

Adaptive Profilgeometrie an vertikalen Windturbinen (SmartWingVAWT 01/20 - 12/22) Numerische Aeroakustik für Turbomaschinen (NUMAERO 04/19 - 12/21)

M. Eng. Franz Thiele, M. Eng. Martin Sünder, Prof. Dr.-Ing. Tobias Kempe

1. Motivation und Zielsetzung

Das Ziel des Projektes SmartWingVAWT ist die Steigerung der Effizienz von Windturbinen mit vertikaler Drehachse (VAWT). Bei VAWT ändern sich die Anströmverhältnisse auf die Rotorblätter bei der Umdrehung, so dass diese nur bei bestimmten Drehwinkeln ideal angeströmt werden. Zur Vermeidung von Bereichen ohne effektivem Beitrag zur Energiegewinnung ist es erforderlich, dass sich der Anstellwinkel während der Drehung um die Achse ändert. Das Projekt NUMAERO fokussiert auf die Reduktion des Strömungslärmes bei Tragflügeln. Die Profilumströmung wird hierbei mittels modernster Simulationsmethoden auf Hochleistungsrechnern und mit laseroptischen Messverfahren untersucht. Die Ergebnisse aus NUMAERO dienen gleichzeitig der Umsetzung eines neuen Anlagenkonzeptes für VAWT im Projekt SmartWingVAWT.



Abb. 1: H-Rotor einer VAWT.

2. Bearbeitete Themenschwerpunkte

- Entwicklung eines halbempirischen Berechnungsmodells zur Bestimmung der Leistungskennlinie von VAWT in einem Python-Programm [1]
- Numerische Untersuchung der Umströmung verschiedener Tragflügelkonturen [2] und Rotorkonfigurationen [3] mit den Navier-Stokes-Löser OpenFOAM
- Aufbau eines Versuchsstandes zur experimentellen Untersuchung unterschiedlicher H-Rotoren im Strömungskanal der HSZG [4]
- Entwicklung eines Mechanismus zur adaptiven Blattverstellung mit Hilfe von Servomotoren und einer mikrocontrollerbasierten Steuerung [5]
- Ableitung eines Anlagenkonzeptes zur Entwicklung einer vertikalachsigen Kleinwindkraftanlage mit adaptiv verstellbaren Rotorblättern [6]
- Entwicklung einer modular erweiterbaren, autarken Wetterstation zur zeitgenauen Erfassung von Klimadaten (Wind, Solarstrahlung etc.) für den Betrieb einer Kleinwindenergieanlage [7]

3. Stand von Wissenschaft und Technik VAWT mit H-Rotoren

Die nachteiligen Eigenschaften von VAWT resultieren aus der periodischen Änderung der Anströmbedingung der Flügelblätter während der Umdrehung des Rotors. Die Betriebsweise dieser Anlagen lässt sich wie folgt charakterisieren:

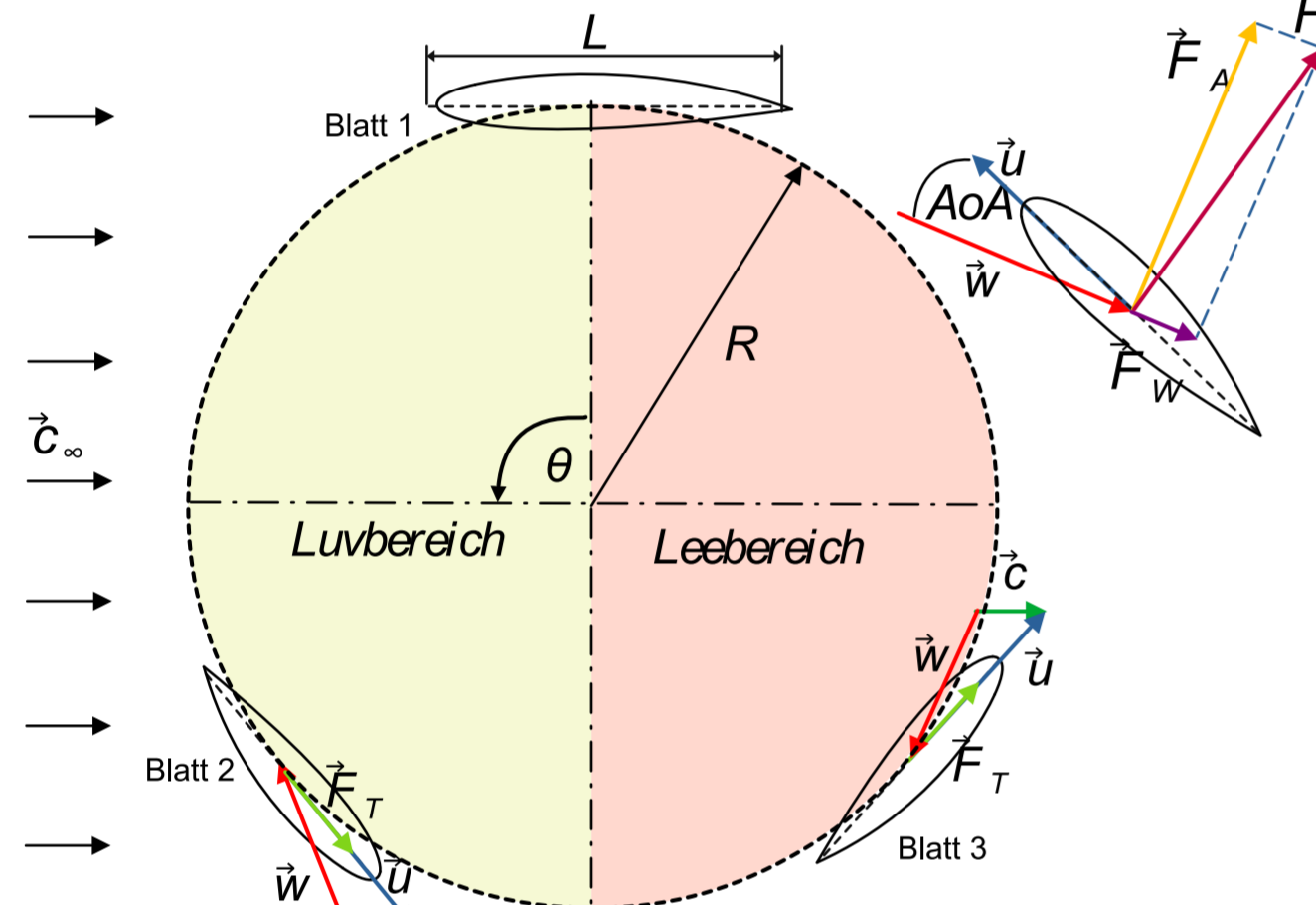


Abb. 2: Darstellung der Geschwindigkeitsdreiecke sowie der auf die Rotorblätter wirkenden Kräfte. Die effektive Kraft \vec{F}_R folgt aus der Projektion der aerodynamischen Kraft am Tragflügel \vec{F}_R auf die Umfangsrichtung.

