

Thermografische Detektion und Lokalisierung von Strömungsablösung an Windenergieanlagen

Vom Fachbereich Produktionstechnik
der
UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von

Felix Oehme, Dipl.-Ing.
geboren am 26.01.1994 in Leipzig

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Fischer,
Universität Bremen
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Christian Cierpka,
Technische Universität Ilmenau

Tag der mündlichen Prüfung: 29.02.2024

Kurzfassung

Strömungsablösungen an Rotorblättern von Windenergieanlagen (WEA) führen zu einer Minderung des aerodynamischen Wirkungsgrads, der gesellschaftlichen Akzeptanz sowie der Lebensdauer der Anlagen und sollten deshalb bei zukünftigen Generationen von WEA vermieden werden. Allerdings fehlt eine in-prozess-fähige Messtechnik zur Detektion und Lokalisierung von Strömungsablösungen an realen WEA. Infrarot-Thermografie (IRT) ist für indirekte Strömungsmessungen an WEA grundsätzlich geeignet, wurde zur Detektion von Strömungsablösungen bisher jedoch nur in Windkanaluntersuchungen eingesetzt. Das Ziel dieser Arbeit ist, die Messfähigkeiten eines auf IRT basierenden Messsystems zur nicht-invasiven Detektion und räumlich hochaufgelösten Lokalisierung von stationären und instationären Strömungsablösungen zu charakterisieren und für die In-Prozess-Messung an nicht-skalierten WEA anzuwenden.

Um IRT zu einer eindeutigen Detektion und Lokalisierung von Strömungsablösungen zu befähigen, wurde die Messkette analysiert und geeignete Signalverarbeitungsansätze abgeleitet. Diese fußen auf der Auswertung spatio-temporaler Fluktuationen der Oberflächentemperatur. Die resultierenden physikalisch interpretierbaren Signalverarbeitungsansätze (UIC, DIT) wurden jeweils mit einer Hauptkomponentenanalyse (PCA) kombiniert, um einen maximalen Bildkontrast zwischen Bereichen mit angelegter und abgelöster Strömung zu erreichen.

In Windkanaluntersuchen wurde die Eignung des UIC-Ansatzes für eine eindeutige Erfassung stationärer Strömungsablösungen anhand charakteristischer Ablösesignaturen nachgewiesen. Bei der anschließenden Übertragung auf Feldmessungen ermöglichen die im Windkanal verifizierten thermischen Ablösesignaturen eine merkmalsbasierte Detektion und Lokalisierung stationärer Strömungsablösung über den gesamten Bildbereich. Die Messergebnisse wurden mit einer Referenzmessung validiert. Im Ergebnis wurde somit erstmalig eine in-prozess-fähige, nicht-invasive und eindeutige Detektion und Lokalisierung stationärer Strömungsablösung im Blattwurzelbereich einer nicht-skalierten WEA mittels IRT realisiert. Mit der PCA-basierten Auswertung wurde für die gewählte Messzeit von 305 s über 80 Umdrehungen des Rotors ein Kontrast-Rausch-Verhältnis zwischen angelegt-abgelösten Strömungsbereichen von 4 erreicht.

Das zeitliche Auflösungsvermögen von IRT hinsichtlich sich ändernder Transitionspositionen und instationären Strömungsablösungen wurde mit einer numerischen Simulation in Abhängigkeit der Messbedingungen abgeschätzt. Dabei wurde gezeigt, dass die Trägheit des thermischen Antwortverhaltens die spatio-temporalen Auflösungsgrenzen bei der Erfassung instationärer Strömungsablösungen limitiert. Bei Freifeldmessungen mit Messbedingungen mit geringer solarer Erwärmung wurden mit dem eingeführten, kombinierten Bildauswertungsansatz die Detektion einer instationärer Strömungsablösung während des Auftretens einer starken Böe mit der messsystemseitig maximalen spatio-temporalen Auflösung erreicht. Bei einer Wiederholungsmessung wurden die Ergebnisse reproduziert, die abgelösten Strömungsbereiche bei einer zeitlichen Auflösung von 5 s mit einem Kontrast-Rausch-Verhältnis von 1,2 detektiert und die Ablöseposition mit einer Messunsicherheit von 6,5 px lokalisiert, was 5,9 % der Sehnenlänge entspricht. Insgesamt wurde somit die Eignung von IRT für die Erfassung stationärer und instationärer Strömungsablösungen analysiert und an in Betrieb befindlichen WEA nachgewiesen.

Abstract

Flow separation on wind turbine blades leads to a reduction in aerodynamic efficiency, social acceptance and the lifetime of the turbines. As a result, flow separation is an undesirable aerodynamic effect that should be avoided in future generations of wind turbines. However, an in-process capable measurement method for the detection and localisation of flow separations on wind turbines is currently missing. Infrared thermography (IRT) is an established measurement method for stall detection in wind tunnel experiments, however, a transfer to operating wind turbines is an open research question. The aim of this work is to characterise the measurement capabilities of an IRT-based measurement system for the non-invasive and spatio-temporally resolved detection and localisation of steady and unsteady flow separations and to transfer them to measurement conditions on operating wind turbines.

