



Kraftwerkstechnisches Kolloquium 2025
**Numerische Untersuchung von Tragflügelumströmungen
bei periodisch veränderlichen Anströmbedingungen**

Markus Nagedly 09.09.2025



Agenda

1. Zielstellung
2. Analytische Betrachtung
3. Vorstudie bei statischen Anströmbedingungen
4. Umströmung bei oszillierenden Anströmbedingungen
5. Untersuchung modifizierter Tragflügelprofile
6. Fazit und Ausblick

Ausgangssituation:

- Im Offshore und ländlichen Bereich sind Anlagen mit horizontaler Drehachse (HAWT) etabliert
- Für urbane Gebiete sind Turbinen mit **vertikaler Rotationsachse (VAWT)** prädestiniert
- Vorteile: Akzeptanz, Schattenwurf, Wartung, Vogelschlag, etc.



Abb.1: Exemplarische Darstellung des Mittelschnitts an einer Helix-VAWT (links ¹) und konventionelle Rotorblätter nach deren Betriebszeitende (rechts ²).

Spezielle Probleme VAWT:

- Schwankendes Drehmoment an Rotorachse
- Geringerer Leistungsbeiwert als HAWT
- Fähigkeit zum Selbststart

Generelle Probleme von WKA:

- Wiederverwertung und Recycling nach Lebensdauer
- Einsatz umweltgerechter Werkstoffe an Stelle von GFK und CFK

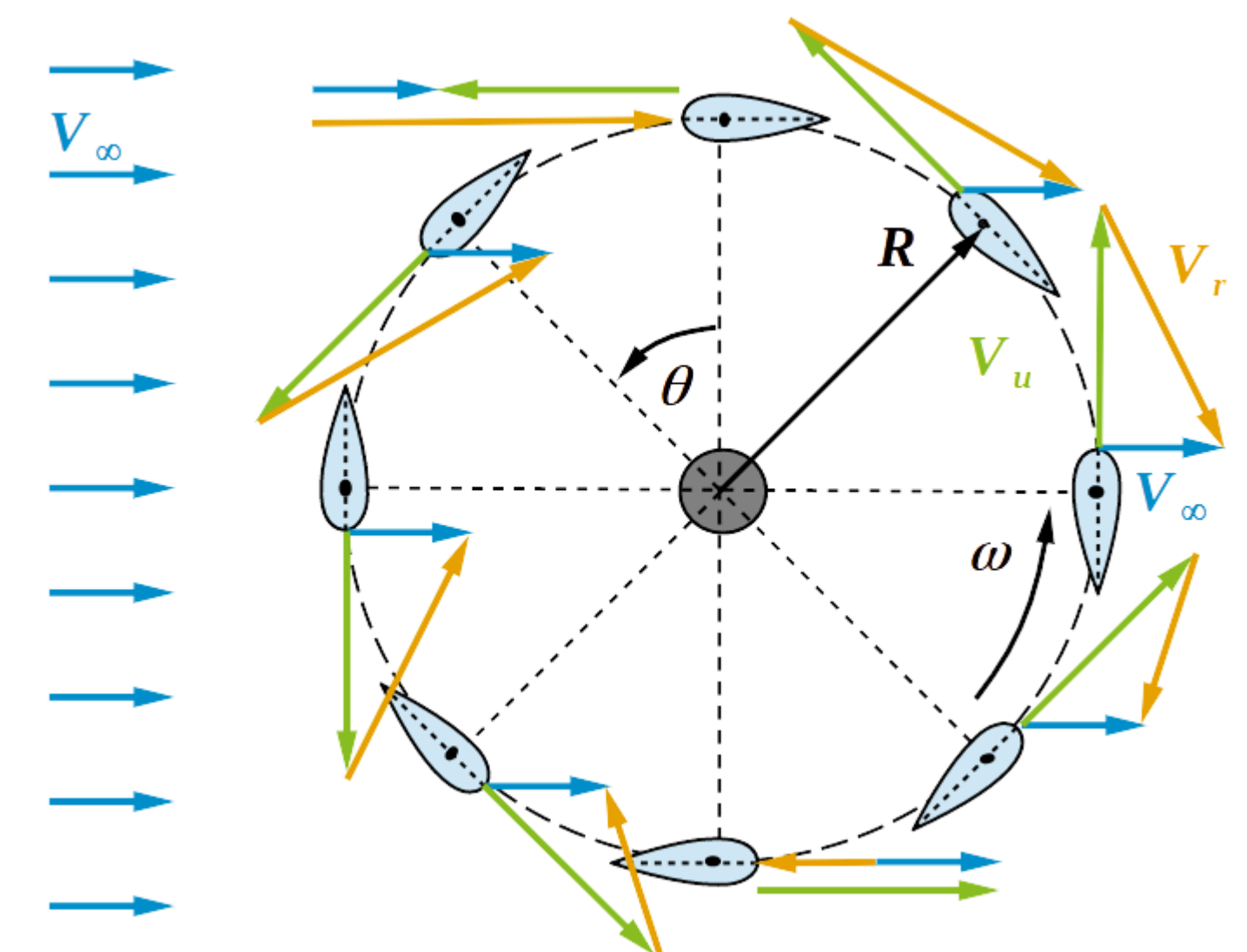


Abb.2: Veränderliche Anströmung der Rotorblätter bei der Drehung des Rotors mit der Umfangs- v , der Wind- v und der Relativgeschwindigkeit w . ³

¹ <https://www.agrarheute.com/management/agribusiness/windturbinen-vertikal-strom-erzeugen-fuers-eigenheim-600088>
² <https://www.efre-bremen.de/projekte/projekte-2014-2020/recycling-von-rotorblaettern-aus-windenergieanlagen-32368>
³ F. Thiele et al. (2022) Poster *Adaptive Profilgeometrie an vertikalen Windturbinen (SmartWingVAWT 01/20 – 12/22)*

Numerische Untersuchungen von Tragflügelumströmungen

- Erstellung von Setups für CFD-Simulationen
- Validierung an einem Standardprofil
- Betrachtung geometrisch modifizierter Tragflügel
- Bewertung der Performance unter dem Anwendungsfall einer VAWT

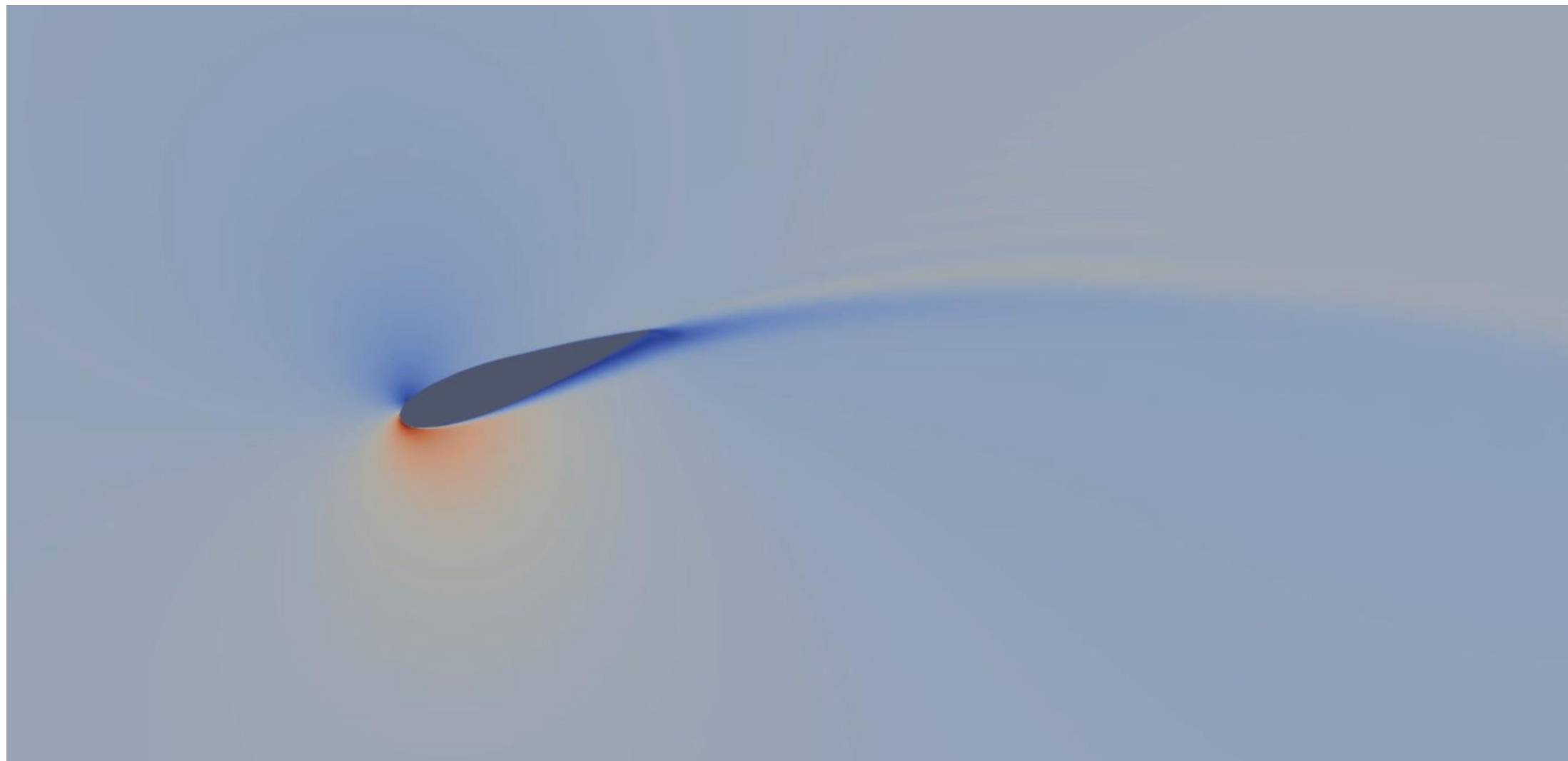


Abb.4: Geschwindigkeitsfeld der Tragflügelumströmung einer CFD-Simulation.



