

Adaptive Profilgeometrie an vertikalen Windturbinen (SmartWingVAWT 01/20 - 12/22)

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

1. Motivation und Zielsetzung

Das Ziel des Projektes ist die Steigerung der Effizienz von Windturbinen mit vertikaler Drehachse (VAWT). Bei VAWT ändern sich die Anströmverhältnisse infolge der Umdrehung des Rotors, so dass die Blätter nur bei bestimmten Drehwinkeln ideal angeströmt werden. Um Winkelbereiche ohne effektivem Beitrag zur Energiegewinnung zu vermeiden, ist es erforderlich, dass sich der Anstellwinkel während einer Rotordrehung fortlaufend ändert, das sogenannte „Pitchen“. Da die Rotorblätter auf deren Trajektorie mehrfach die Hauptströmung durchlaufen, beeinflussen sich diese gegenseitig. Bei der Betrachtung der gestaffelten Energieumwandlung muss die analytische Modellierung in Anlehnung an die typischen Windturbinen mit horizontaler Drehachse erweitert werden.

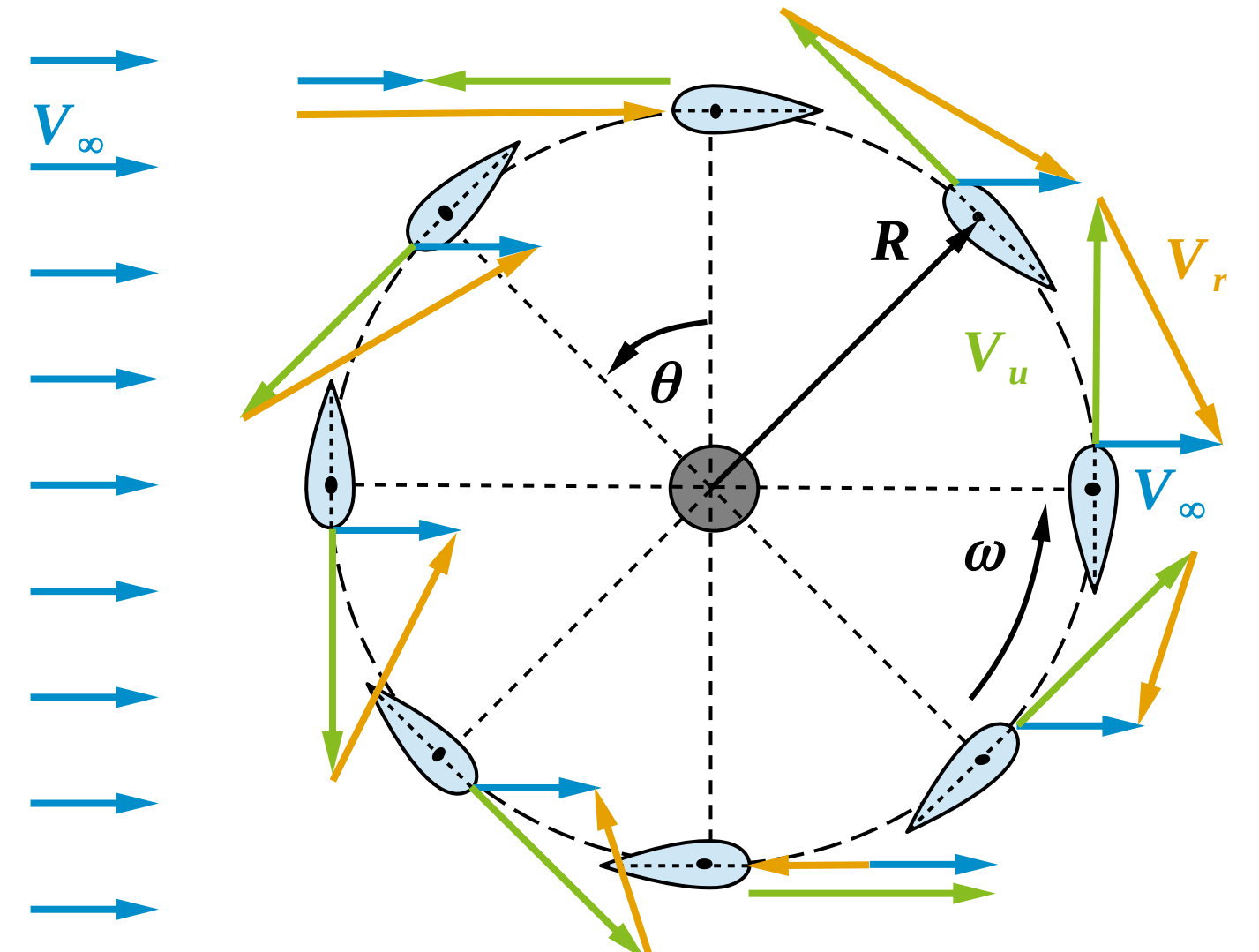


Abb. 1: H-Rotor einer VAWT

Analog kann die Optimierung des Pitchens nicht durch eine strikte Anpassung an die periodischen Bedingungen erfolgen. Hierfür wird ein erweitertes analytisches Modell und ein Reinforcement Learning (RL) Ansatz angewendet.