- Nutzung des Auftriebs von vertikal angeordneten aerodynamisch geformten Profilen (Abb. 2)
- periodische Änderung des Anstellwinkels (AoA) am Flügelblatt infolge der Rotordrehung (Abb. 3)

$$AoA = \arctan \left[\frac{\sin \theta}{\lambda + \cos \theta} \right]$$

- Strömungsabriss (Stall) beim Überschreiten des kritischen Anstellwinkels
- starke Abhängigkeit der Leistungsübertragung vom Betriebspunkt bzw. von der Schnelllaufzahl λ

$$\lambda = \frac{u}{c_\infty} = \frac{\omega R}{c_\infty}$$

- Rotorblätter erfahren hohe AoA bei niedriger Schnelllaufzahl λ und umgekehrt
- Minderung der Effizienz im Leebereich des Rotors durch Fehlanströmung (Abb. 4 und 8)

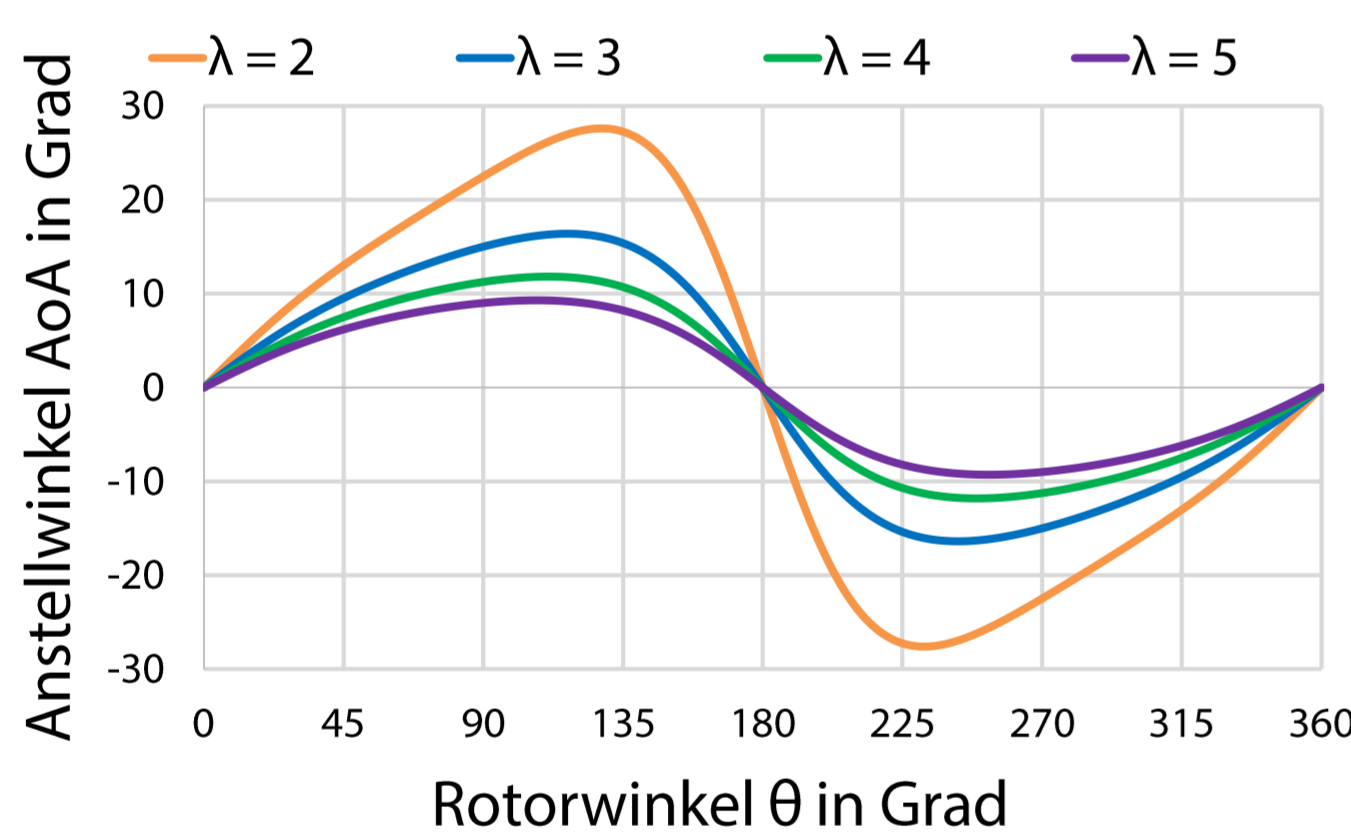


Abb. 3: Verlauf des Anstellwinkels in Abhängigkeit des Rotorwinkels θ für verschiedene Schnelllaufzahlen λ bei idealer Rotorumströmung.