Abb.3: VAWT mit H-Rotor mit einer Nennleistung von 200 kW.⁴

⁴ <https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/cms/asset/c9ae50cc-3662-4978-9122-4777b2c5196f/ese323-fig-0001-m.jpg>

Anwendung des Single-Stream-Tube-Modells zur Modellierung der Anströmbedingung

- Bestimmung des **Anströmwinkels**, den das Rotorblatt während einer Umdrehung erfährt ⁵

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\sin(\omega t)}{\lambda + \cos(\omega t)}\right)$$

- **Annahme:** Rotorblatt wird zu jeder Zeit ideal angeströmt
- Verwendung kleinerer Rechengebiete, Minimierung des Rechenaufwands

Berechnung und Bewertung der aerodynamischen Beiwerte:

- Auftrieb (Lift):

$$c_L = \frac{2F_L}{\rho u_\infty^2 A}$$

- Widerstand (Drag):

$$c_D = \frac{2F_D}{\rho u_\infty^2 A}$$

⁵ Wang, Z. & Zhuang, M., 2017. Leading-edge serrations for performance improvement on a vertical-axis wind turbine at low tip-speed-ratios. *Applied Energy*, 208, pp.1184–1197.

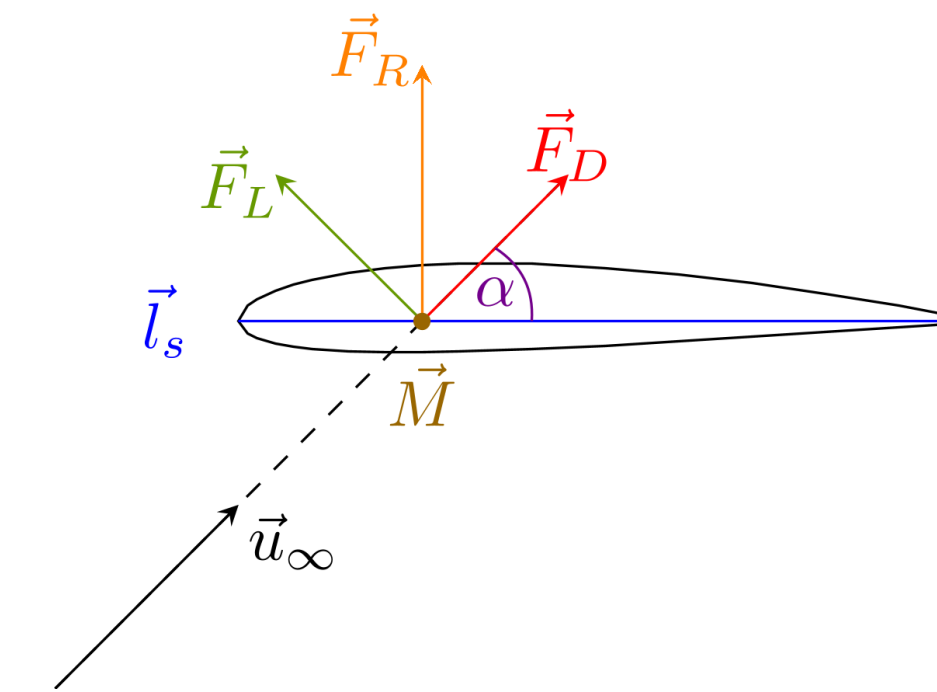


Abb.5: Schematisch Darstellung der Kräfte, des herrschenden Moments und resultierenden Anstellwinkel bei der Anströmung eines Tragflügelprofils.

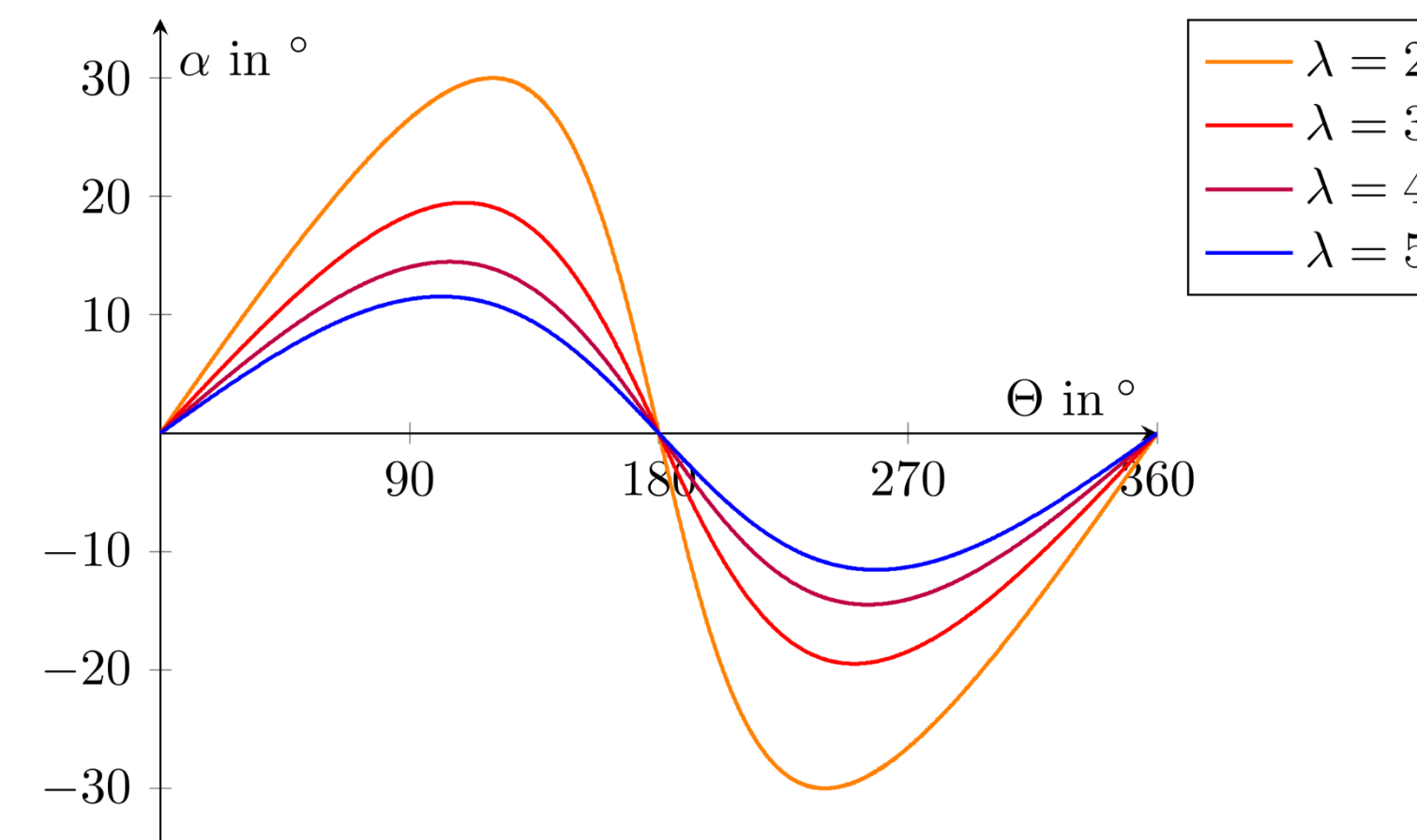


Abb.6: Abbildung des Anstellwinkels über den Rotorwinkel nach dem Single-Stream-Tube-Modell bei unterschiedlichen Schnelllaufzahlen $\lambda = \frac{\omega R}{u_\infty}$.

4. Vorstudie bei statischen Anströmbedingungen

Inhalt der Vorstudie

- Simulation der Umströmung eines NACA 0018-Profiles
- Statische Berechnung für verschiedene Anstellwinkel
- Verwendung eines C-Gitters ⁶
- Benchmark verschiedener Turbulenzmodelle
- **Ziel:** Einarbeitung in die CFD, Untersuchung der Wirkung des Turbulenzmodells auf die Berechnungsergebnisse

Größen und Kennzahlen in der Modellierung

Größe	Zeichen	Wert
Reynoldszahl	Re	500.000
turbulente Intensität	$Tu_{\%}$	10 %
turbulente Längenskala	Tu_L	1 m
Sehnenlänge	l_s	1 m
Profiltiefe	t_p	0,3 m