2. Stand von Wissenschaft und Technik - VAWT mit H-Rotor

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



- Nutzung des Auftriebs von vertikal angeordneten Rotorblättern (Abb. 1 & 2)
- periodische Änderung der relativen Anströmung V_r und des Anstellwinkels α am Profil (Abb. 2):

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

- starke Abhängigkeit der Performance von der Schnelllaufzahl λ (Abb. 3 & 7):

$$\lambda = \frac{V_u}{V_\infty} = \frac{\omega R}{V_\infty}$$

- hohe Anstellwinkel bei niedrigen Schnelllaufzahlen λ und umgekehrt
- Strömungsabriss beim Überschreiten des kritischen Anstellwinkels α_{Stall}

Daraus abgeleitet besteht ein hohes Potential zur Leistungssteigerung durch:

- Verbesserung der aerodynamischen Umströmung der Rotorblätter
- Bestehende Ansätze bauen auf die Vermeidung des Strömungsabrisse auf
- Anpassen des aerodynamischen Anstellwinkels $\alpha_{VB} = \alpha_{FB} + \varphi$
- Verstellung der Rotorblätter um deren Längsachse (Pitchen)

- Varianten sind:
- 1) mittels Sinuskurvenansatz (Sin): $\varphi = \varphi_{mean} - A \sin(\theta - \psi)$

- Anwendung der Brute-Force-Methode zur Ermittlung der Konstanten

- 2) lokale Momentenmaximierung (M_{Max}):
- Für jeden Rotorazimut φ erfolgt eine Max. der spezif. Tangentialkraft C_T

$$\varphi^{opt} = \varphi(\theta) \text{ wobei } \varphi^{opt} = \varphi(C_T = \max(C_T))$$