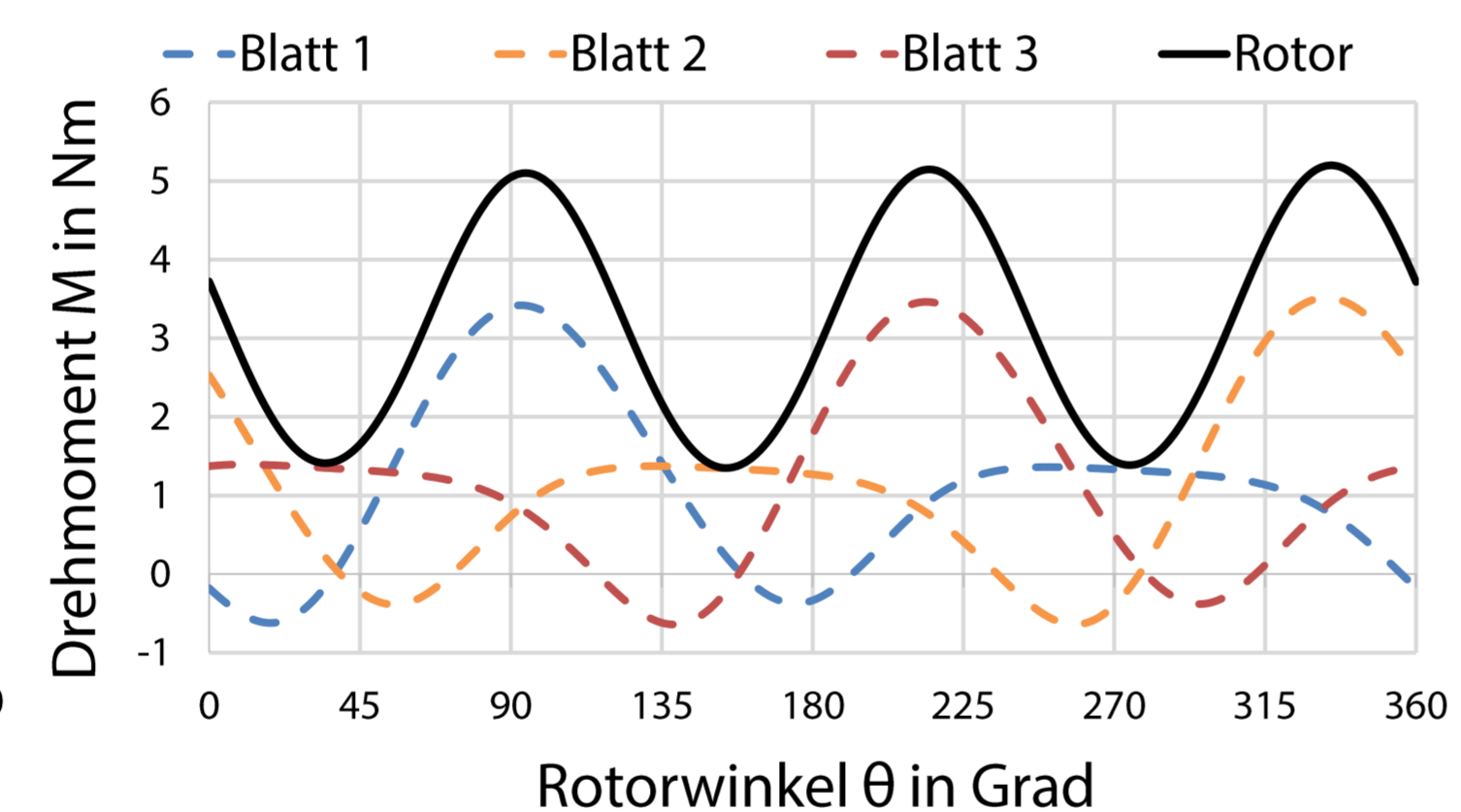


Abb. 4: Abhängigkeit des Drehmoments M vom Rotorwinkel θ bei $\lambda = 4$. Dargestellt sind die Momentenverläufe der drei Rotorblätter und das Gesamtdrehmoment des Rotors.

4. Adaptive Blattverstellung bei VAWT – das ActivePitchVAWT-Konzept

Zur Steigerung der Effizienz von H-Rotoren wird ein Konzept zur Anpassung des Anstellwinkels jedes einzelnen Rotorblattes in Abhängigkeit der relativen Anströmung verfolgt. Dadurch lässt sich das an der Rotorachse wirkende Drehmoment maximieren. Die Auslenkung des Flügels von seiner Nulllage wird als Blattanstellwinkel (Pitchwinkel) bezeichnet. ActivePitchVAWT umfasst folgende Komponenten:

- gezielte Beeinflussung der aerodynamisch wirksamen Tragflügelkontur für jeden Rotorwinkel θ mittels aktiver Anpassung des Anstellwinkels über den Pitchwinkel φ
- Blattverstellung entsprechend der betriebspunktabhängigen Strömungsbedingungen am Rotorblatt für drei Betriebs-szenarien:
 - Verkleinerung des Anstellwinkels bei **niedriger Schnelllaufzahl** zur Verhinderung des Strömungsabrisse
 - Vergrößerung des Anstellwinkels bei **hoher Schnelllaufzahl** zum Erzeugen eines maximalen Auftriebs am Tragflügel
 - Querstellen der Rotorblätter beim **Start der Anlage** zur gezielten Nutzung des Widerstandsprinzips