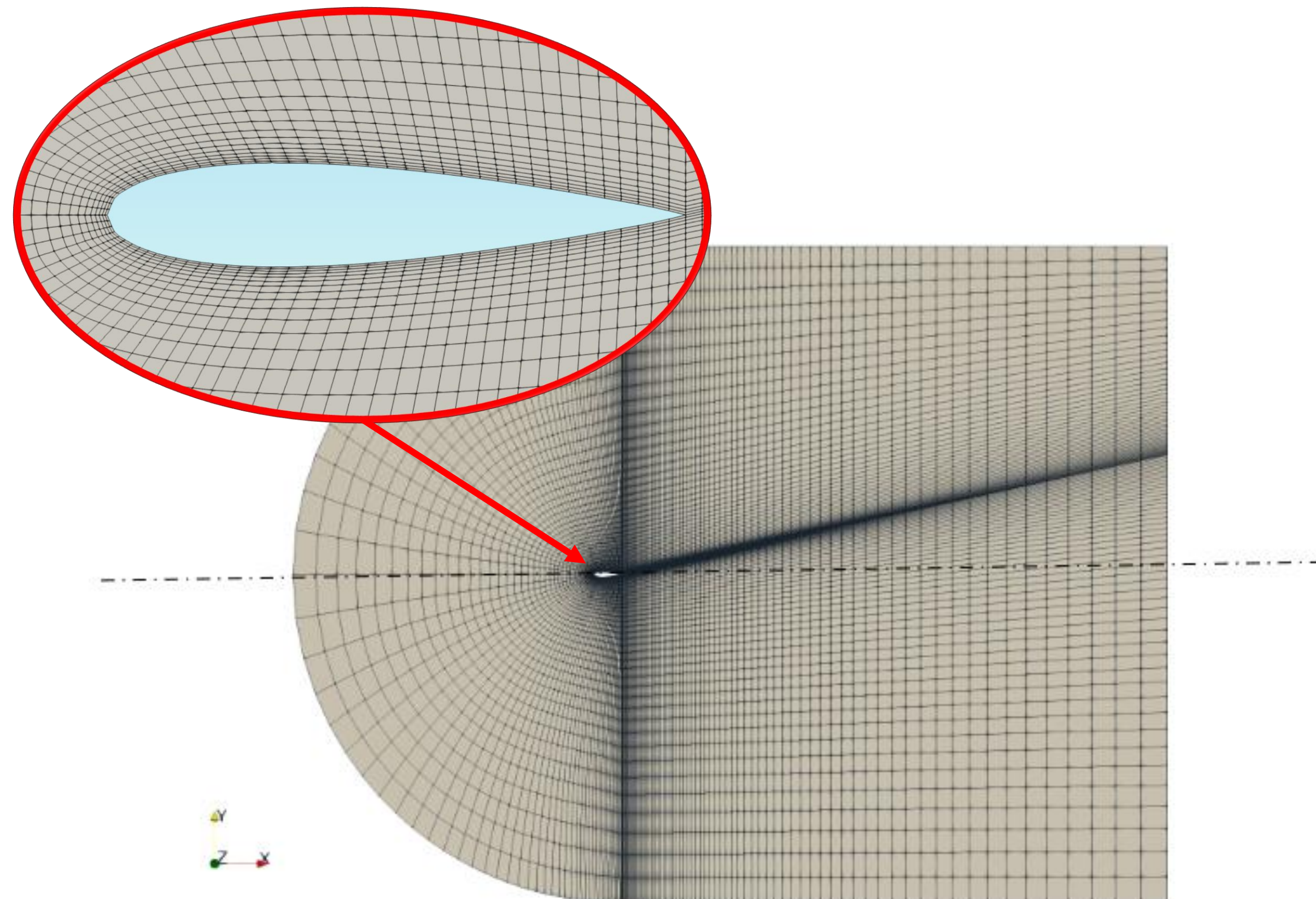


Abb.7: Schematisch Darstellung des verwendeten Rechengitters (C-Typ).

⁶ Thien Phan, blockMesh an Airfoil, <https://www.phanquochien.org/mesh-geometry/blockmesh/airfoil>

Plausibilisierung der Simulationsergebnisse

- Auswertung/Visualisierung charakteristischer Strömungsfelder
- Es zeigen sich die erwarteten charakteristische Strömungsverteilungen (z. B. Druck- und Saugseite, Staupunkt)

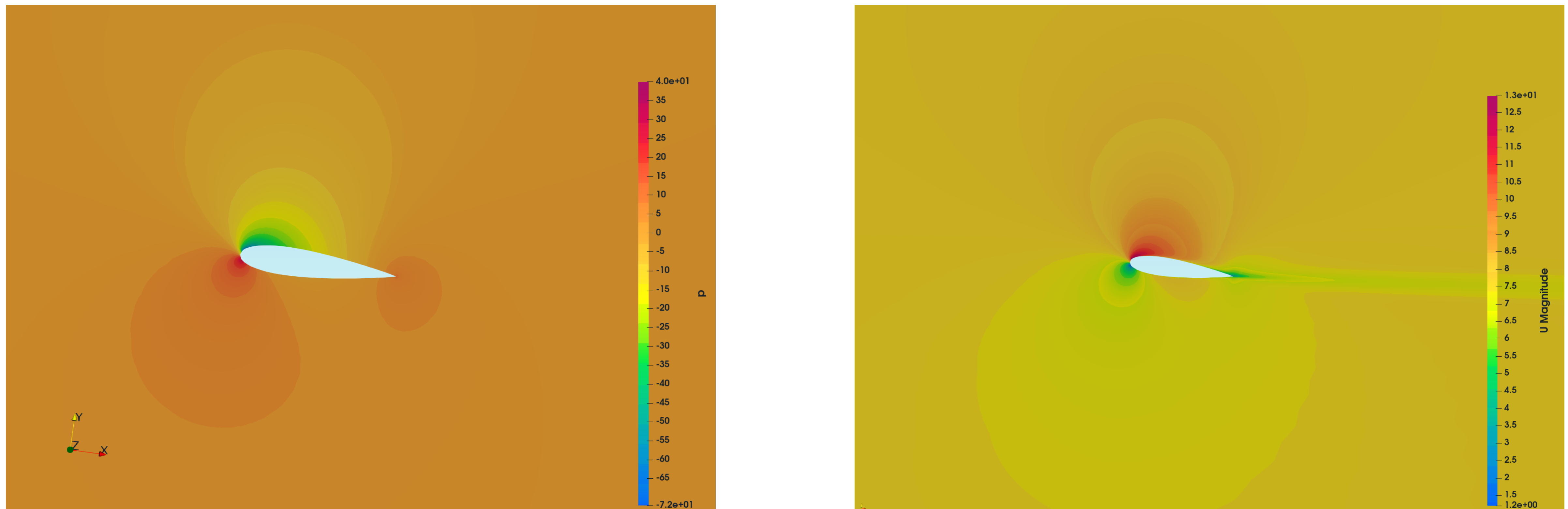


Abb.8: Darstellung des Druckfeldes (links) und des Geschwindigkeitsfeldes (rechts) bei einem Anstellwinkel von 8° und einer Anströmgeschwindigkeit von $7,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Benchmark verschiedener Turbulenzmodelle mithilfe der Zusammenfassung in einem Polardiagramm

- Durchführung von reynoldsgemittelten Navier-Stokes-Simulationen in OpenFOAM
- Verwendung unterschiedlicher/typischer Turbulenzmodelle
- Vergleich mit einer Profildatenbank (XFOIL)

Auswertung des Auftriebsbeiwertes

Spalart-Allmaras-Modell:

- Sehr präzise Abbildung
- kleiner relativer Fehler bei kleinen Anstellwinkeln

$k - \omega$ - & $k - \epsilon$ -Modell:

- Schlechtes Trendverhalten
- relativ hoher Fehler

$k - \omega - SST$ -Modell:

- Sehr gutes Trendverhalten (Strömungsabriss)
- Weniger hohe Genauigkeit

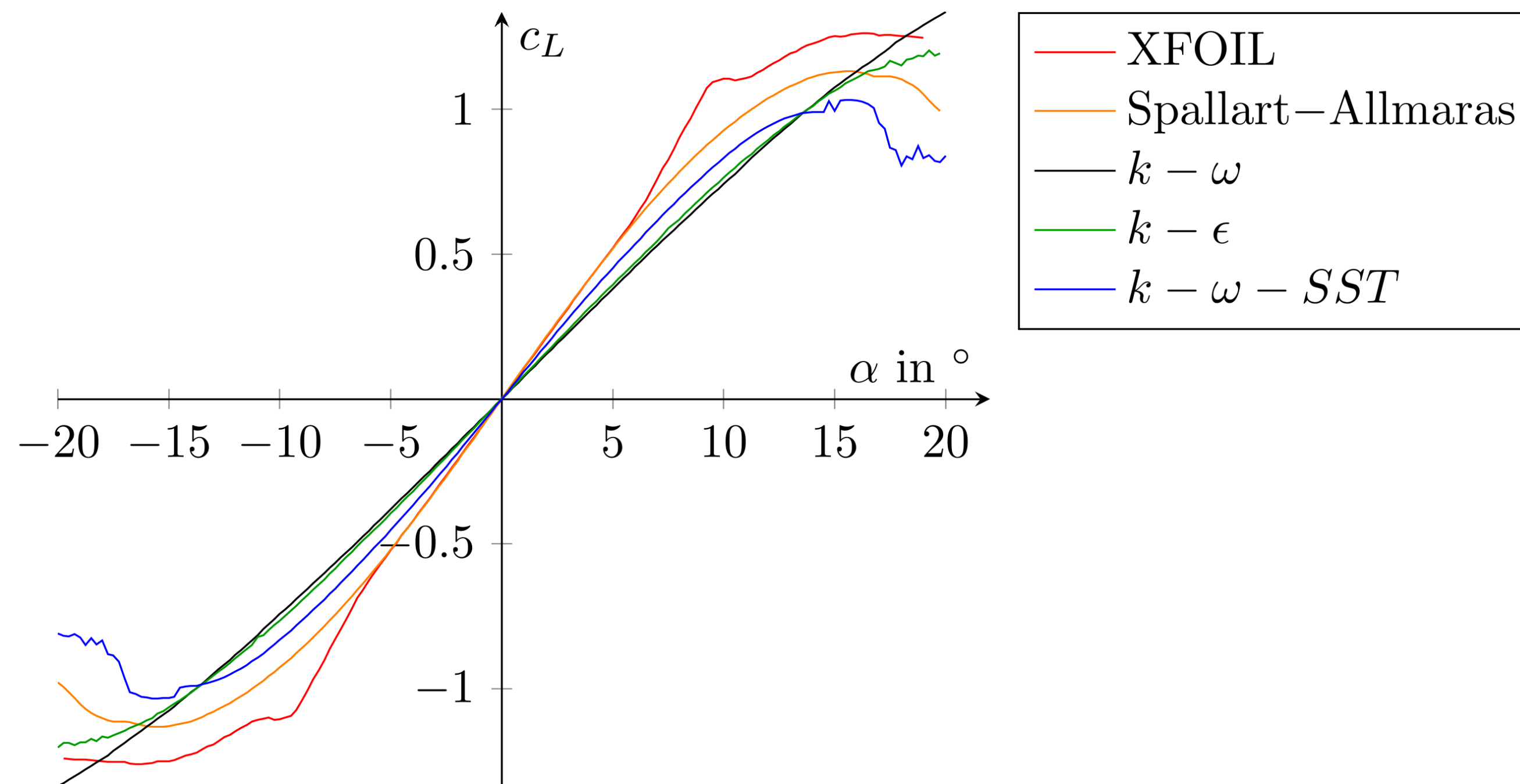


Abb.9: Auswertung der Berechnungsergebnisse in Form eines Polardiagramms vom Auftriebsbeiwert c_L über den Anstellwinkel α .⁷

⁷ airfoiltools.com. Naca 0018 (naca0018-il). Airfoil-Tools, 2024. <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0018-il>.