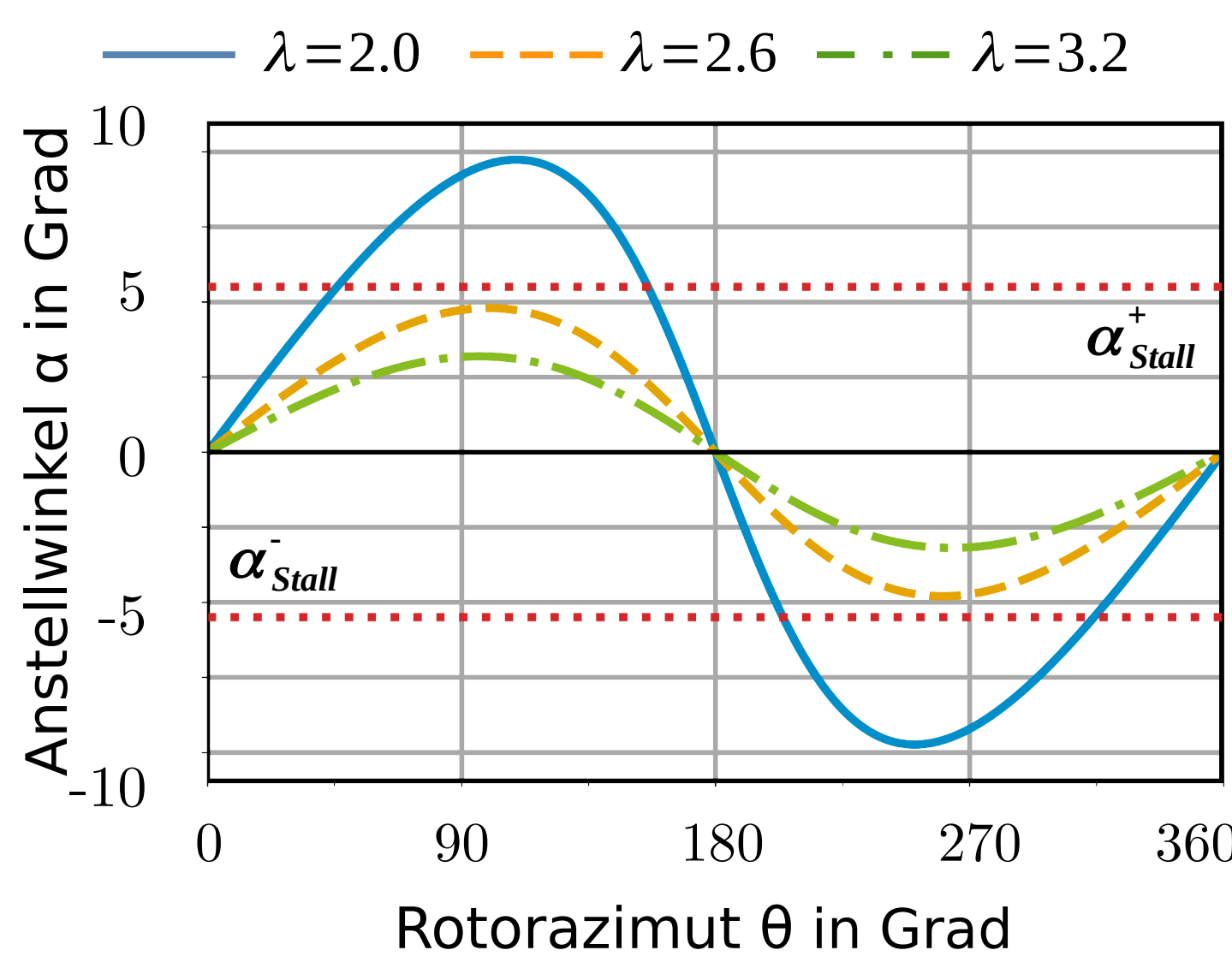


Abb. 3: Verlauf des Anstellwinkels α in Abhängigkeit vom Rotorazimut θ und der Schnelllaufzahlen λ bei idealer verlustfreier Rotorumströmung.

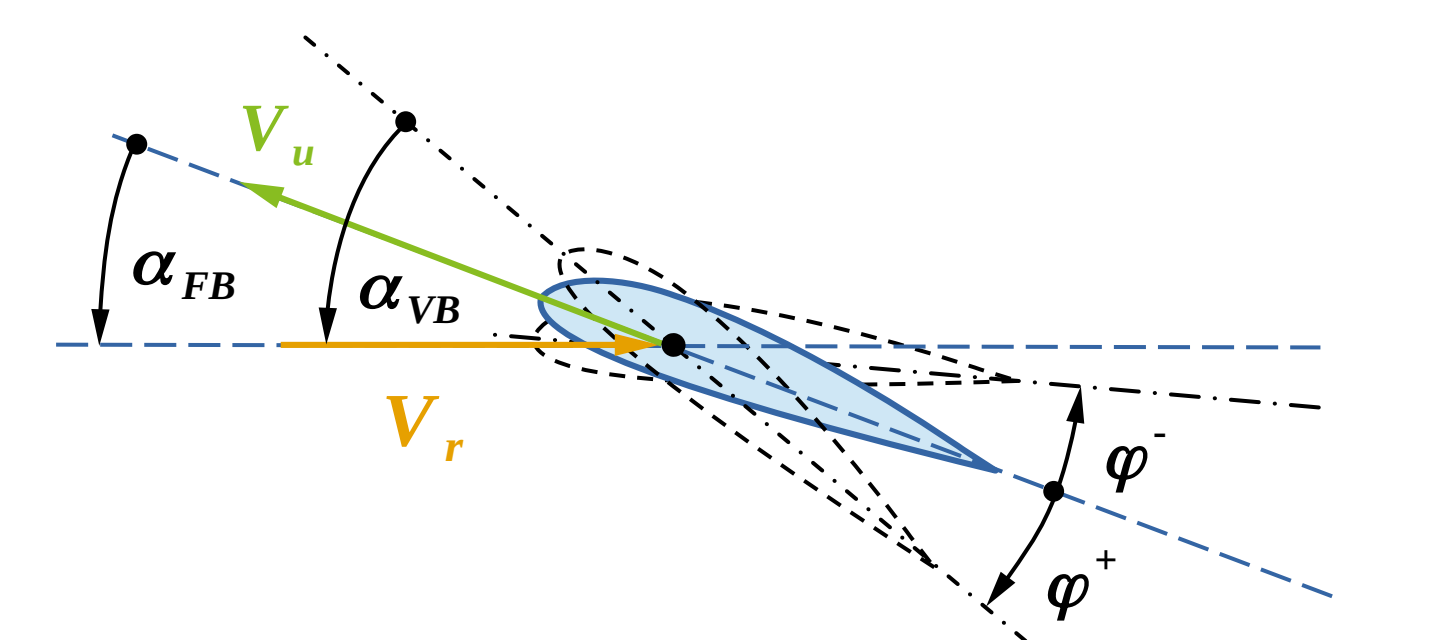


Abb. 4: Aerodynamischer Anstellwinkel α_{FB} eines klassischen ungeschichteten H-Rotors, Pitchwinkel φ durch Verdrehen des Rotorblatts um dessen Längsachse sowie resultierender Anstellwinkel des geschichteten Rotors α_{VB} .

