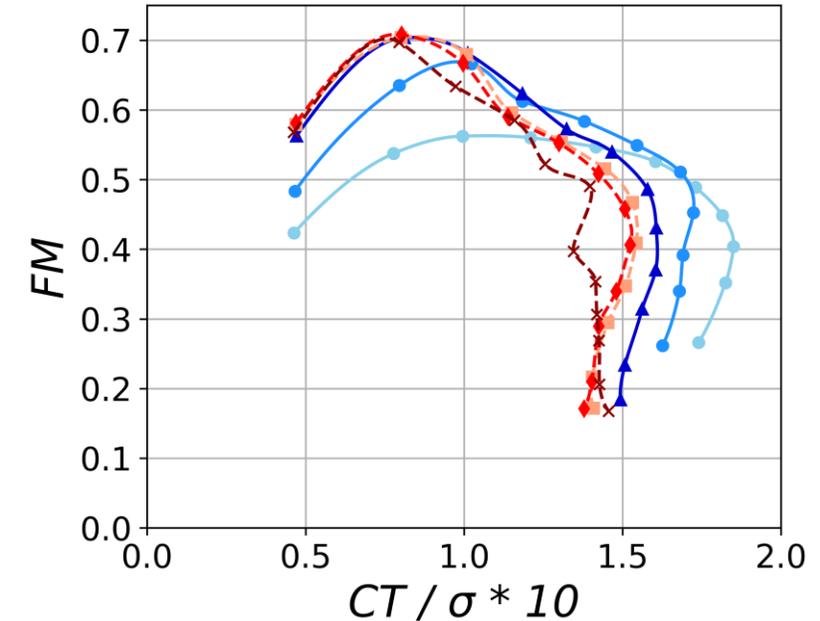
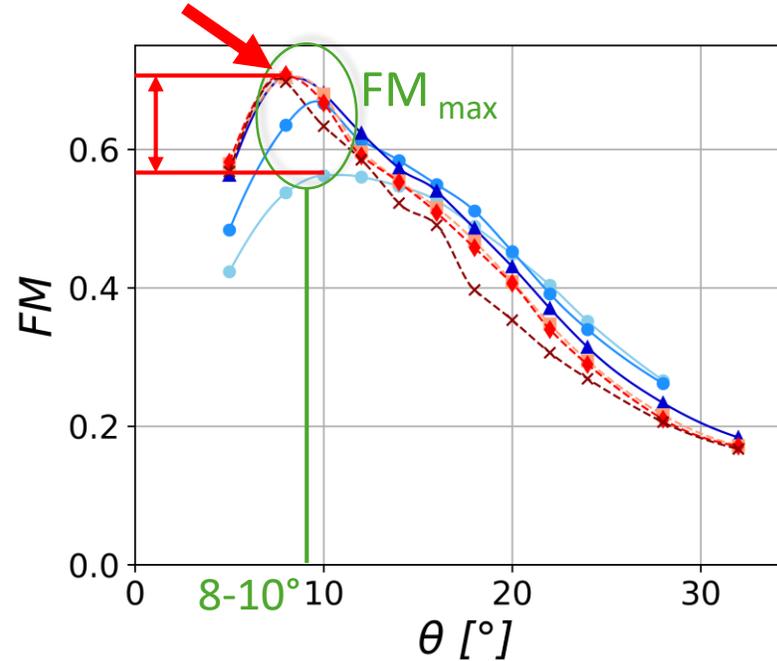
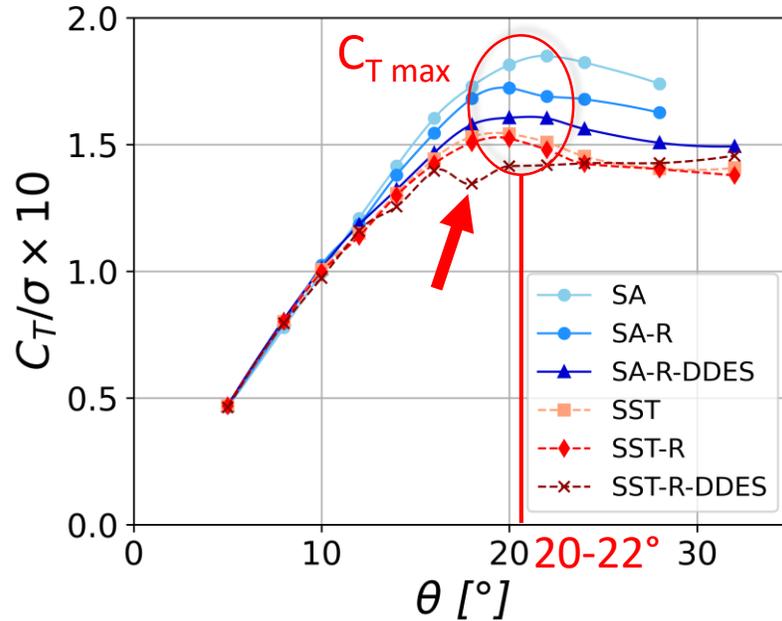


Ergebnisse

Turbulenzmodellierung - Wirbelkorrektur

4.1 Wirbelkorrektur

SA	URANS	Chimera	2	-
	DDES			Wirbelkorrektur
SST	URANS			-
	DDES			Wirbelkorrektur