Benchmark verschiedener Turbulenzmodelle mithilfe der Zusammenfassung in einem Polardiagramm

- Durchführung von reynoldsgemittelten Navier-Stokes-Simulationen in OpenFOAM
- Verwendung unterschiedlicher/typischer Turbulenzmodelle
- Vergleich mit einer Profildatenbank (XFOIL)

Auswertung des Widerstandsbeiwertes

Spalart-Allmaras-Modell:

- Sehr präzise Abbildung
- mittlerer Fehler bei kleinen Anstellwinkeln

$k - \omega$ - & $k - \epsilon$ -Modell:

- vorhandenes Trendverhalten
- sehr großer Fehler

$k - \omega$ - SST -Modell:

- Sehr gutes Trendverhalten (Strömungsabriss)
- Großer relativer Fehler

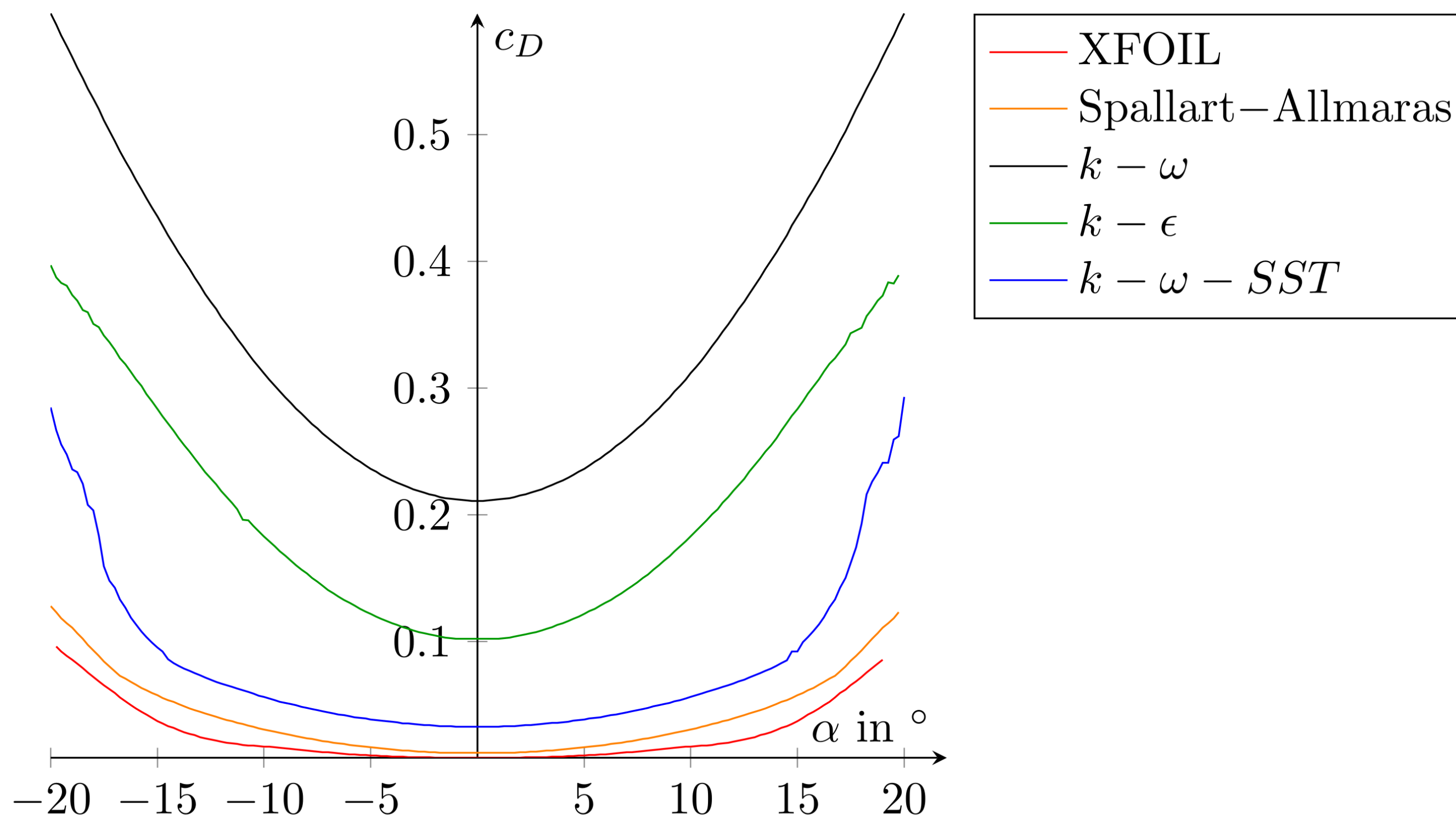


Abb.10: Abbildung eines Polardiagramms des Widerstandsbeiwertes c_D über den Anstellwinkel α .⁷

⁷ airfoiltools.com. Naca 0018 (naca0018-il). Airfoil-Tools, 2024. <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0018-il>.

Inhalt der Vorstudie

- Simulation der Umströmung eines einzelnen Rotorblatts und nicht des gesamten Rotors
- Genauigkeitsverlust bei der Abstraktion der zyklischen Anströmung wird in Kauf genommen
- transiente Berechnung unter Verwendung eines dynamischen Gitters
- Benchmark verschiedener Turbulenzmodelle

Ziel

- periodische Anströmung zu simulieren
- Einzelblattoptimierung

Größen und Kennzahlen

Größe	Wert
Re	400000
λ	3
u_∞	$10 \frac{m}{s}$

Größe	Wert
r	1,5 m
t_p	1 m
l_s	0,2 m

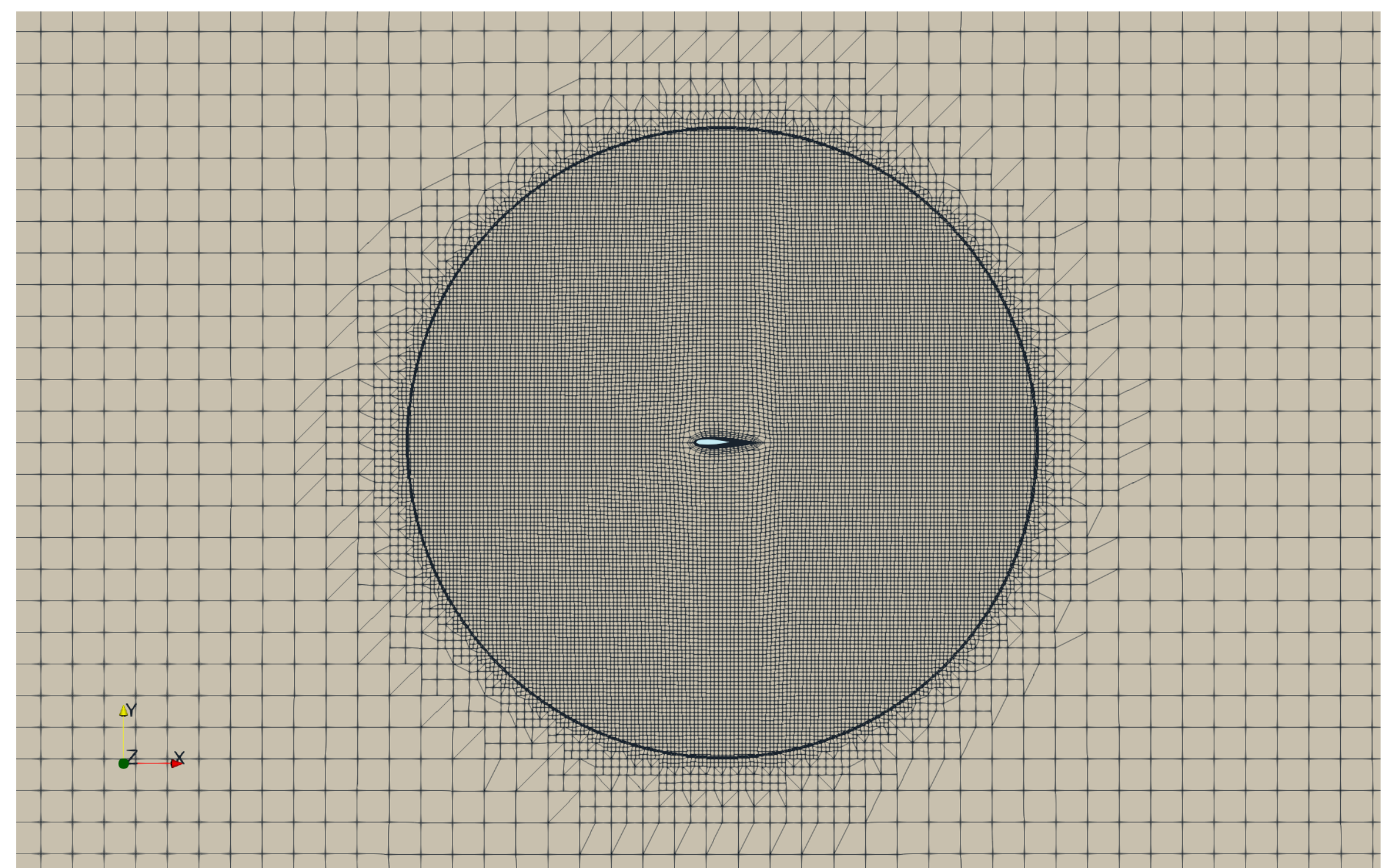


Abb.11: Darstellung der Vernetzung eines Rotorblatts einer idealisierten vertikalachsigen Windturbine mit Sehnenlänge 0,2 m.