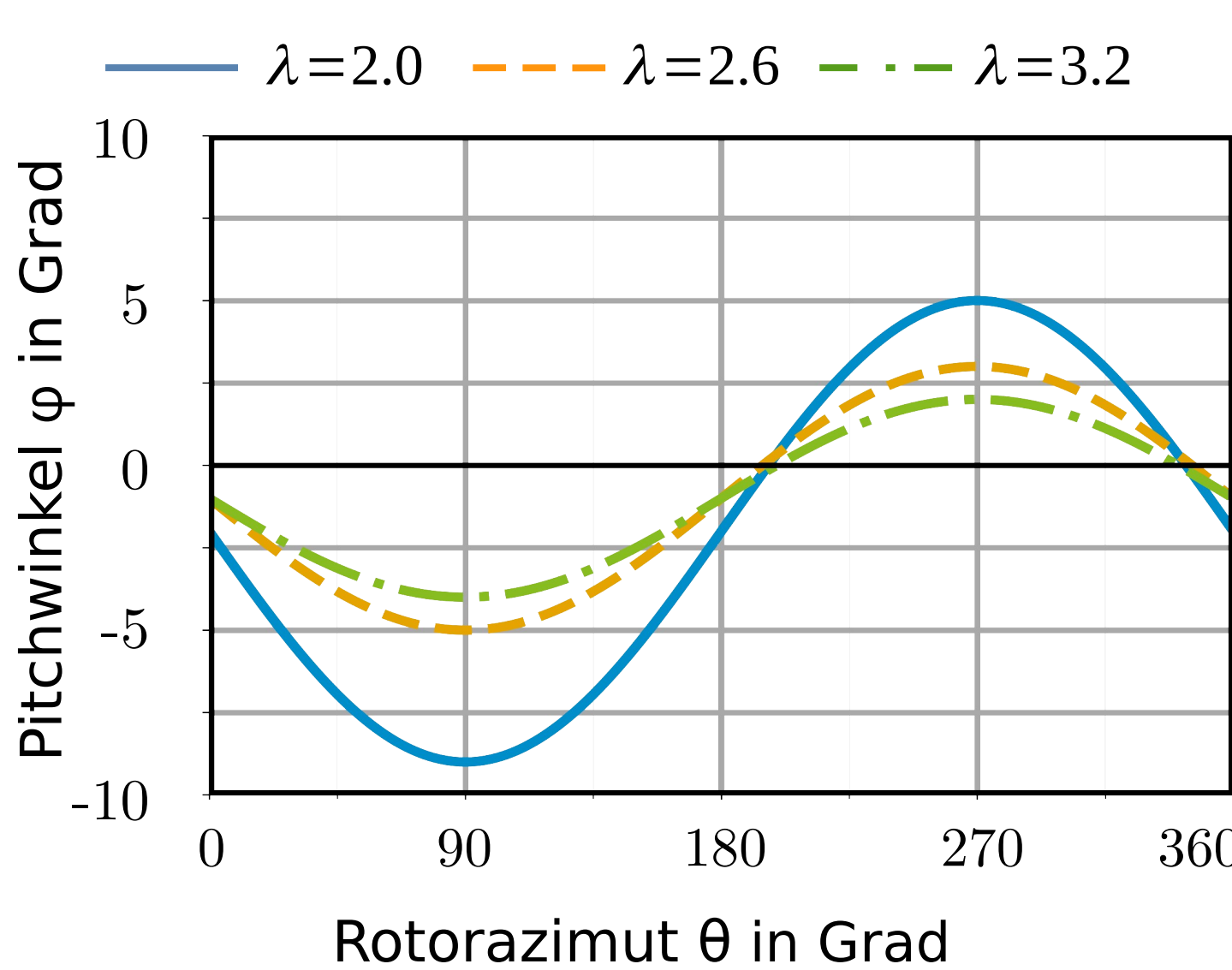


Abb. 5: Verlauf der sich ergebenden Pitchkurven unter Annahme des Sinuskurvenansatzes (links) und der lokalen Momentenmaximierung (rechts) exemplarisch für einen dreiblättrigen H-Rotor mit Durchmesser $D=1$ m, NACA0012 Strömungsprofilen und einer Sehnenlänge von $L=0,2$ m.

3. Leistungsbilanzierung auf Basis empirischer und numerischer Methoden

Leistungsbilanzierung auf Basis des halbempirischen Double Multiple Streamtube Modells (DMST) in Python:

- Aufteilung der Rotorströmung (Abb. 8) in einen Luv- und Leebereich (Double), sowie in mehrere Stromröhren (Multiple Streamtubes)
- Iterative Bestimmung der aerodynamischen Kräfte:
- in jeder Stromröhre Sr : Berechnung der übertragenen Schubkraft mittels Impulsbilanz (Froude-Rankine Theorem)

$$F_{s, sr} = 2 \rho V_\infty^2 (1-a) A_{sr}$$

- An jedem Azimut θ : Bestimmung der wirkenden Kraft am umströmten Rotorblatt (Blattelementtheorie)

$$F_{s, b} = \frac{1}{2} \rho L V_r^2 (C_t \cos \theta + C_n \sin \theta)$$

- Iteration der aerodynamischen Kräfte bis zur Erfüllung der Kräftebilanz zwischen Stromröhre und Rotorblatt
- Bestimmung der Tangentialkraft F_t
- Ableitung der integralen Leistung
- Nutzung einer Profildatenbank (XFOIL)
- Evaluation mittels Abgleich des Leistungsbeiwerts (Abb. 8):

$$C_p = \frac{P_{Rotor}}{P_{Wind}} = \frac{F_t R \omega}{\frac{\rho}{2} V_\infty^3 D_R H_R}$$