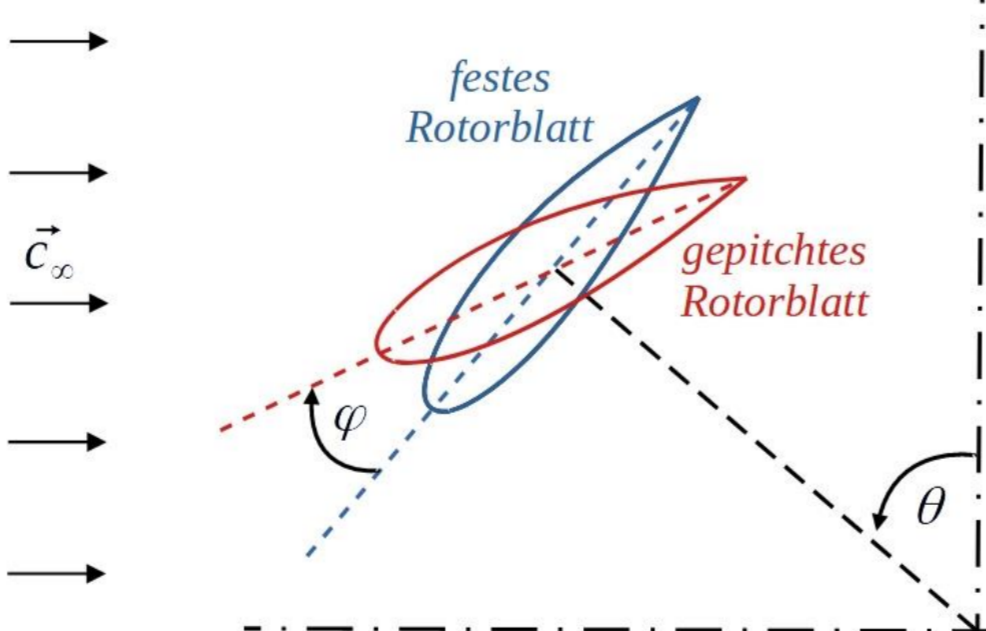


Abb. 5: Pitchwinkel φ zwischen einem festen und einem gepitchten Rotorblatt.

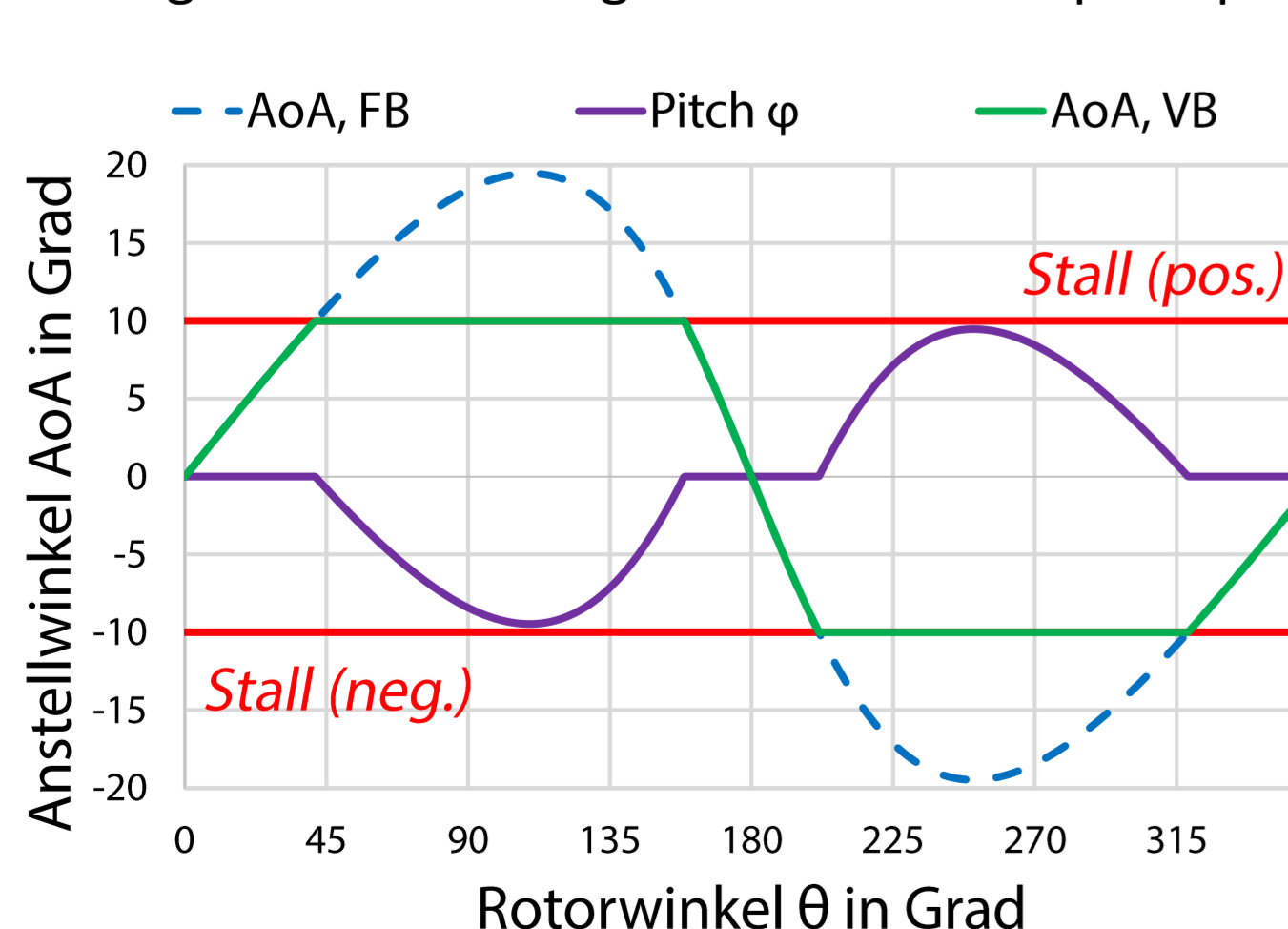


Abb. 6: Verlauf des AoA eines feststehenden (FB) und eines verstellbaren (VB) Flügelblatts, sowie des Pitchwinkels φ in Abhängigkeit vom Rotorwinkel θ bei kleiner Schnelllaufzahl.