Benchmark verschiedener Turbulenzmodelle

- Verwendung analoger Modelle wie bei stationärer Betrachtung
- Auftragung der Beiwerte über dem Rotorwinkel Θ
- Vergleich mit XFOIL

Auswertung des Auftriebsbeiwertes

$k - \omega$ –Modell:

- Instabil → Abbruch der Simulation

$k - \epsilon$ –Modell:

- Extrema überschreiten Referenzwerte nur minimal
- Schlechtes Abbilden von Turbulenzen

$k - \omega - SST$ –Modell:

- Sehr gutes Trendverhalten
- Gute Abbildung von Turbulenzen

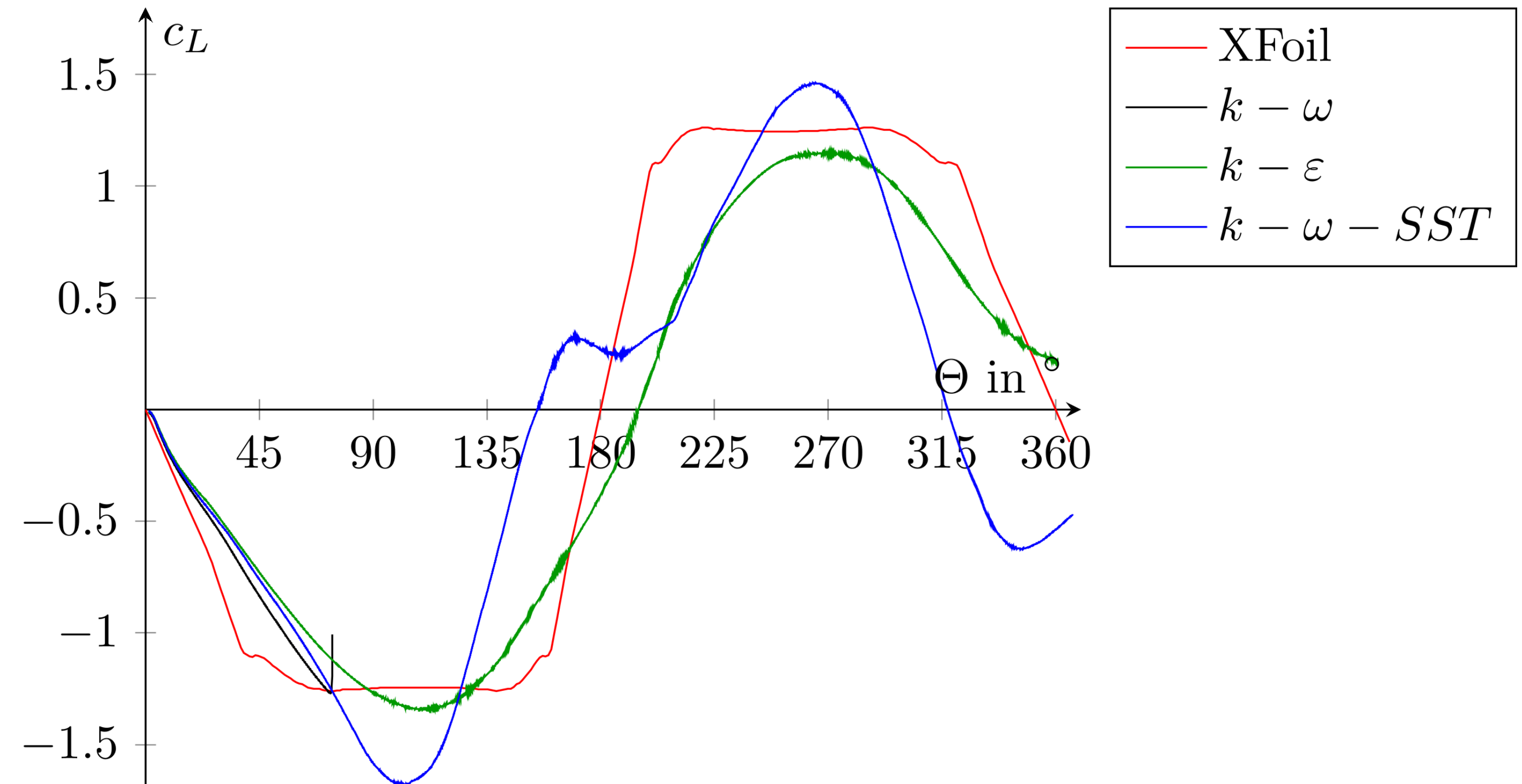


Abb.12: Verlauf der Auftriebsbeiwerte über den Rotorwinkel bei unterschiedlichen Turbulenzmodellen. ⁷

⁷ airfoiltools.com. Naca 0018 (naca0018-il). Airfoil-Tools, 2024. <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0018-il>.

Benchmark verschiedener Turbulenzmodelle

- Verwendung analoger Modelle wie bei stationärer Betrachtung
- Auftragung der Beiwerte über dem Rotorwinkel Θ
- Vergleich mit XFOIL

Auswertung des Widerstandsbeiwertes

$k - \epsilon$ -Modell & $k - \omega - SST$ -Modell:

- Sehr großer relativer Fehler
- Gutes Trendverhalten

$k - \omega$ -Modell:

- Zeigt sehr große Abweichungen
- Instabil → Abbruch der Simulation

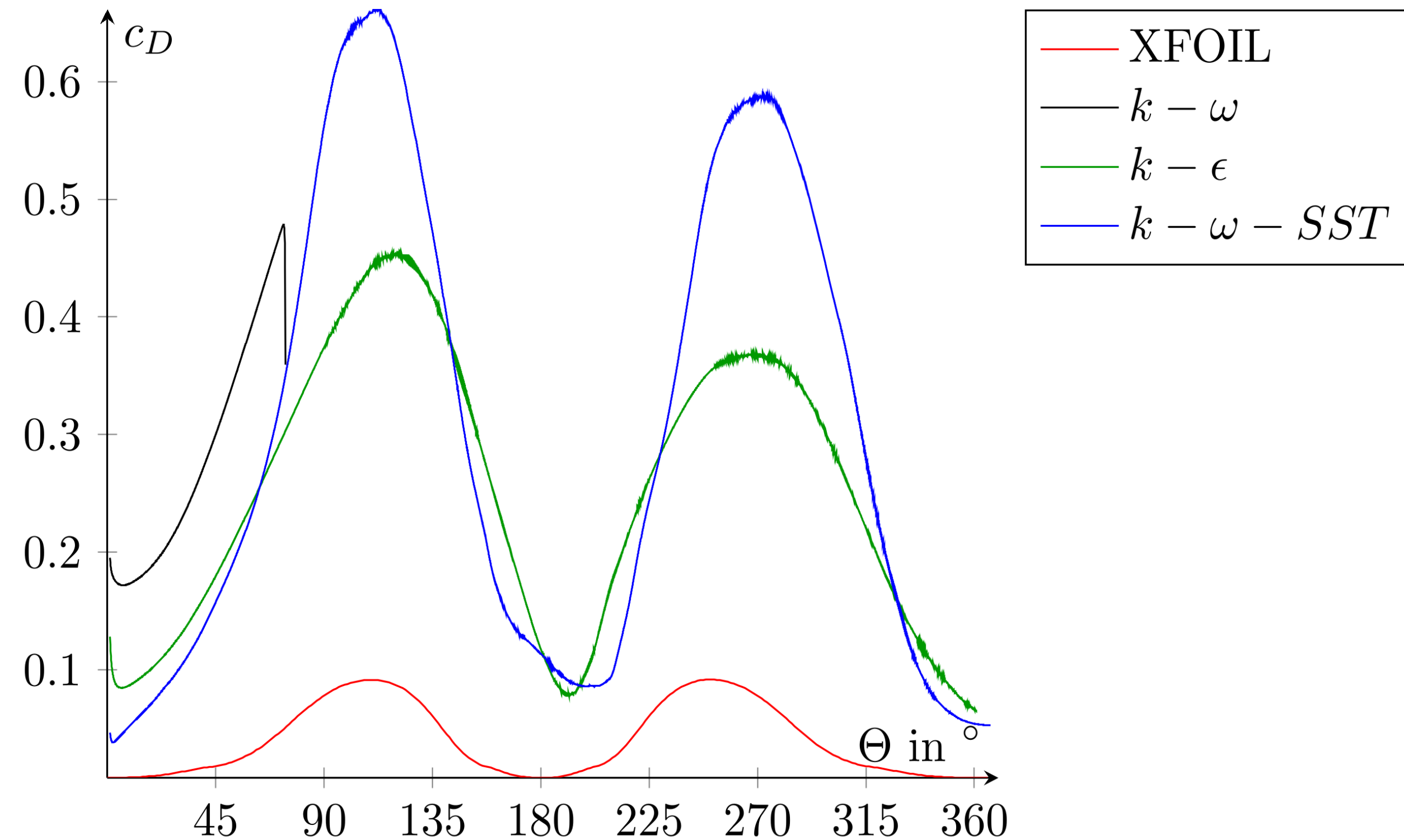


Abb.13: Verlauf der Widerstandsbeiwerte über den Rotorwinkel bei unterschiedlichen Turbulenzmodellen. ⁷

⁷ airfoiltools.com. Naca 0018 (naca0018-il). Airfoil-Tools, 2024. <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0018-il>.