4. Optimierung VAWT auf Basis von Methoden des Maschinellen Lernens

Abbildung der gestaffelten Energieübertragung durch die gekoppelte Betrachtung der Luv- und Leeseite eines H-Rotors, beschrieben durch das erweiterte DMST-Modell, in einem Reinforcement Learning Modell:

- Methode des Maschinellen Lernens (ML)
- Software-Agent erlernt selbständig und ohne Vorprägung eine Strategie (Policy)
- Basisverfahren: Trial-and-Error-Methode
- freie Interaktion (Action: A_t) des lernenden Agenten mit der Umwelt (Environment: hier DMST-Modell)
- Vorgabe des Pitchwinkels:

$$A_t = [a_{1,1}, \dots, a_{1,360}]^T$$

$$a_{ij} = \{\varphi = f(\theta) \mid -90 \leq \varphi \leq 90\}$$

- Umwelt erfährt einen neuen Zustand (State: $S_t = C_{P, A_t}$)
- Agent erhält eine Rückkopplung bzw. Belohnung (Reward: $R_t = C_{P, A_t} - C_{P, FB}$)
- Ziel des Agenten: Maximierung der in Zukunft zu erwartenden Belohnung
- Leistungssteigerung durch das Optimieren der Pitchkurve

5. Ergebnisse der Optimierungen im Vergleich

Auf der Basis der umgesetzten Methodik erfolgte das Training des RL-Agenten:

- Rund 1 Mio. Trainingsschritte benötigt
- Schrittweise Verbesserung durch evolutionäre Anpassung der Pitchwinkel
- Vergleich mit den 2 weiteren Pitchansätzen aus Abschnitt 2
- Alle untersuchten Verfahren führen zu einer Steigerung der Rotorperformance im Vergleich zum klass. Rotor (Tab. 1)
- Insbesondere bei sehr kleinen und großen Schnelllaufzahlen besteht ein hohes Potential zur Leistungssteigerung
- Fazit der Optimierung:
- Auslegung eines Rotors auf Basis des DMST-Modells und Sinusansatz
- Detailoptimierung (im Betrieb) mittels RL-Modell

6. Verwertung der Projektergebnisse

- Umsetzung der Entwicklungen im Verbundprojekt „WIR! - Lausitz - Life & Technology - Innovative Windenergie-Technologien in der Lausitz“ (BMBF, 06.2022 - 12.2025)
- Erprobung unter Realbedingungen im Projekt „ENERGETIC - Lausitzer Innovationscluster für regenerative Energietechnik“ im Bundesmodellvorhaben „Unternehmen Revier“ (BMW, 06.2022 - 12.2025)
- Veröffentlichung der Ergebnisse in einem wissenschaftlichen Paper (in Arbeit)