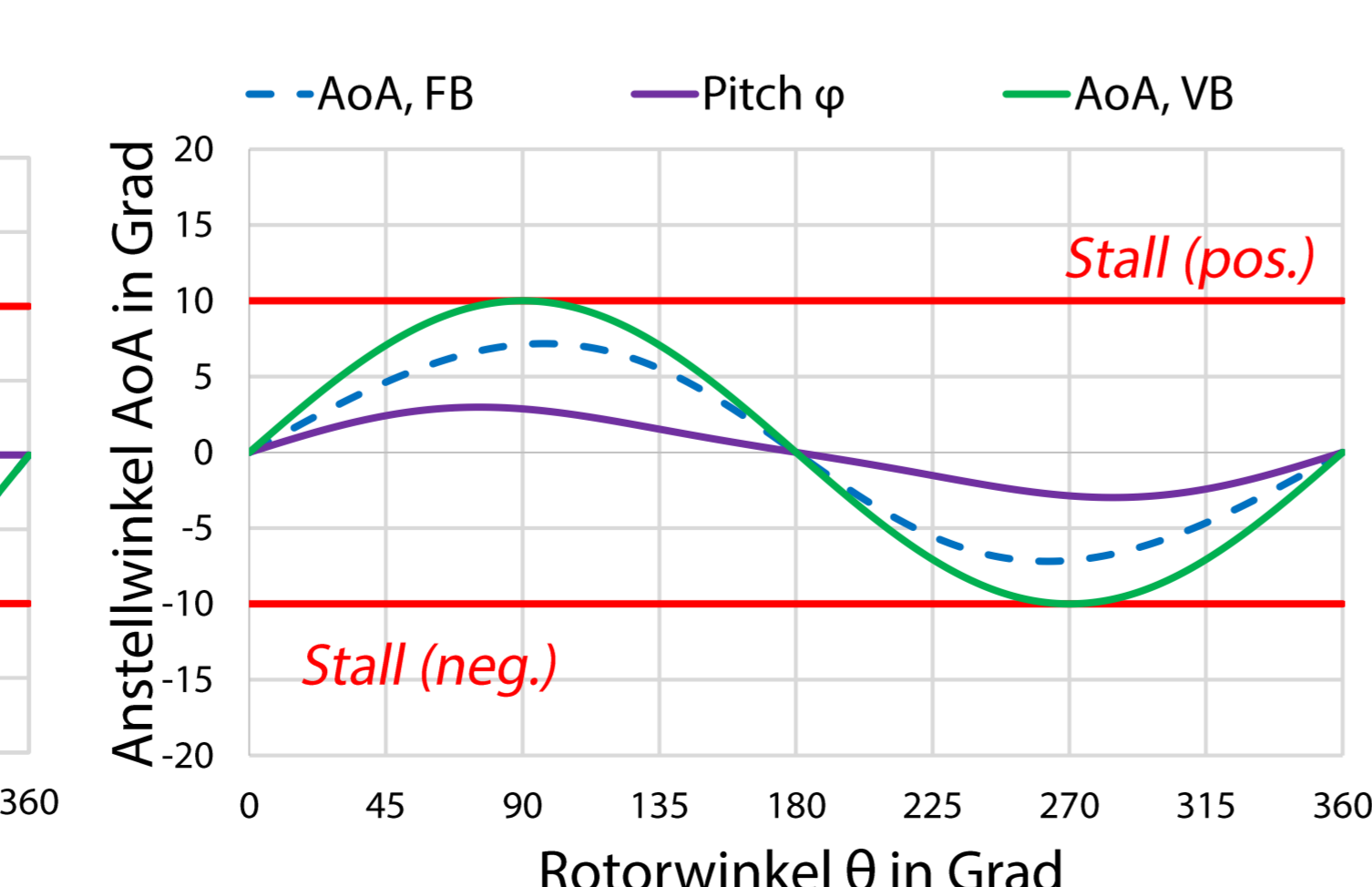


Abb. 7: Verlauf des AoA eines feststehenden (FB) und eines verstellbaren (VB) Flügelblatts, sowie des Pitchwinkels φ in Abhängigkeit vom Rotorwinkel θ bei großer Schnelllaufzahl.

5. Leistungsbilanzierung auf Basis empirischer und numerischer Methoden

Die komplexen aerodynamischen Verhältnisse an den Flügelblättern und das daraus resultierende Leistungsverhalten erfordern schnelle Performancemodelle für die Vorauslegung. Implementiert und weiterentwickelt wurde das auf empirischen Profildaten basierenden Double-Multiple Streamtube Model (DMST). Für die anschließende detaillierte Anlagenoptimierung werden numerische Strömungssimulationen (CFD) mit OpenFOAM eingesetzt.

DMST in Python:

- Aufteilung der Rotorströmung (Abb. 8) in einen Luv- und Leebereich (Double) und in mehrere Stromröhren (Multiple Streamtubes)
- Impulsbilanz zwischen Tragflügel und der Luftströmung in den jeweiligen Stromröhren
- Iteration der aerodynamischen Kräfte bis zur Erfüllung der Impulsbilanz
- Bestimmung der am Tragflügel wirkenden Tangentialkraft und des wirksamen Moments sowie der Leistung für jeden Rotorwinkel
- Ableitung der integralen Leistung