Betrachtung unterschiedliche geometrischer Modifikationen mit dem Ziel der Performancesteigerung

- Verzögerung des Ablöseverhalten (bei möglichst großen Anstellwinkeln)
- Steigerung Auftrieb
- Verringerung Widerstand

Basierend auf Literaturrecherche: Fokussierung auf abgewinkelte Profilhinterkante (Gurney-Flap) und gewellte Vorderkante (Leading-Edge-Tubercles)

- Senkrechte Kante am Flügelende
- Verhindert den direkten Kurzschluss zwischen Saug- und Druckseite
- Gewellte Vorderkante des Flügels
- längs gerichtete Wirbel stabilisieren die Strömung und verzögern den Abriss ⁸

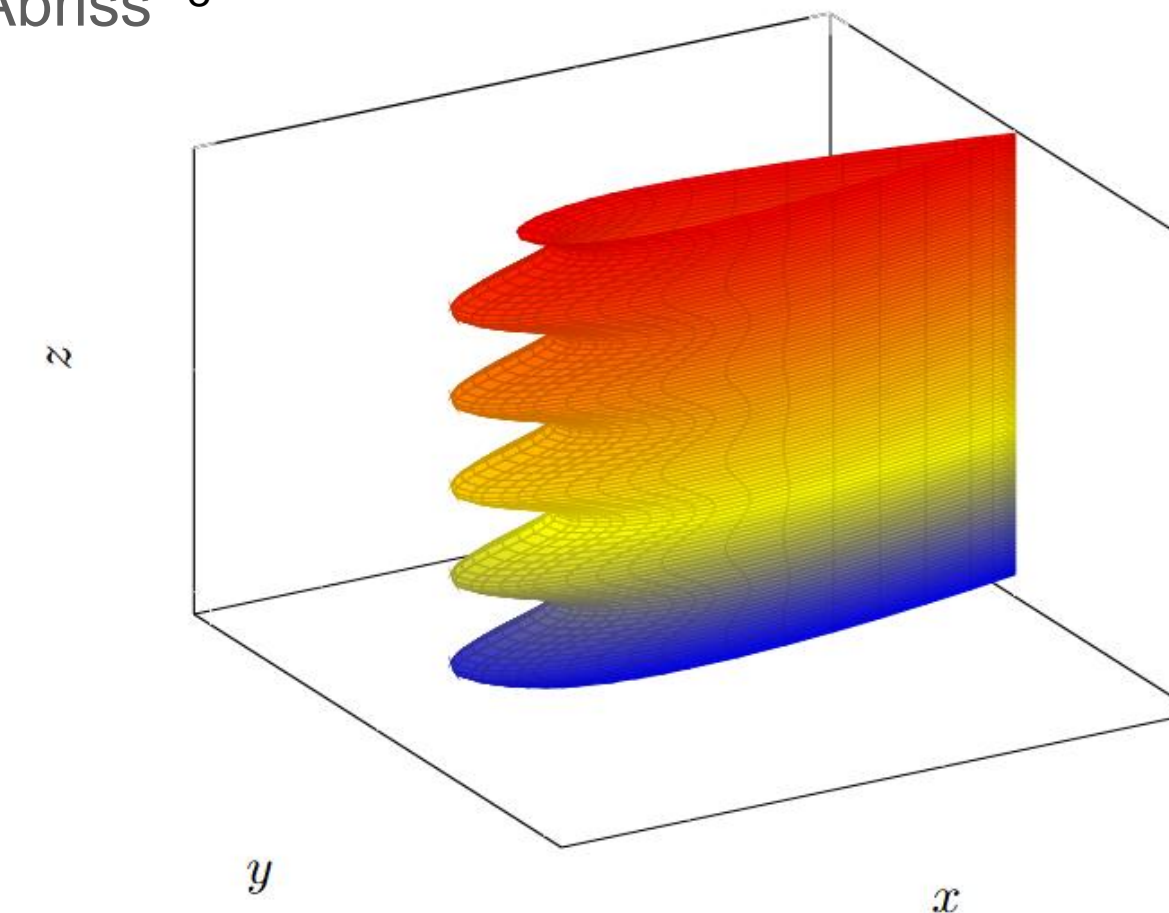
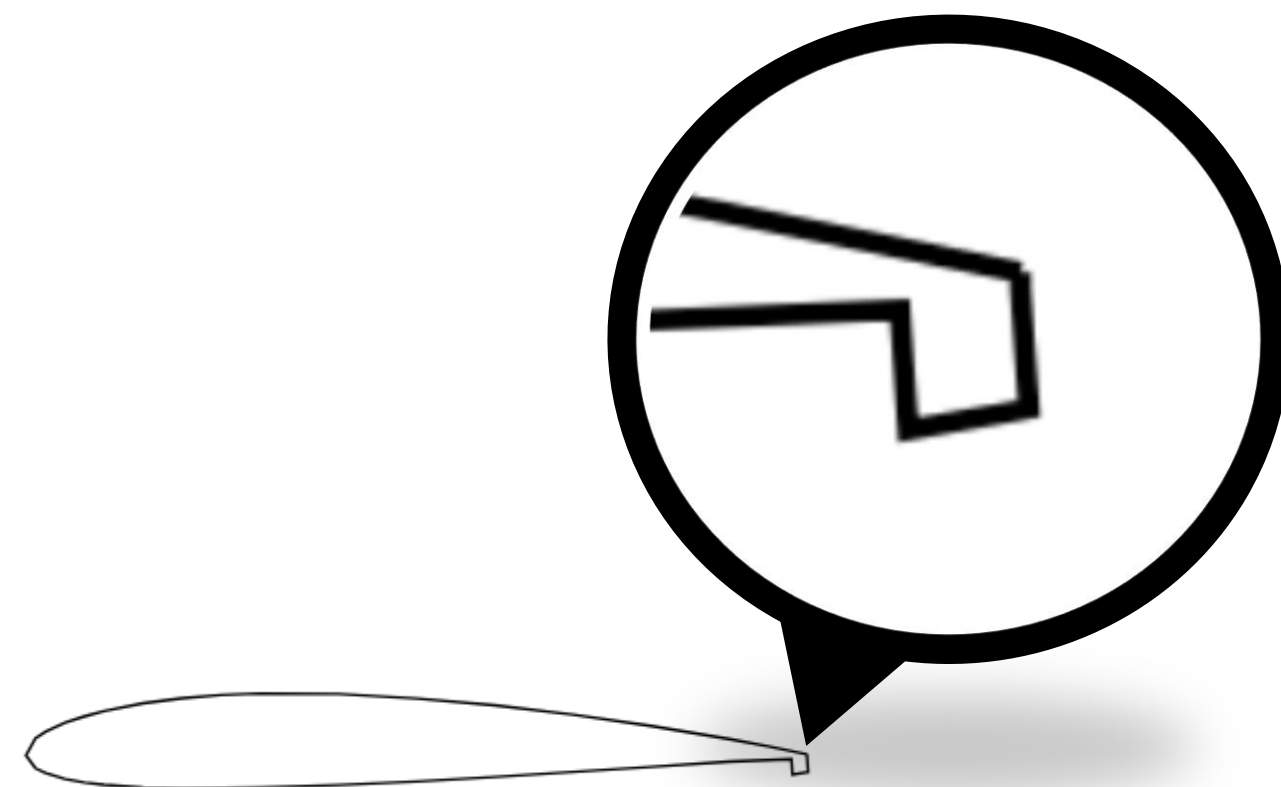


Abb.13: Visualisierung der untersuchten geometrischen Modifikation auf Basis des Ausgangsprofils NACA0018. Zu erkennen ist die charakteristischen abgewinkelten Profilhinterkante der Gurney-Flap (links) und der gewellten Vorderkante (rechts).

⁸ Hansen, K.L. et al. (2016) 'Evolution of the streamwise vortices generated between leading edge tubercles', Journal of Fluid Mechanics, 788, pp. 730–766. doi:10.1017/jfm.2015.611.

Auswertung des Auftriebsbeiwertes in Abhängigkeit des Rotorwinkels

- **Gurney-Flap:** deutliche Steigerung (insbesondere im Bereich positiver Anstellwinkel)
- **Leading-Edge-Tubercles:** keine deutliche Änderung