In order to enable IRT for an unambiguous detection and localisation of flow separation, the measurement chain is analysed and suitable signal processing approaches are derived. These are based on the evaluation of spatio-temporal fluctuations of the surface temperature. The resulting physically interpretable signal processing approaches (UIC, DIT) are combined with a principal component analysis (PCA) in order to achieve an unambiguous detection and localisation of flow separation and a maximum image contrast between the different flow regions.

In wind tunnel experiments, the suitability of the UIC-approach for the unambiguous detection of stationary flow separation by means of characteristic separation features is proven, and an increase in the distinguishability of attached-detached flow regions is achieved by the PCA-based evaluation. In the subsequent transfer to field measurements, the wind tunnel-verified thermal separation signatures enable a feature-based detection and localisation of static flow separation over the entire field of view. The measurement results were validated with a reference measurement. Therefore, an IRT-based detection and localisation of static flow separation at an operating wind turbine is presented and verified for the first time. With the PCA-based evaluation, a contrast-to-noise ratio between attached and separated flow regions of 4 is achieved for the selected measurement time of 305 s over 80 rotations of the rotor.

The temporal resolution capability of IRT with respect to dynamic transition positions and unsteady flow separation is assessed by a numerical simulation as a function of the measurement conditions, and it is shown that the inertia of the thermal response behaviour limits the spatio-temporal resolution limits for the detection of unsteady flow separation. In field measurements under conditions of low solar heating, the combined image processing approach nevertheless enables the detection of unsteady flow separation with the maximum spatio-temporal resolution of the measurement system. In a repeat measurement, the results are reproduced. Here the separated flow regions are detected with a contrast-to-noise ratio of 1.2 for a temporal resolution of 5 s. In addition, the separation positions are localised with a measurement uncertainty of 6.5 px, corresponding to 5.9% of the chord length. As a result, the suitability of IRT for the detection and localisation of steady-state and unsteady flow separation is analysed and the potential of the measurement approach for future developments on wind turbines is demonstrated.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ) an der Universität Bremen. Wesentliche Inhalte der Arbeit wurden während der Bearbeitung des von der DFG geförderten Projektes ThermoStall erstellt.

Zunächst möchte ich meinem Doktorvater und Erstgutachter, Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Fischer, meinen aufrichtigen Dank aussprechen. Ich bin ihm sehr dankbar für seine Förderung, die fachliche Beratung, die konstruktiven Diskussionen und die Zeit, die er in meine Entwicklung investiert hat. Ebenso schätze ich seinen Zuspruch und sein Vertrauen in meine Fähigkeiten, die zur Fertigstellung dieser Arbeit beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Cierpka für seine Bereitschaft, als Zweitgutachter meiner Arbeit zu fungieren. Zusätzlich danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Jorg Thöming, Dr.-Ing. Mießner, Marina Terlau M.Sc. und Julian Gebken für die Teilnahme am Kolloquium.

Ich möchte allen Kollegen am BIMAQ für die angenehme Arbeitsatmosphäre danken. Besonders danke ich Dr.-Ing. Christoph Vanselow, Dr.-Ing. Leon Schweighart und Björn Espenhahn M.Sc. für die vielen inhaltlich lebhaften, inspirierenden und oft humorvollen Diskussionen. Bei Dipl.-Ing. Paula Helming, Ann-Marie Parrey M.Sc., Friederike Jensen M.Sc. und Dr.-Ing. Daniel Gleichauf bedanke ich mich für den wertvollen fachlichen Austausch im Themenfeld der thermografischen Strömungsvisualisierung an Windenergieanlagen. Auch abseits der Arbeit war unser vertrauensvolles Miteinander innerhalb unserer Arbeitsgruppe eine große Stütze für mich. Für die organisatorische Unterstützung und die Lösung verschiedenster administrativer Probleme danke ich Eva Schultze herzlich.

Neben dem fachlichen Austausch bin ich der Deutschen WindGuard Engineering GmbH für die praktische Unterstützung bei zahlreichen Messkampagnen im Windkanal und bei Freifeldexperimenten dankbar. Namentlich möchte ich mich an dieser Stelle bei Herrn Dipl.-Ing. Nicholas Balaesque und Nils Poeck M.Sc bedanken, ohne euch wären die dargelegten Experimente nicht möglich gewesen. Ebenso danke ich der Firma Energiequelle GmbH für den Zugriff auf ihre Windenergieanlagen und der Firma InfraTec GmbH für die Hilfsbereitschaft bei der Anwendung der eingesetzten Infrarotsysteme.