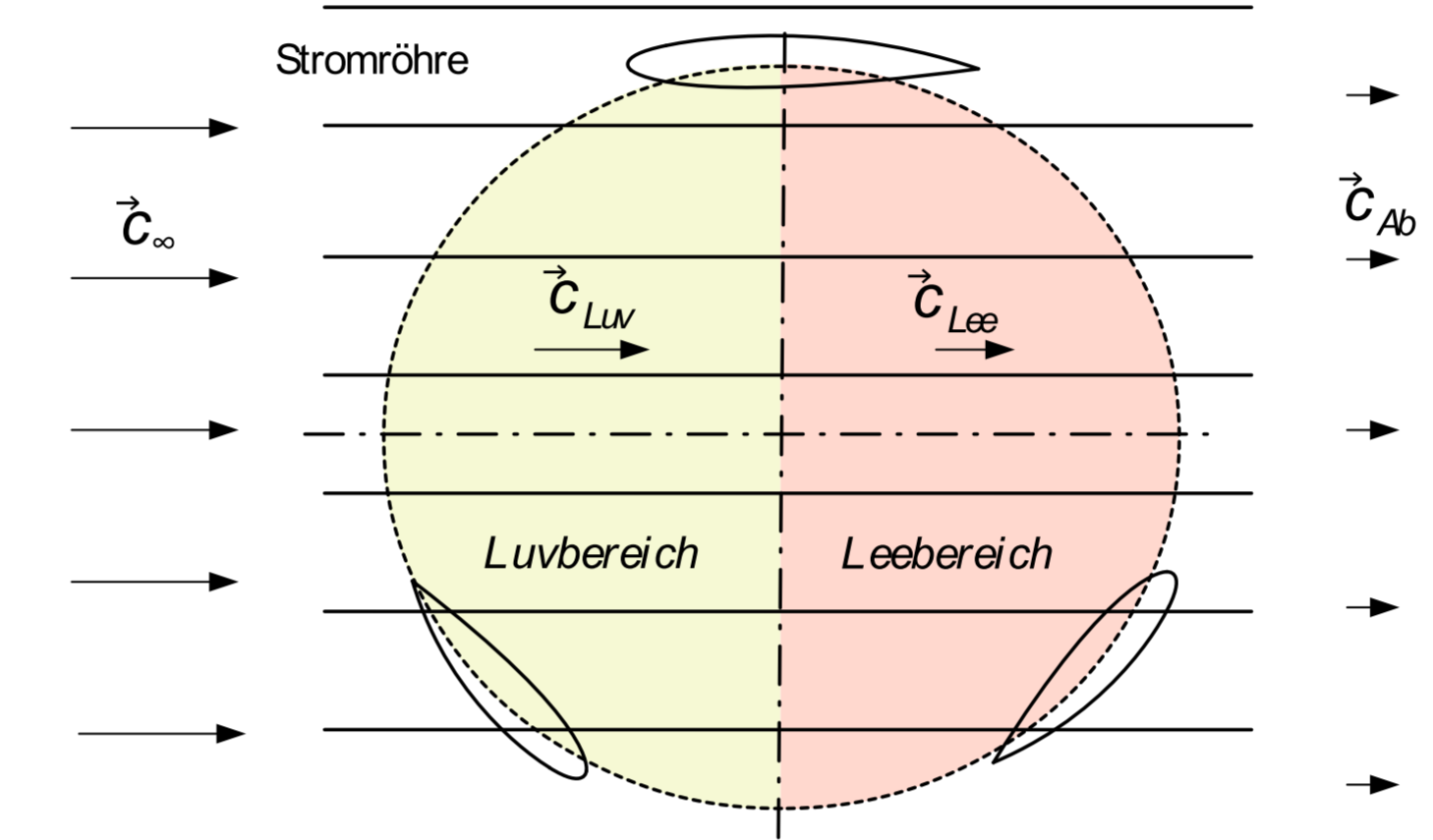


Abb. 8: Aufteilung der Rotorströmung in mehrere Stromröhren, sowie in einen Luv- und Leebereich.

CFD-Modell in OpenFOAM:

- Finite-Volumen-Verfahren für eine inkompressible 2D Strömung
- Lösung der RANS-Gleichungen unter Anwendung des k- ω -SST-Turbulenzmodells
- Erstellung eines hex-dominanten Rechengitters mit bewegten Gitterzonen (Abb. 9)
- Kopplung der Gitter mittels *cyclicAMI*-RB
- Vorgabe der Rotation und der Pitchfunktionen mittels der *tabulated6DoFMotion*-Funktion
- Bestimmung der Kräfte am Rotorblatt
- Ableitung der integralen Leistung

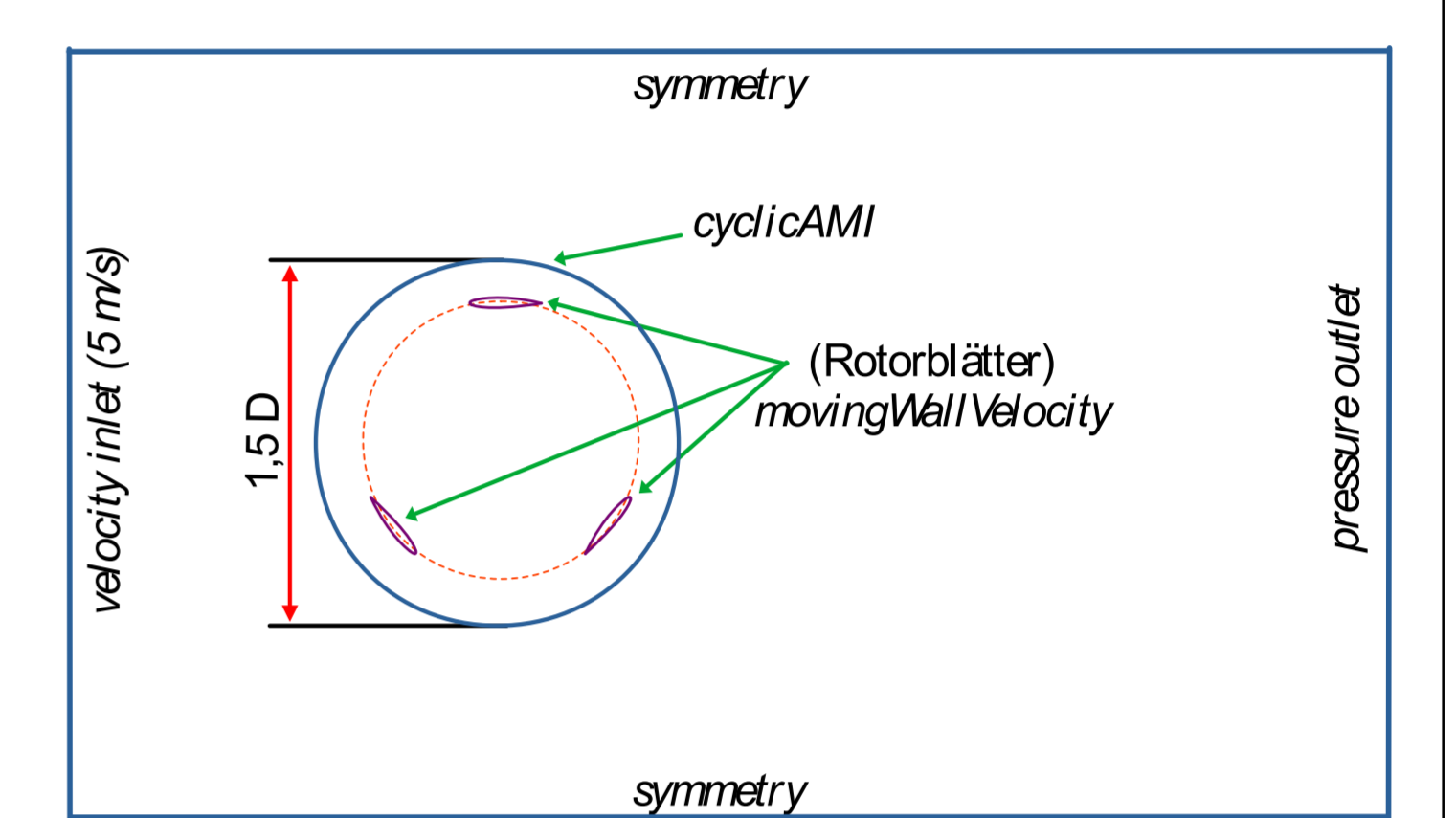


Abb. 9: Rechengebiet und Randbedingungen des numerischen Modells.