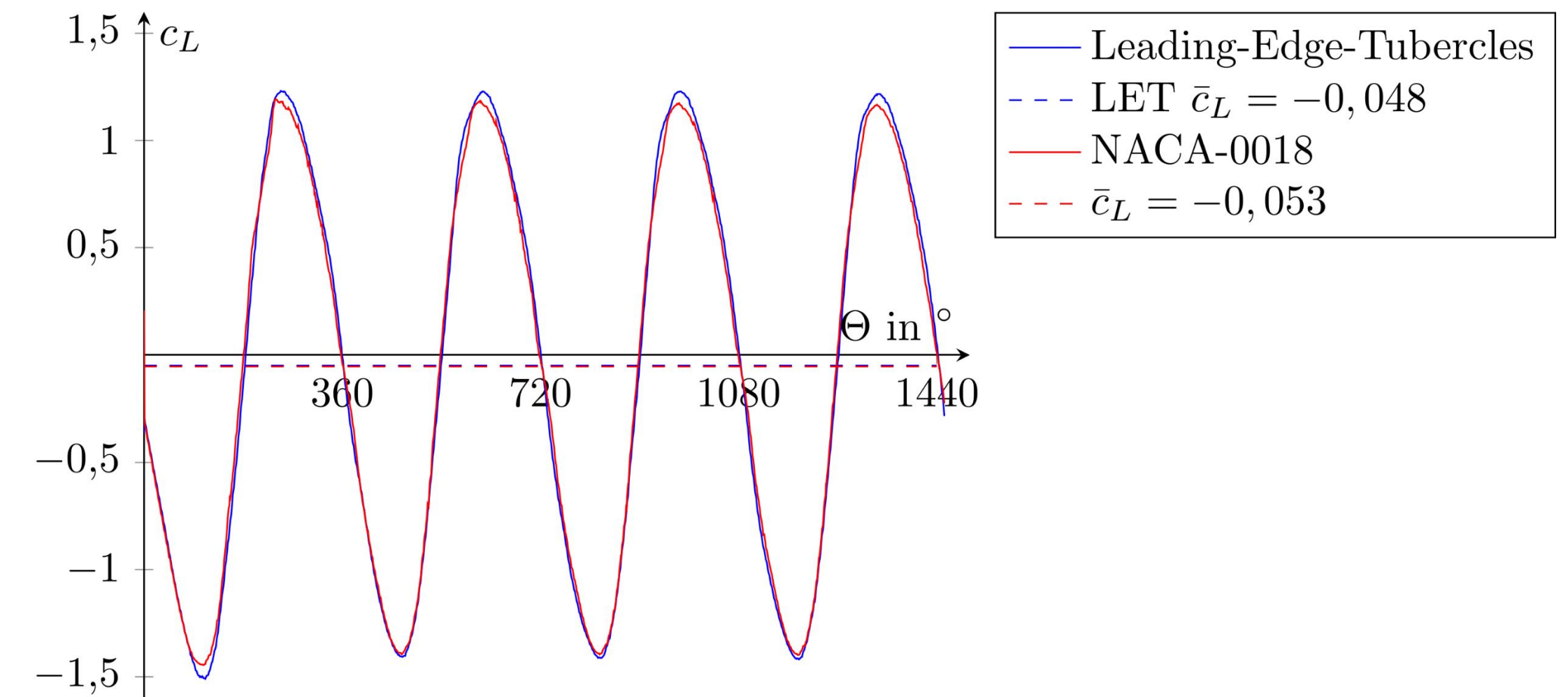
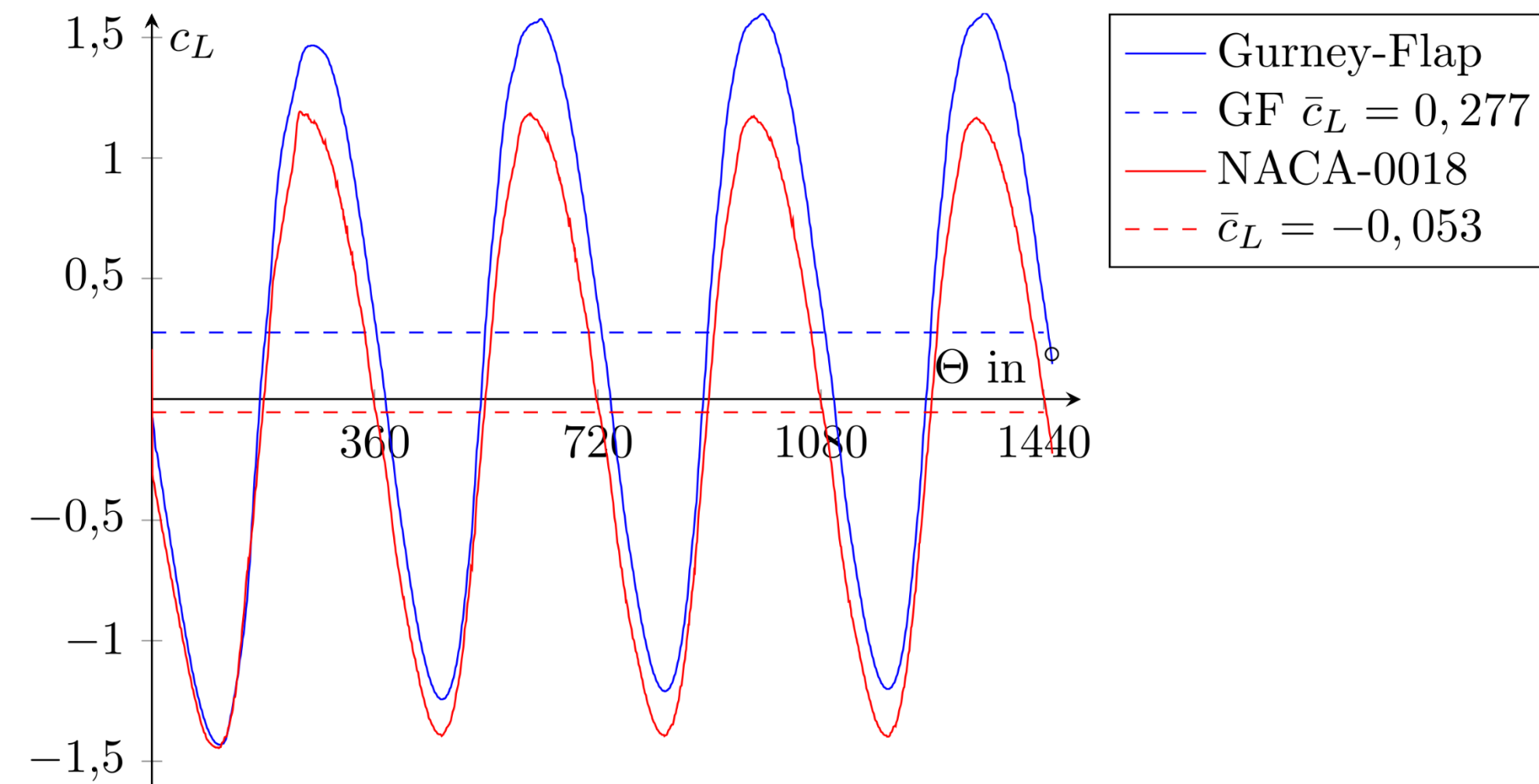


Abb.13: Auftragung des Auftriebsbeiwertes in Abhängigkeit des Rotorwinkels für ein NACA0018-Profil mit Gurney-Flap (links) und mit gewellter Vorderkante (rechts). Vergleichend wurde der Verlauf für das Standardprofil in beiden Diagrammen aufgetragen.

Auswertung des Widerstandsbeiwertes in Abhängigkeit des Rotorwinkels

- **Gurney-Flap:** deutliche Steigerung
- **Leading-Edge-Tubercles:** deutliche Steigerung

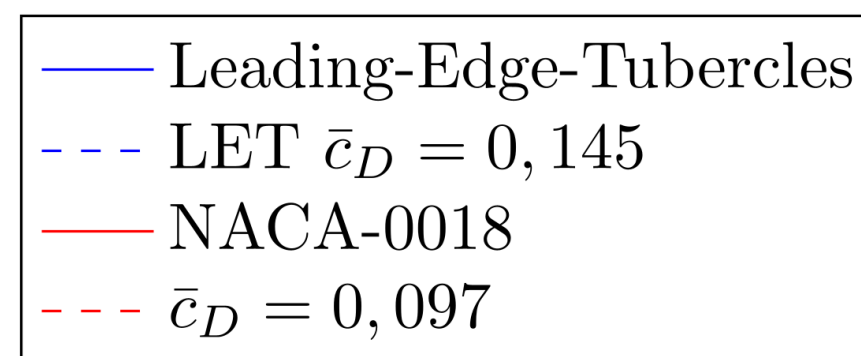
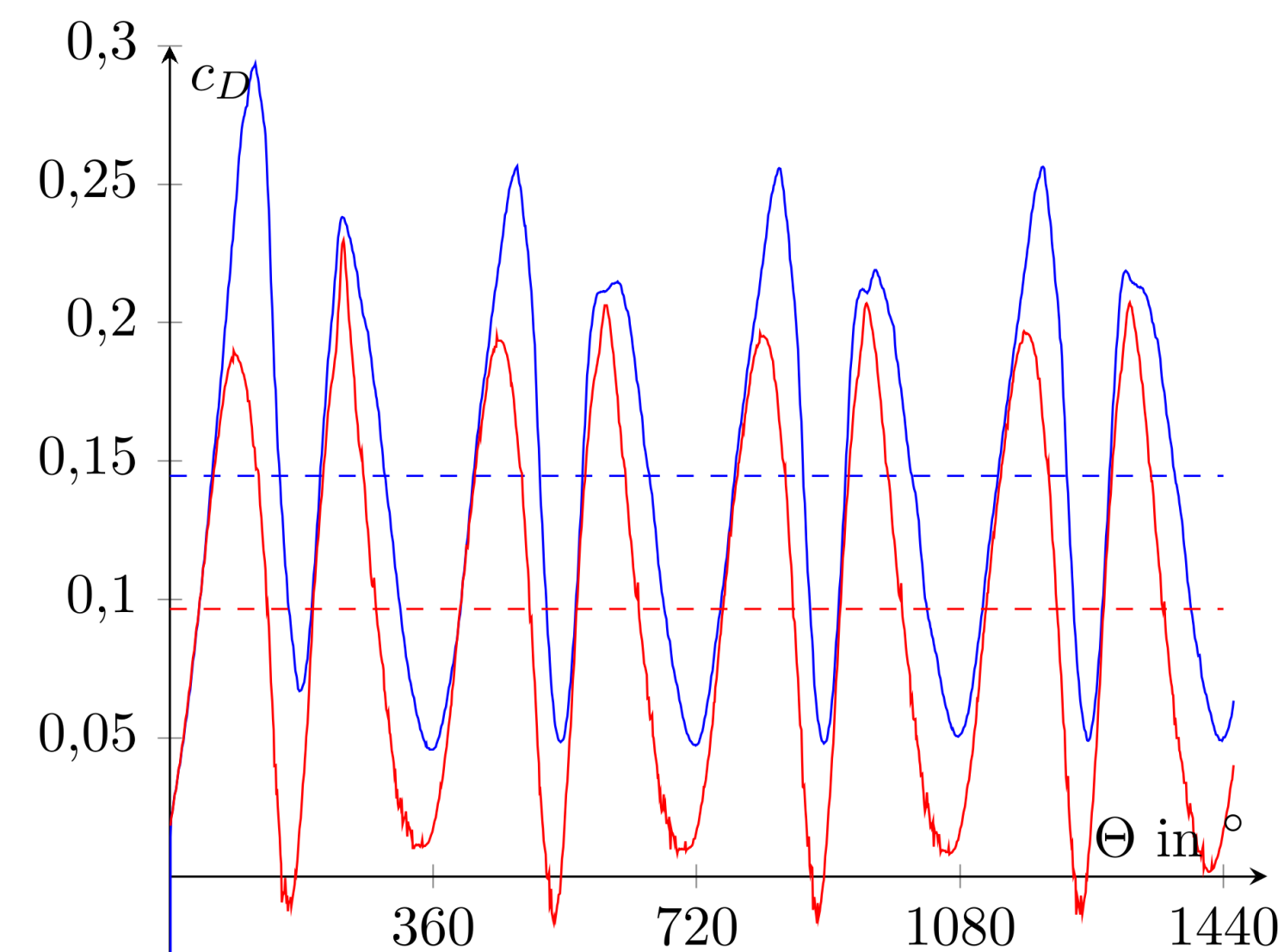
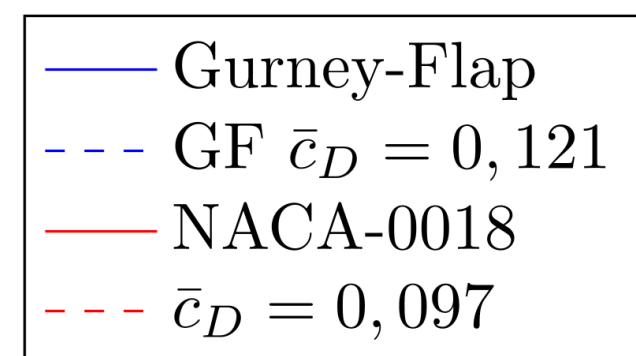
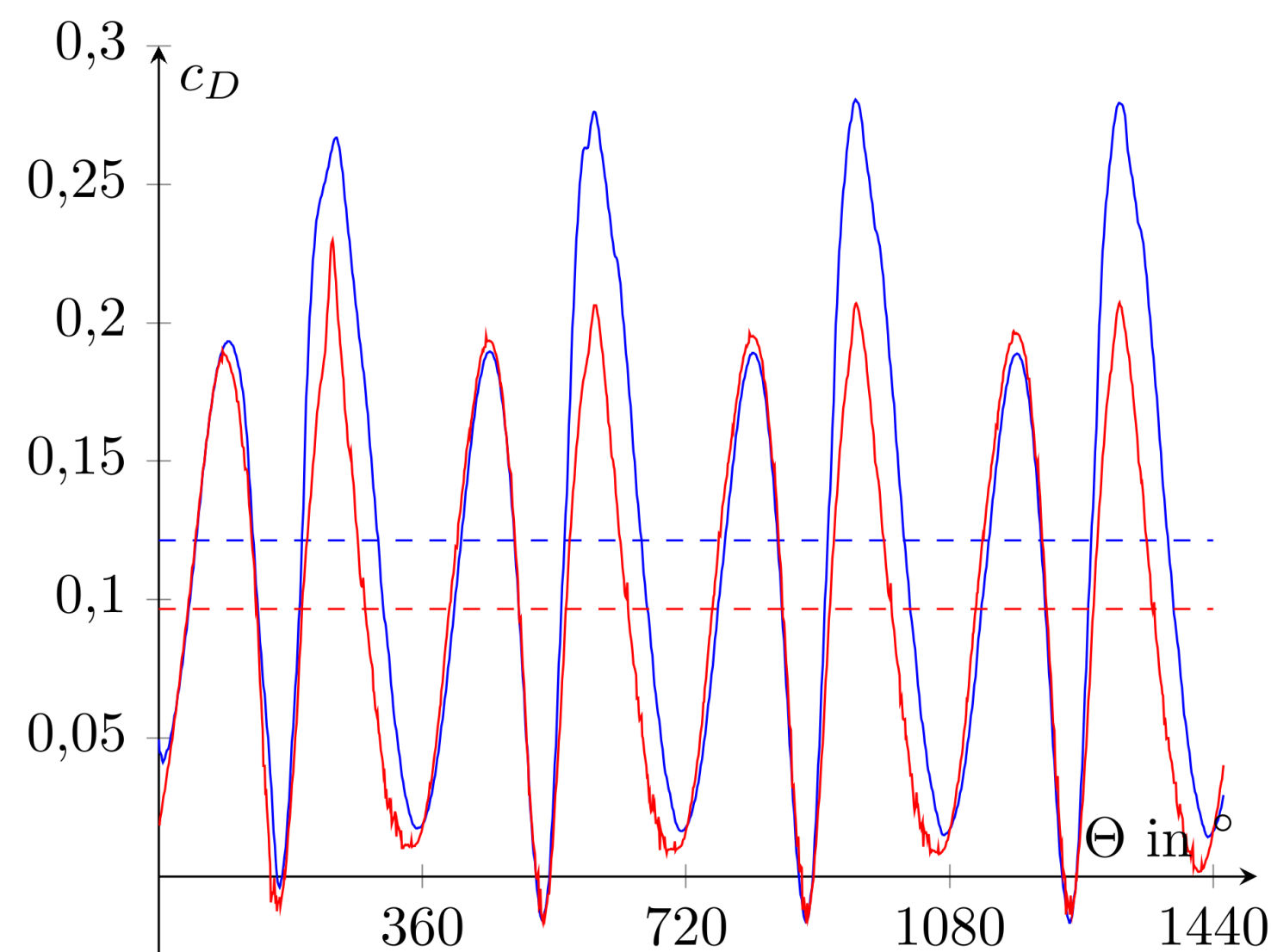