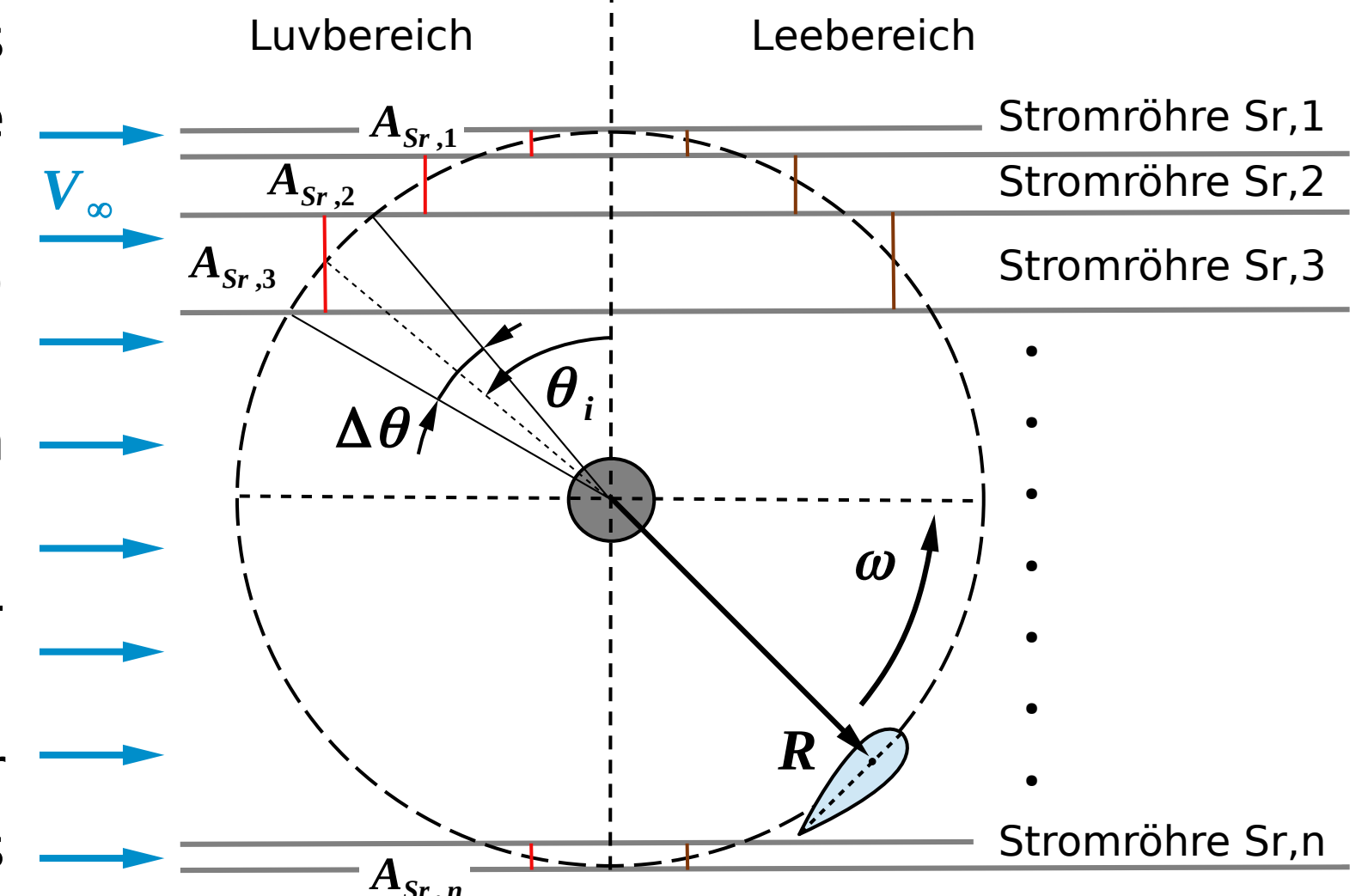


Abb. 6: Aufteilung der Rotorströmung im DMST-Modell in mehrere Stromröhren Sr mit der Fläche A_{sr} , sowie in einen Luv- und Leebereich.