Schlussfolgerungen:

Mit URANS:

- SST weist höhere Werte auf als SA
- Wirbelkorrektur beeinflusst SA deutlich; SST weniger

mit DDES:

- SA sehr ähnliche Ergebnisse wie SST ($\rightarrow FM_{max}$)
- SST bricht teilweise etwas ein (\rightarrow Konvergenz)
- Konvergenz schlechter (mehr Physik erfasst)



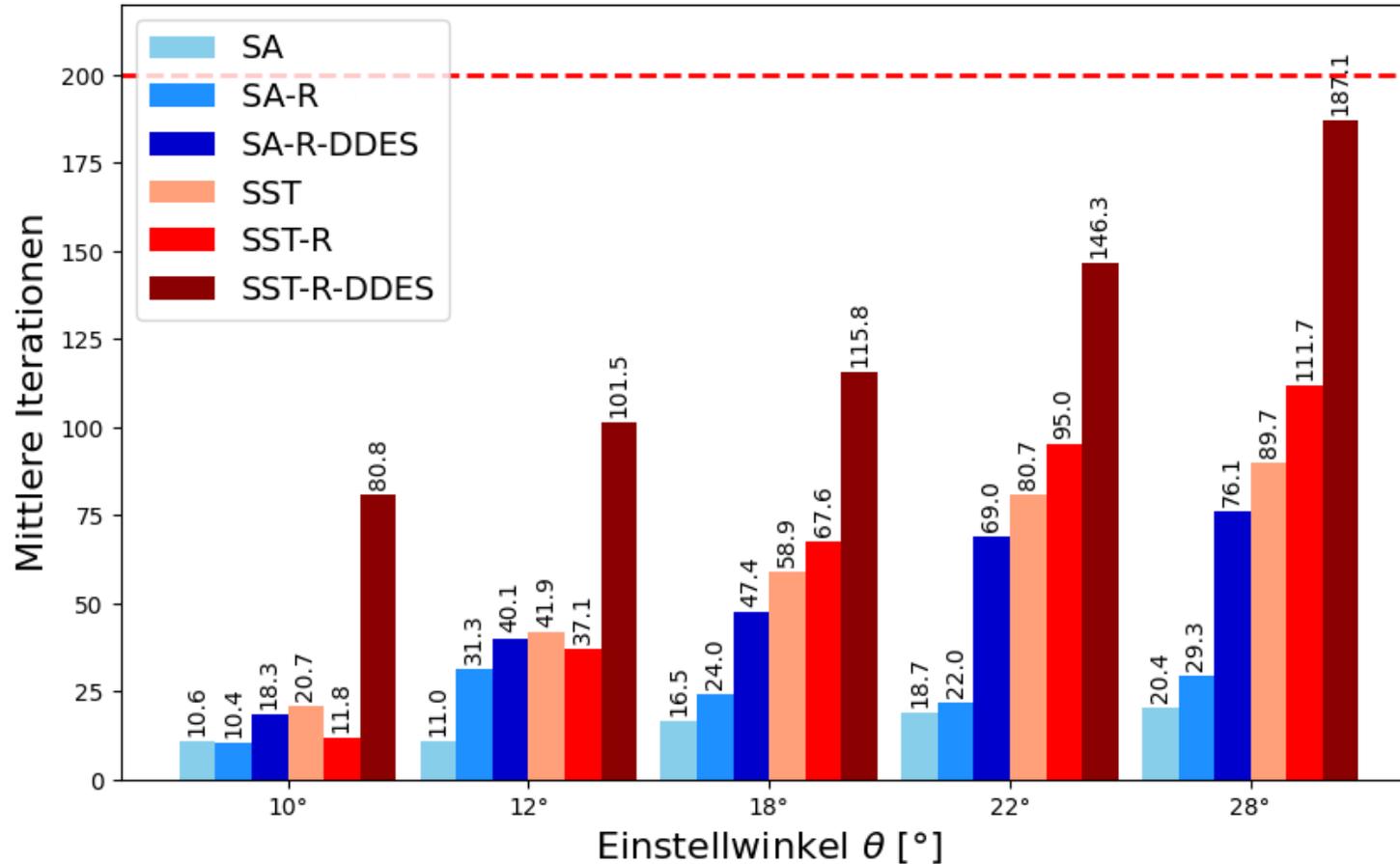
Ergebnisse

Turbulenzmodellierung - Wirbelkorrektur

4.1

Wirbelkorrektur

SA	URANS	Chimera	2	-
	DDES			Wirbelkorrektur
SST	URANS			-
	DDES			Wirbelkorrektur



Laufzeiten der Simulationen

- Vergleich der mittleren Iterationen über 5 relevante Einstellwinkel
- Limit bei **200 Iterationen** gesetzt