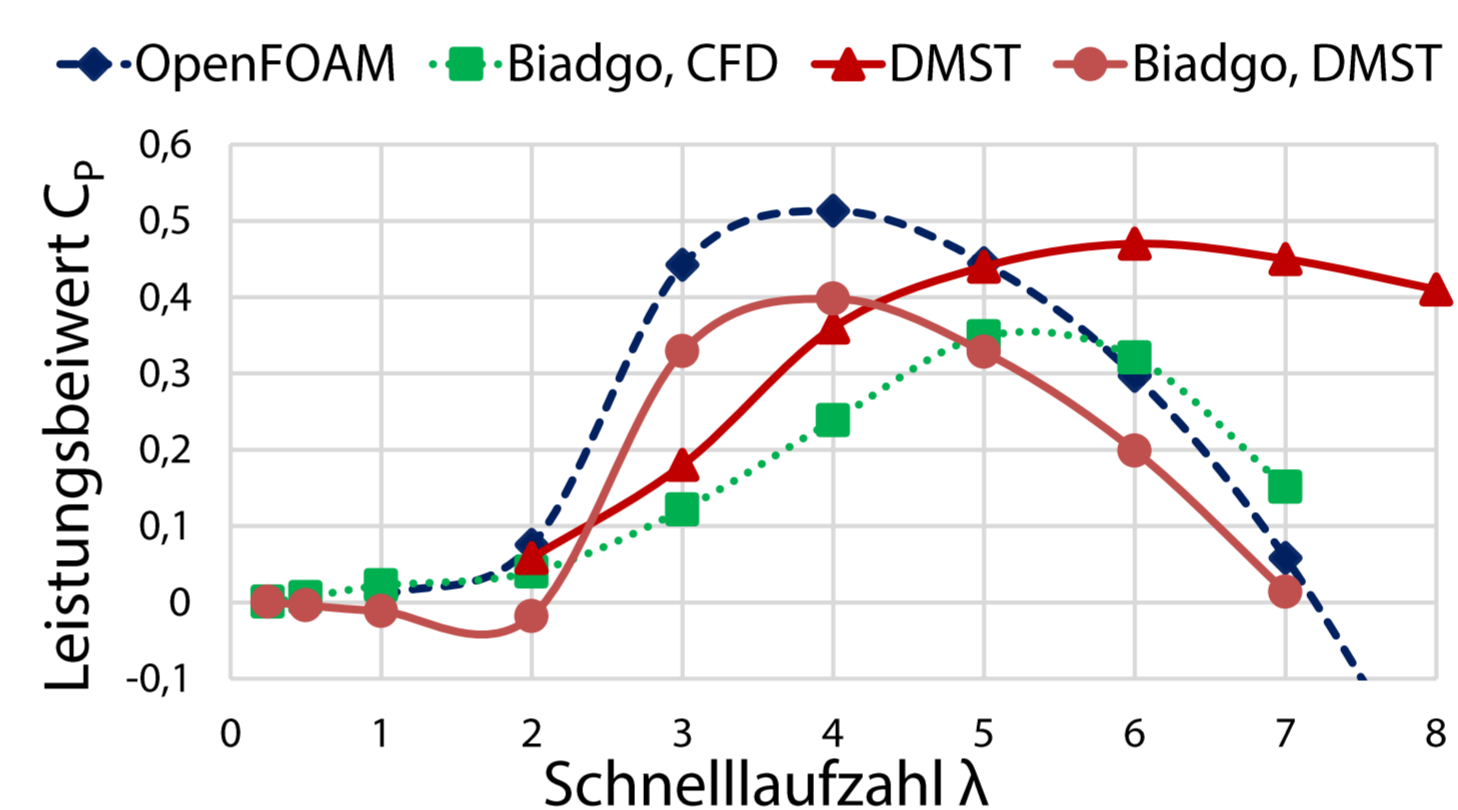


Abb. 10: Vergleich der mit dem DMST-Modell und mit OpenFOAM ermittelten Anlagenkennlinie eines Modellrotors und Referenzdaten nach Biadgo et al. [8].

Leistungsbeiwert:

$$C_p = \frac{\text{Rotorleistung}}{\text{Windleistung}} = \frac{P_R}{P_W}$$

- Genauigkeit des DMST ist abhängig von den verwendeten aerodynamischen Kennwerten der Flügelprofile (bisher durch Einbindung der Profildatenbank Xfoil)
- Ergebnisse der CFD sind stark abhängig von Rechengitter, Turbulenzmodell, Diskretisierung und anderen Faktoren
- Detailuntersuchungen mittels hochauflösenden Large-Eddy-Simulationen (LES)

6. Large Eddy Simulation der Umströmung von Tragflügelprofilen

Die Berechnung des Strömungsfeldes um die Flügelprofile erfolgt mit Hilfe von hochauflösenden Large Eddy Simulationen (LES) mit OpenFOAM. Genutzt werden die HPC-Systeme des ZIH / TU Dresden.