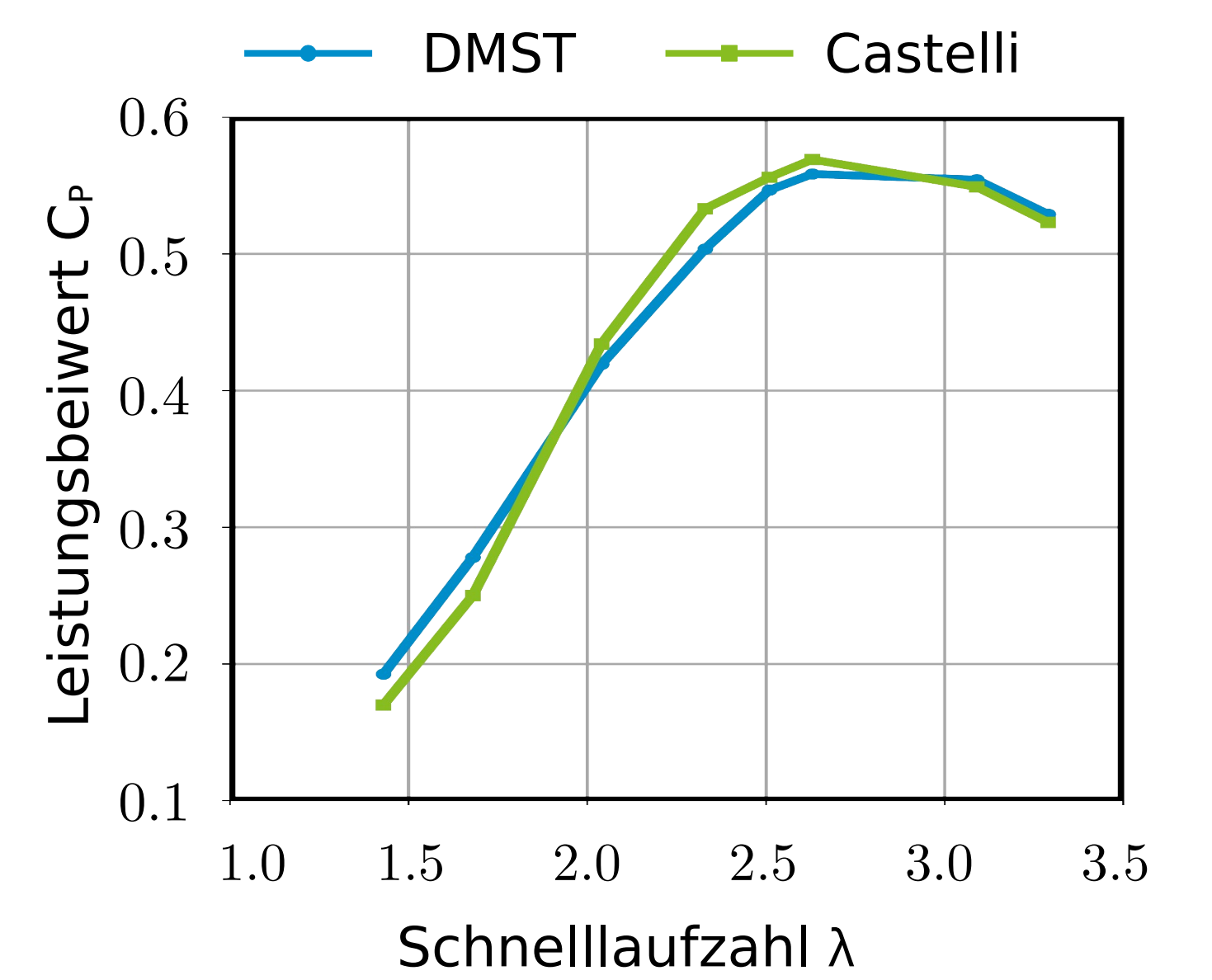


Abb. 7: Evaluation des entwickelten DMST-Modells anhand numerischen Daten von Castelli et al.

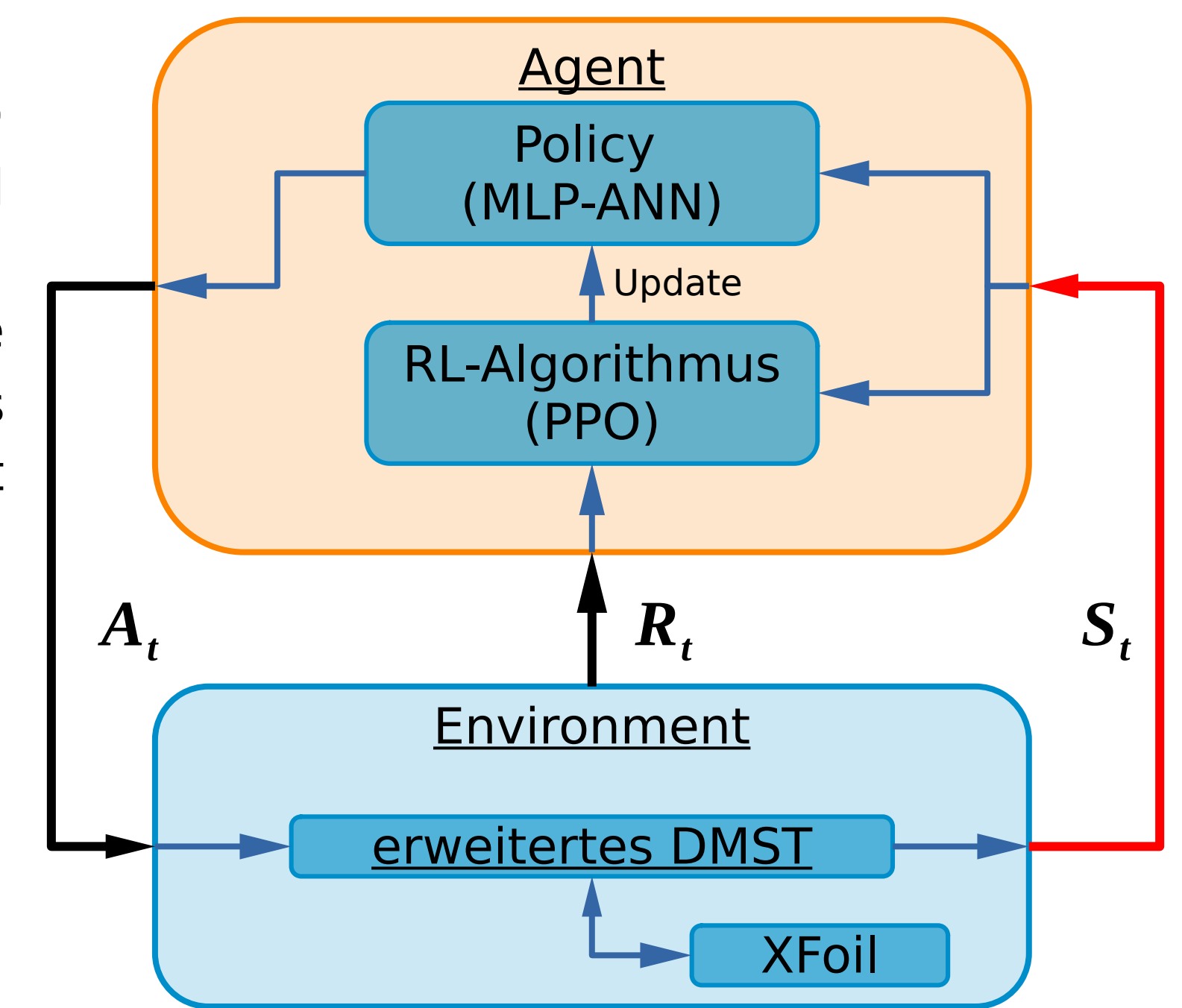


Abb. 8: Schema des umgesetzten RL-Modells für die Optimierung der Pitchkurve eines H-Rotors auf Basis des numerischen DMST-Modells und einer empirischen Profildatenbank (XFOIL).