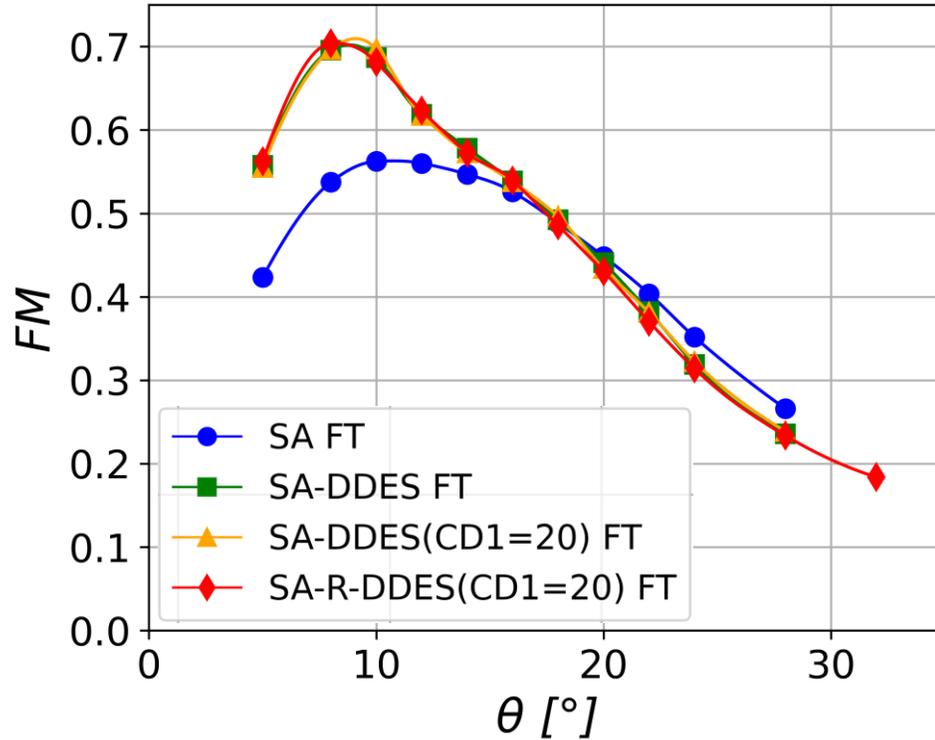
→ **SST mit DDES** benötigt immer die **meisten** Iterationen

→ **SA mit DDES** liefert gute Ergebnisse bei deutlich **weniger** Iterationen



Ergebnisse

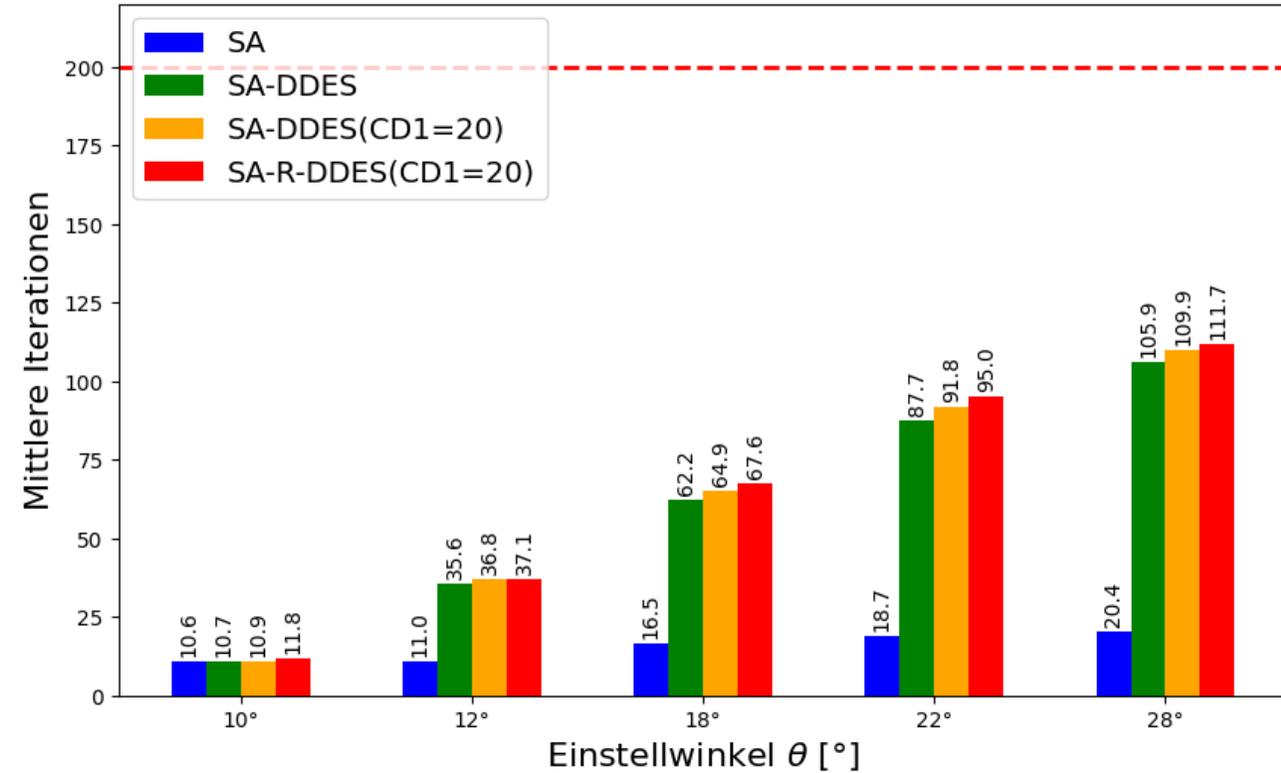
Turbulenzmodellierung – DES Variation



Schlussfolgerungen:

- **Hauptunterschied:** URANS \rightarrow DDES
- **C_{D1} - Variation** hat kaum Einfluss

4.2	DES Varianten	SA	URANS	Chimera	2	$C_{D1}=8$
			DDES			$C_{D1}=20$
						$C_{D1}=20$ /Wirbelkorrektur
4.3	Transition	SA	DDES	Chimera	2	Voll Turbulent (FT)
		SST				Laminar Turbulent (LT)
		SA				
		SST				

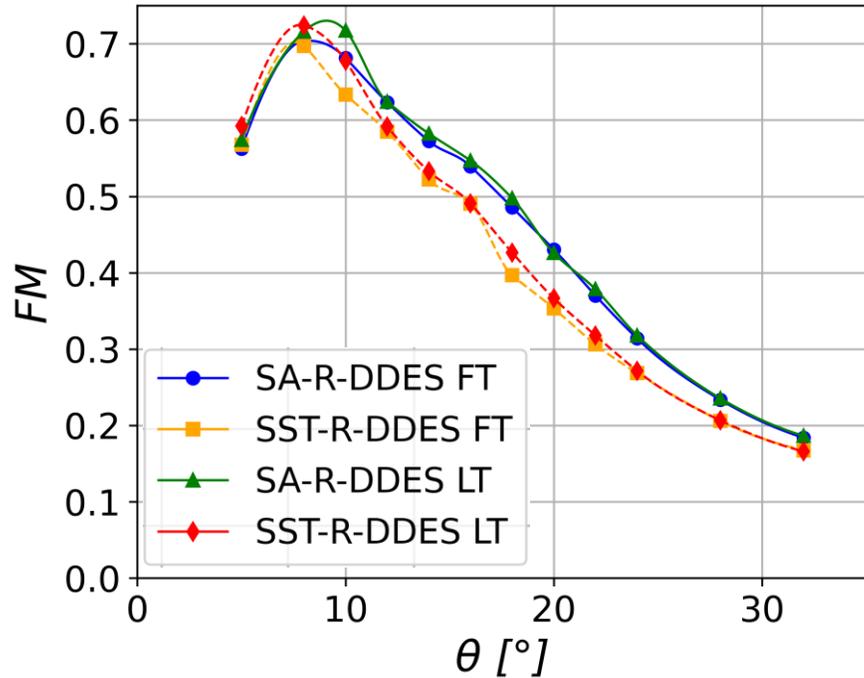


- **Wirbelkorrektur** und **C_{D1}** erhöhen Iterationen minimal



Ergebnisse

Turbulenzmodellierung – Transition



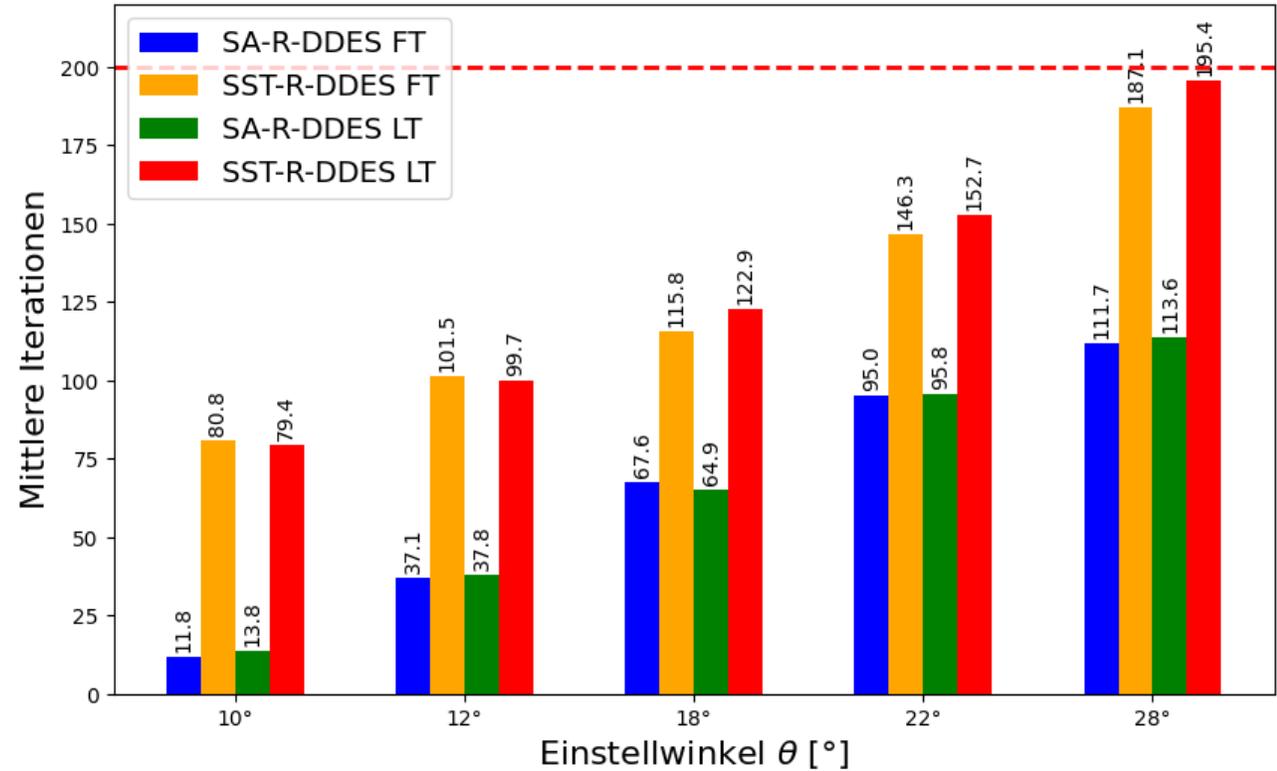
Schlussfolgerungen:

- Hauptunterschied: **SA & SST**
- **LT-Umschlag** liefert höhere Ergebnisse

4.3

Transition

Transition	SA	DDES	Chimera	2	Voll Turbulent (FT)
	SST				Laminar Turbulent (LT)
	SA				
	SST				

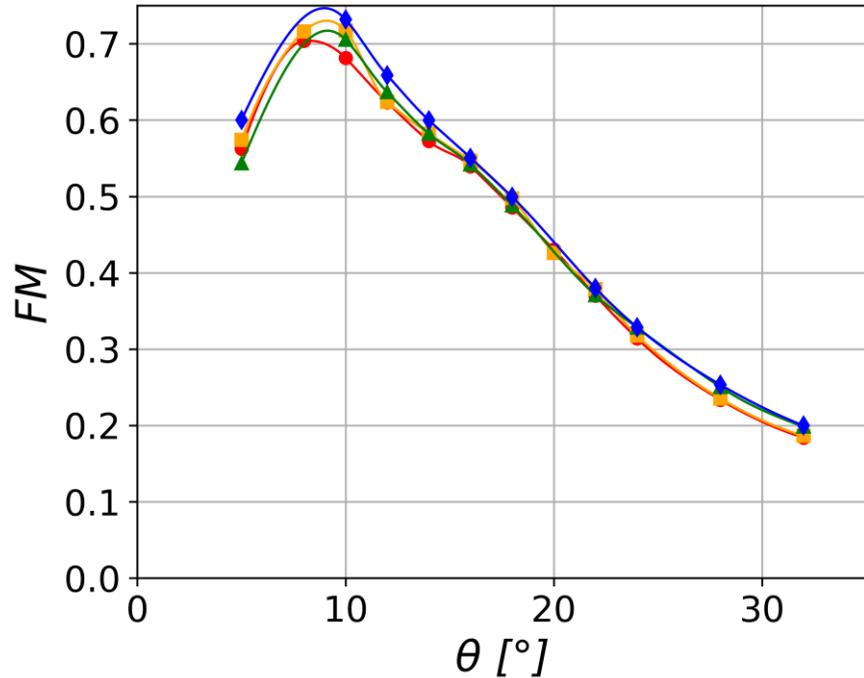


- SA benötigt **weniger** Iterationen als SST im **Grenzbereich**



Ergebnisse

Turbulenzmodellierung – Auflösung



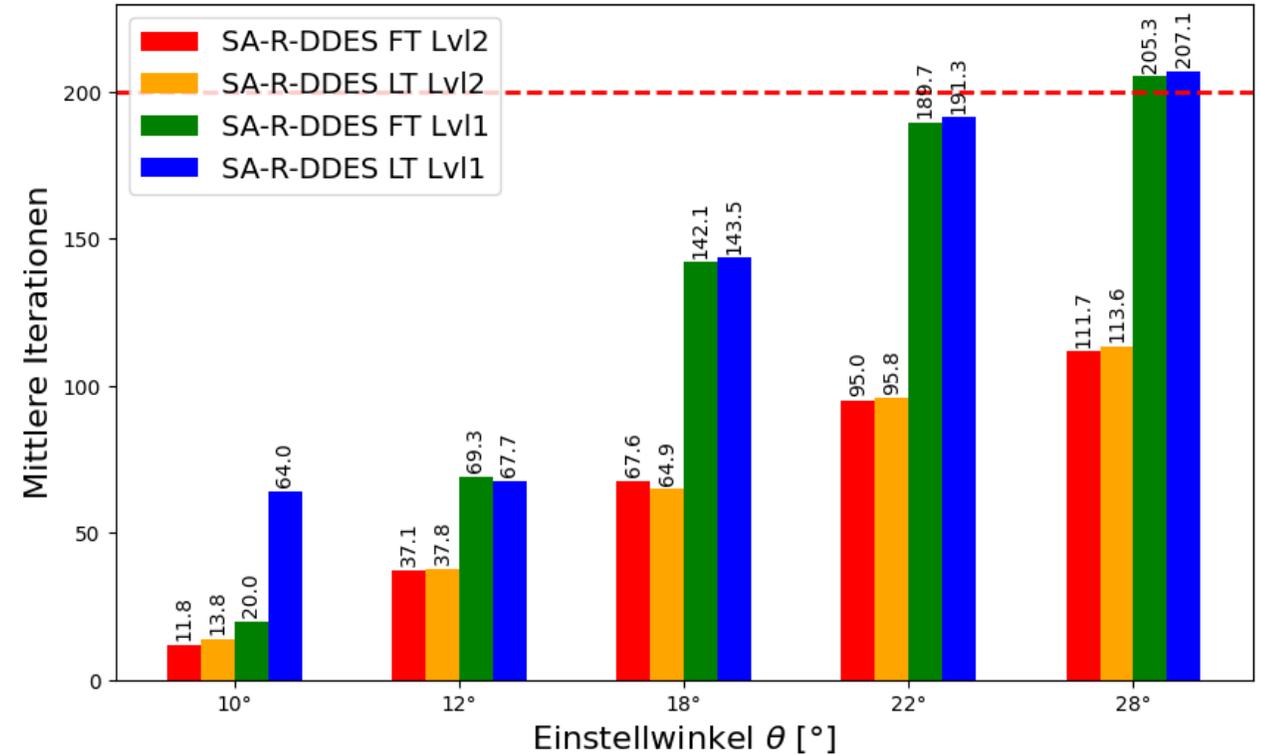
Schlussfolgerungen:

- **Chimera Level 2** liefert schon **gute Ergebnisse**
- **Modellierung** größerer Einfluss als **Netzauflösung**

→ **Level 1** bringt kaum noch bessere Ergebnisse (!)

4.4

Auflösung	SA	DDES	Chimera	1	Voll Turbulent (FT)
				2	Laminar Turbulent (LT)
Auflösung	SA	DDES	Chimera	1	Laminar Turbulent (LT)
				2	



- **Level 1** braucht die **doppelte Anzahl an Iterationen**
→ **2x teurer als Level 2**



Zusammenfassung

Haupterkenntnisse

- Eine höhere **Räumliche Ordnung** (4. Ord), **instationäre** Simulationen und das **Chimera Netz** „**verbessern**“
Ergebnisse deutlich

Turbulenzmodellierung:

- **Wirbelkorrektur:** → **SA-R-DDES** liefert nahezu identische Ergebnisse wie **SST URANS** bei geringerer Rechenzeit
→ empfiehlt sich zu **aktivieren**
- **DDES Variation:** **C_{D1} -Wert** ändert nur **minimal** etwas an den Ergebnissen → kostet aber auch nur **minimal** mehr
- **Transition:** liefert **höhere** Ergebnisse bei minimal mehr Iterationen → **empfeht sich zu aktivieren**
- **Auflösung:** **Feineres Chimera Netz** liefert nicht automatisch **bessere Ergebnisse** (s. **LT Lvl2**)
ist aber **immer deutlich teurer** (→ **Kostenfaktor: ~2x**)

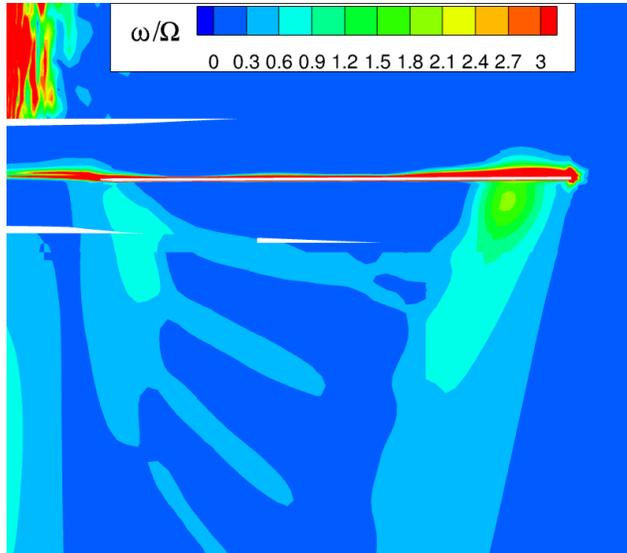
➔ **Empfehlung:** Im **stall-Bereich** **empfeht** sich das **SA-Modell** mit **DDES** und **Wirbelkorrektur**, weil es **besser konvergiert** als das **SST-Modell**



Ergebnisse

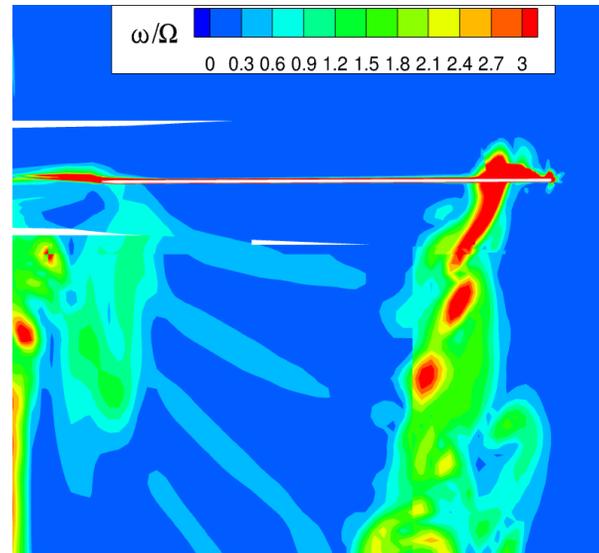
Warum DDES und Wirbelkorrektur wichtig im SA Modell sind:

SA-URANS



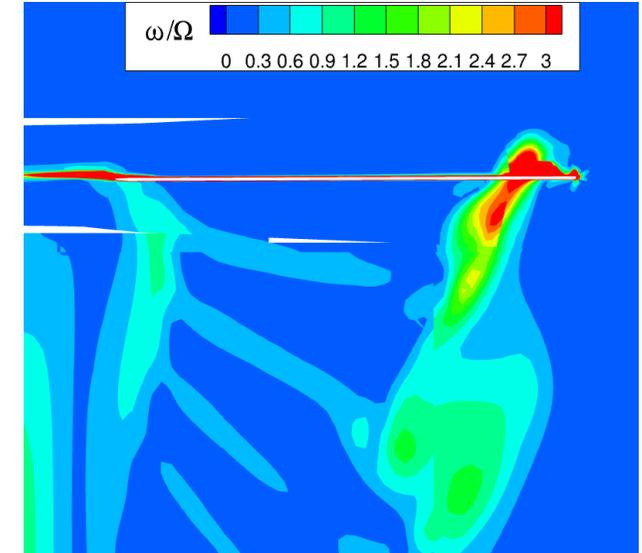
Pitch=12°

SA-R-DDES



Pitch=12°

SST-URANS



Pitch=12°

→ beim **SA-Modell** empfiehlt sich **DDES** und **Wirbelkorrektur** zu **aktivieren**, um **Blattspitzenwirbel** nicht zu vernachlässigen

Chimera Level 2



Bachelorkolloquium am 11.12.2024

Thema:

Untersuchung der aerodynamischen Eigenschaften des HART-II
Hubschrauberrotors im Schwebeflug mittels CFD-Simulationen

Vielen Dank für ihre Aufmerksamkeit!