- Erfassung eines Großteils der instationären Wirbelstrukturen und somit Reduktion potentieller Fehler bei der Turbulenzmodellierung (Abb. 11)
- Analyse der aerodynamischen und -akustischen Eigenschaften modifizierter Profilkonturen (Abb. 12)

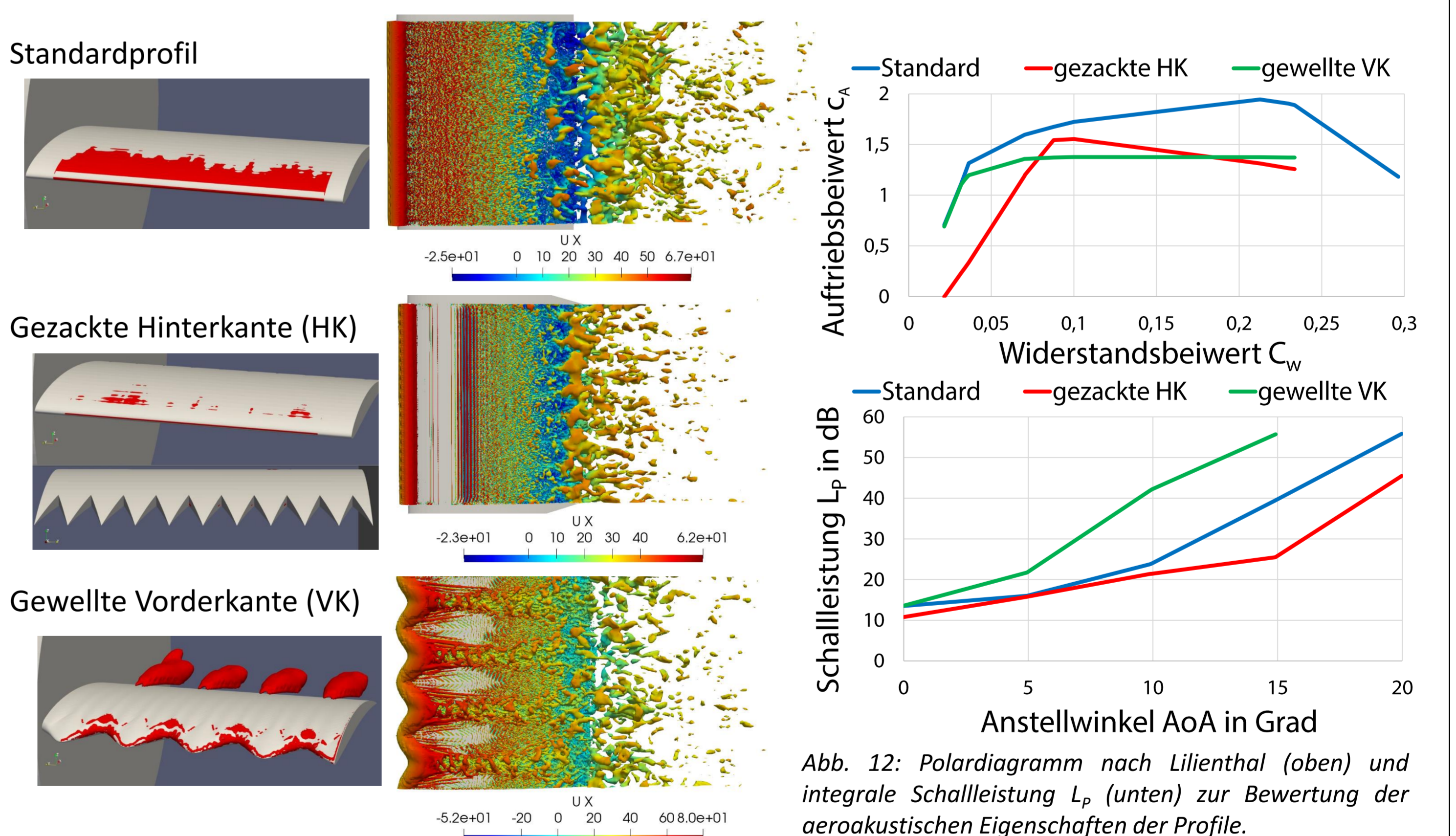


Abb. 11: Isoflächen des Schalleistungspegels $L_p = 84$ dB (links) und der Wirbelstrukturen bei $AoA = 10^\circ$ (rechts) aus den numerischen Simulationen bei $Re \approx 520.000$.

- gewellte Vorderkante verschlechtert aerodynamische und aeroakustische Eigenschaften
- reduzierte Auftriebsbeiwerte beim Profil mit gezackter Hinterkante im Vergleich zum Standard-Profil
- geringste Schalleistungen beim Profil mit gezackter Hinterkante

7. Ausblick

- Laseroptische Strömungsvermessung (PIV) am Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden gGmbH
- Numerische Optimierung der Pitch-Sequenzen im Realbetrieb
- Erprobung der Profile am SmartWingVAWT-Modellrotor im Strömungskanal
- Umsetzung der Vorentwicklungen in einem BMBF Folgeprojekt mit lokalem Unternehmen

8. Referenzen

[1] S. T. Paruchuri (2020): Berechnung der Leistungskennlinie vertikaler Windturbinen auf Basis empirischer Profildaten. BA, HSZG.
 [2] M. R. Kaiway (2021): Numerische Untersuchung der aeroakustischen Eigenschaften geometrisch modifizierter Tragflügelprofile. MA, HSZG.
 [3] S. S. R. Singh (2021): Numerische Untersuchung der Rotorströmung einer VAWT. BA, HSZG.
 [4] R. Ravindran (2021): Aufbau eines Versuchsstandes zur Erprobung von Windturbinen mit vertikaler Drehachse. DA, HSZG.
 [5] M. Sünder (2021): Entwicklung einer mechatronischen Blattverstellung für eine Windturbinen mit vertikaler Rotationsachse. MA, HSZG.
 [6] M. Q. B. Azhari (2021): Konzeption zur Realisierung einer Windturbinen mit vertikaler Rotationsachse und variabler Blattgeometrie. BA, HSZG.
 [7] S. Feierabend (2020): Entwicklung einer autarken Wetterstation zur zeitgenauen Erfassung von Winddaten auf Basis eines Open-Source-Ansatzes. MA, HSZG.
 [8] A.M. Biadgo, A. Simonovic, D. Komarov, and S. Stupar (2013): Numerical and analytical investigation of vertical axis wind turbine. FME Transactions, 41: 49-58, 2013