Tab. 1: Vergleich der Leistungsbeiwerte C_p eines klassisch ungeschichteten H-Rotors (fixed blade: FB) mit geschichteten Rotoren für unterschiedliche Schnelllaufzahlen λ .

λ	Leistungsbeiwert C_p			
	FB	Sin	M_{Max}	RL
2.04	0.412	0.473	0.491	0.496
2.63	0.557	0.584	0.576	0.591
3.29	0.529	0.567	0.533	0.576

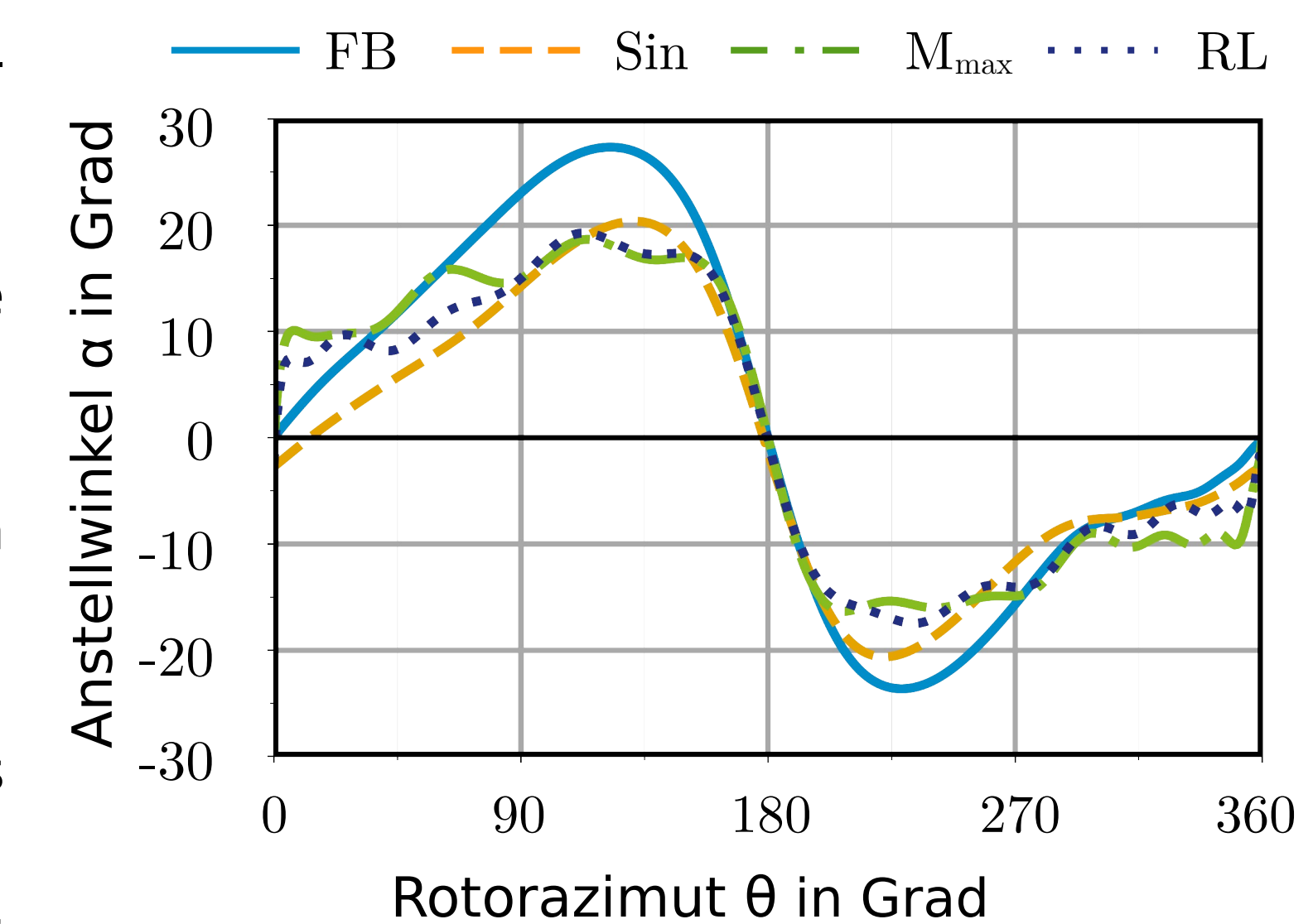


Abb. 9: Gegenüberstellung der Anstellwinkelverläufe α in Abhängigkeit vom Rotorazimut θ für einen ungeschichteten und einen geschichteten Rotor.