Ostfalia
Hochschule für angewandte
Wissenschaften

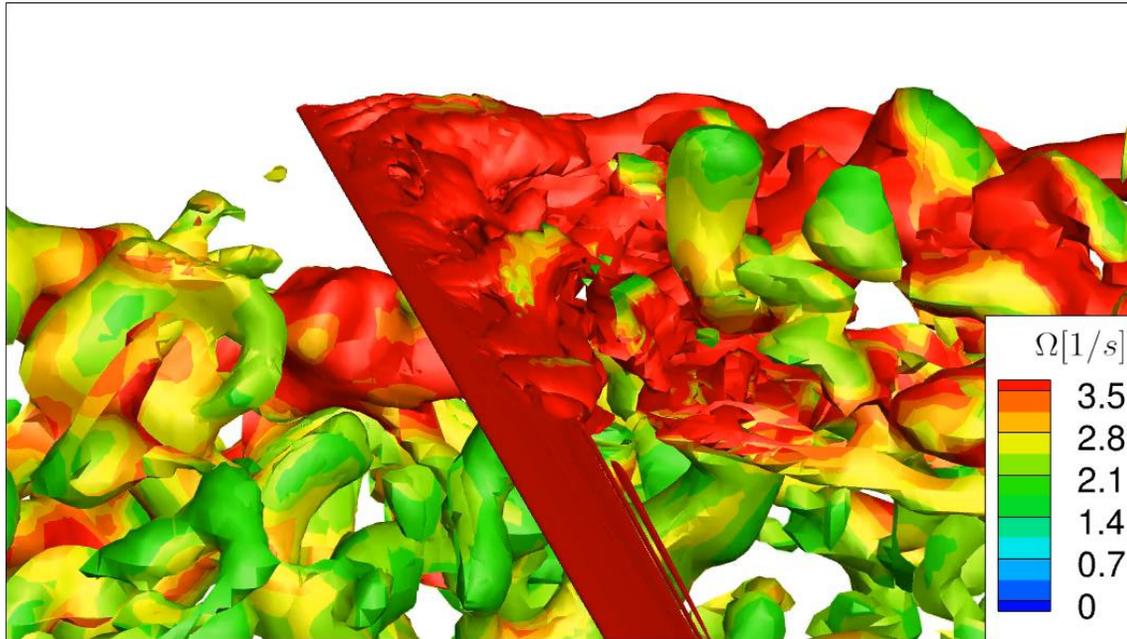


Wissen für Morgen

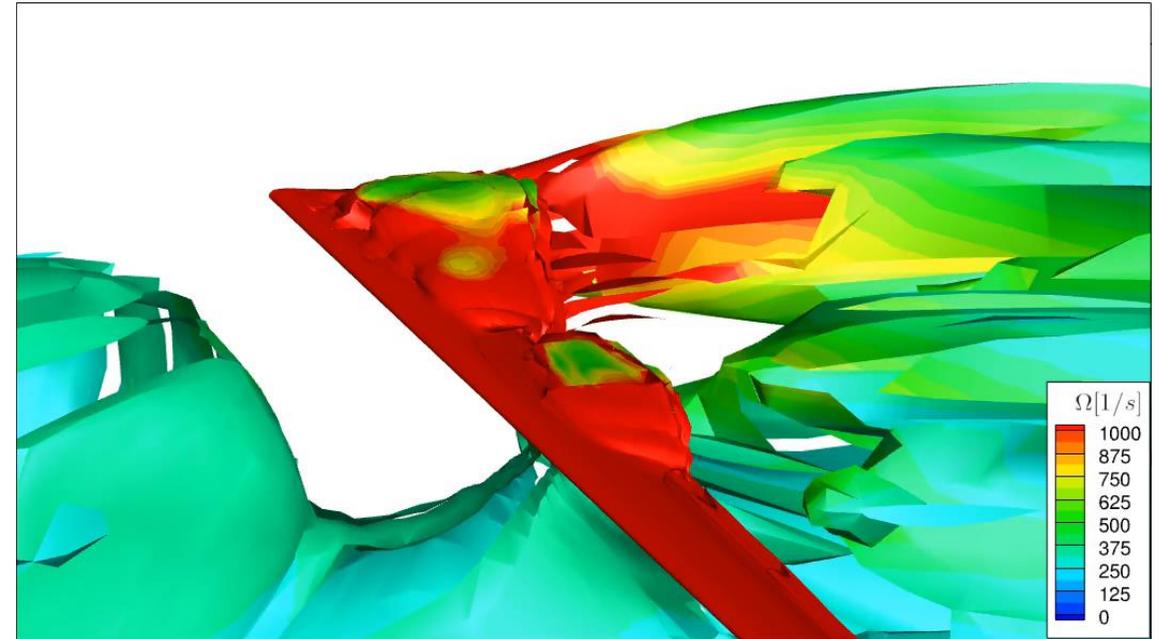


Anhang

➤ Vergleich der Wirbeldarstellung bei gleichen Randbedingungen → pitch=28°



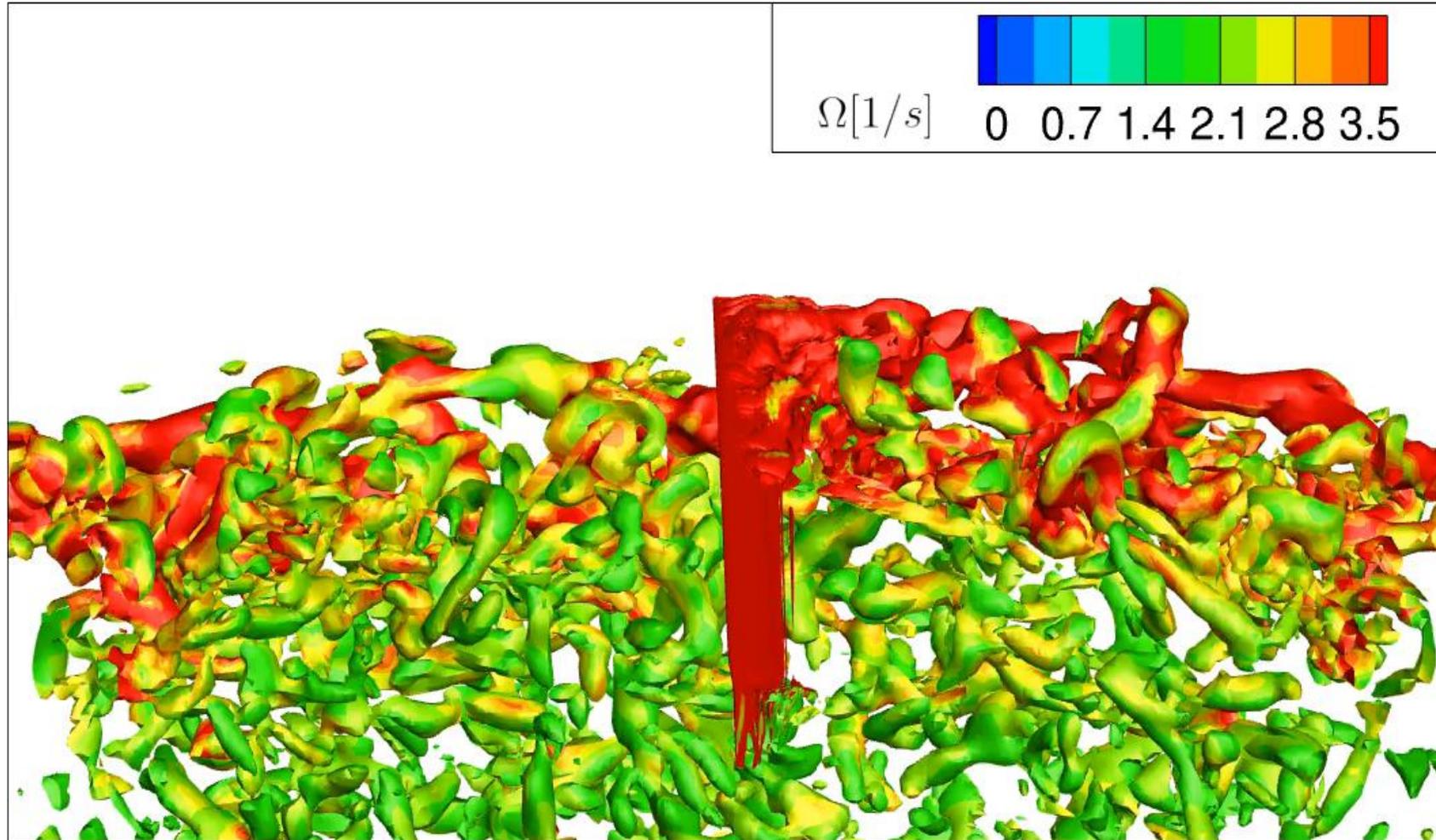
SA-R-DDES mit Transition; Chimera Lvl. 1



SA-Modell / instationär/ BDF2,48; Monoq. Lvl. 2



Anhang



SA-R-DDES mit Transition; Chimera Lvl. 1