Abb.13: Auftragung des Widerstandsbeiwertes in Abhängigkeit des Rotorwinkels für ein NACA0018-Profil mit Gurney-Flap (links) und mit gewellter Vorderkante (rechts). Vergleichend wurde der Verlauf für das Standardprofil in beiden Diagrammen aufgetragen.

Fazit

- Durchführung verschiedener Berechnungen mit statischen und dynamischen Anströmbedingungen
- Untersuchung der Modifikationen zeigt teilweise eine Performancesteigerung des Tragflügelprofils
- Verbesserung wird durch erhöhten Widerstandsbeiwert erkauft
- Betrachtung des Einflusses von höheren Widerstandsbeiwerten auf die Leistung des gesamten Rotors

Herausforderungen

- Ergebnisse sind stark vom Netz und den eingestellten Turbulenzparametern abhängig, insbesondere auf c_D
- Spalart-Allmaras- und $k-\omega-SST$ -Modell liefern gute Ergebnisse

Ausblick

- Anpassung von Netz und Turbulenz
- Untersuchung weiterer Tragflügelprofile (z. B. MDA 30P30N) und Modifikationen
- Simulation eines Rotors mit mehreren Rotorblättern
- Entwicklung eines eigenen Algorithmus für kontrollierte Vernetzung im Rahmen eines wissenschaftlichen Projekts

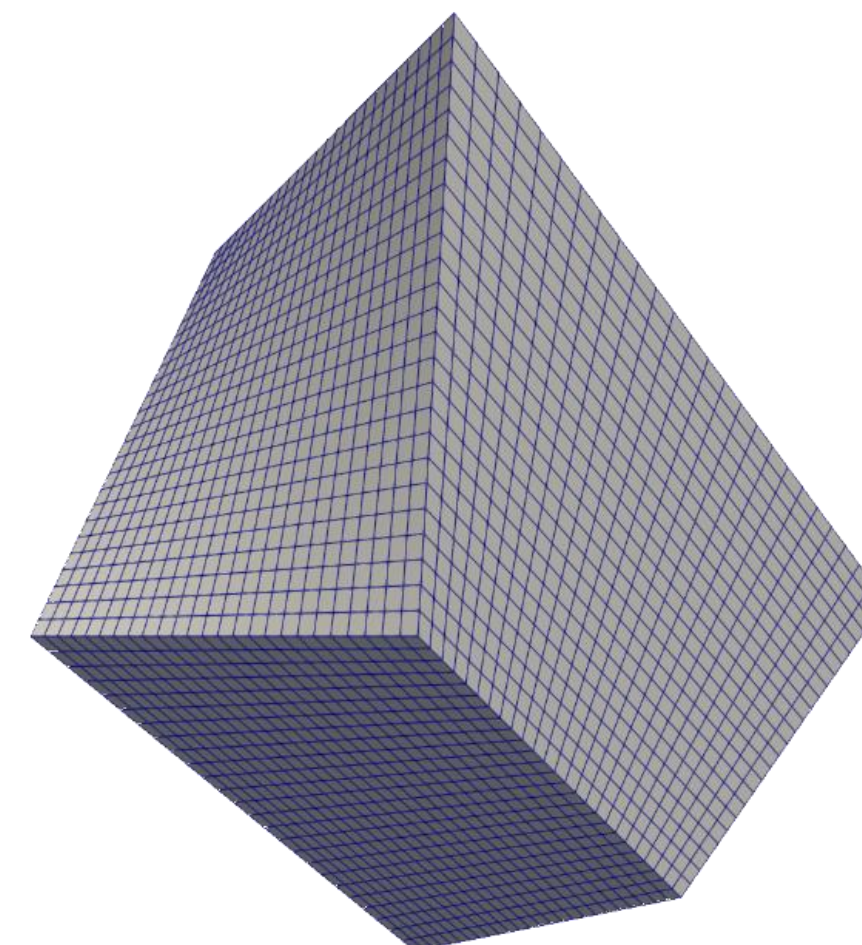


Abb.14: Exemplarische Darstellung eines, mit dem eigenen Algorithmus vernetzten, verzerrten Blocks.



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Kontakt:

Markus Negedly

E-Mail: markus.negedly@stud.hszg.de

Mobil: 015252021149



GEFÖRDERT VOM

Quelle:

- [1] <https://www.agrarheute.com/management/agribusiness/windturbinen-vertikal-strom-erzeugen-fuers-eigenheim-600088>
- [2] <https://www.efre-bremen.de/projekte/projekte-2014-2020/recycling-von-rotorblaettern-aus-windenergieanlagen-32368>
- [3] <https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/cms/asset/c9ae50cc-3662-4978-9122-4777b2c5196f/ese323-fig-0001-m.jpg>
- [4] F. Thiele et al. (2022) Poster *Adaptive Profilgeometrie an vertikalen Windturbinen (SmartWingVAWT 01/20 – 12/22)*
- [5] Zhenyu Wang and Mei Zhuang. Leading-edge serrations for performance improvement on a vertical-axis wind turbine at low tip-speed-ratios. *Applied Energy*, 208:1184–1197, 2017.
- [6] Thien Phan, blockMesh an Airfoil, <https://www.phanquochien.org/mesh-geometry/blockmesh/airfoil>
- [7] airfoiltools.com. Naca 0018 (naca0018-il). Airfoil-Tools, 2024. <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0018-il>.
- [8] Hansen, K.L. et al. (2016) ‘Evolution of the streamwise vortices generated between leading edge tubercles’, *Journal of Fluid Mechanics*, 788, pp. 730–766. doi:10.1017/jfm.2015.611.