Mein größter Dank gilt meiner Familie und insbesondere meiner Freundin Ronja. Ich danke dir für deinen Rückhalt, deine Liebe und deinen Zuspruch in schwierigen Momenten. Diese Arbeit trägt die Handschrift unseres gemeinsamen Weges. Weiterhin danke ich meinen Eltern Ines und Wieland Oehme sowie meinem Bruder Max Oehme für ihren Glauben an mich, ihren bedingungslosen Rückhalt und ihre Förderung in allen Lebenslagen. Ebenso möchte ich meinen Großeltern Hertha und Karl-Georg Spanier sowie Ingeborg und Dr. Günter Oehme für ihre liebevolle Unterstützung meines Werdegangs und die vorgelebten Werte danken. Abschließend danke ich Vivi, Sebastian und Vincent für eure Freundschaft.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis wichtiger Formelzeichen	VII
Akronyme	XI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Stand der Technik und Forschung	2
1.3 Ziel und Struktur der Arbeit	7
2 Theoretische Grundlagen und Konzeption der Signalverarbeitung	9
2.1 Gesamtsystem WEA und aerodynamische Wirkmechanismen turbulenter Strömungsablösungen	9
2.1.1 Aufbau und Funktionsweise	9
2.1.2 Aerodynamische Auslegung der Rotorblätter	11
2.1.3 Stationäre und instationäre Strömungsablösungen	15
2.2 Messkette der thermografischen Strömungsvisualisierung an Windenergieanlagen	19
2.2.1 Wärmeübertragung - Beschreibung des Temperaturfeldes an der Rotorblattoberfläche	21
2.2.2 Thermografie - Berührungslose Temperaturmessung	29
2.2.3 Klassische Signalverarbeitung - Lösung des inversen Problems	40
2.3 Konzeption neuer Signalverarbeitungsansätze	42
2.3.1 Stationäre Strömungsablösung	43
2.3.2 Instationäre Strömungsablösung	46
3 Experimentelles Setup	51
3.1 Windkanalexperimente	51
3.1.1 Messaufbau	52
3.1.2 Versuchsplanung	54
3.2 Freifeldmessungen	55
3.2.1 Messaufbau	56
3.2.2 Versuchsdurchführung	58
3.3 Bildverarbeitung	59
3.3.1 Vorverarbeitung	59
3.3.2 Implementierung der Signalverarbeitungsansätze	60

3.3.3	Definition von Auswertekriterien	62
4	Stationäre Strömungsablösung	65
4.1	Verifizierung und Charakterisierung der Signalverarbeitungsansätze für stationäre Strömungsablösung in Windkanaluntersuchungen	65
4.1.1	Referenzierung der Strömungsbereiche	65
4.1.2	UIC-Ansatz – physikalisch interpretierbare Detektion und Lokalisierung von stationären Strömungsablösungen	66
4.1.3	PCA – Detektion stationärer Strömungsablösungen mit maximalen Kontrast	69
4.2	Detektion und Lokalisierung stationärer Strömungsablösungen an realen WEA . .	72
4.2.1	Referenzmessung	72
4.2.2	UIC-Ansatz	73
4.2.3	PCA	76
4.3	Validierung der geometrischen Zuordnung	77
5	Instationäre Strömungsablösung	80
5.1	Abschätzung der thermischen Antwortzeit	80
5.1.1	Thermische Modellierung	81
5.1.2	Parameteridentifikation	83
5.1.3	Lösung der Wärmeleitungsgleichung zur Bestimmung der thermischen Antwortzeit t_{cnr}	85
5.2	Detektion und Lokalisierung instationärer Strömungsablösung an realen WEA . .	88
5.2.1	Referenzmessung	88
5.2.2	σ DIT-Ansatz – Thermografische Detektion von Zeitpunkten mit instationärer Strömungsablösung	89
5.2.3	DIT-Ansatz und PCA – Spatio-temporal aufgelöste Detektion und Lokalisierung instationärer Strömungsablösung	92
6	Zusammenfassung und Ausblick	103
6.1	Ausgangslage der Arbeit	103
6.2	Wissenschaftlicher Fortschritt der Forschungsergebnisse	104
6.3	Ausblick auf weiterführenden Forschungsbedarf	106
	Literaturverzeichnis	108
	Eigene Veröffentlichungen	118
	Betreute studentische Arbeiten	120
A	Berechnung des gerichteten Emissionsgrades von Polyurethane	121
B	Berechnung der thermischen Antwortzeit	122
B.1	Berechnung des äußeren Wärmeübergangskoeffizienten	122
B.2	Lösung der Wärmeleitungsgleichung	123

C Ergänzende Abbildungen	126
Curriculum Vitae des Autors	129

Verzeichnis wichtiger Formelzeichen

Lateinische Symbole

Symbol	Bezeichnung
a	Temperaturleitfähigkeit
a_{ax}	axialer Induktionsfaktor
a_{λ}	gerichteter spektraler Absorptionsgrad
a_{solar}	solarer Absorptionsgrad
a_{tan}	tangentialer Induktionsfaktor
A	Fläche
b	Wiensche Verschiebungskonstante (2898 μK)
c	Sehnenlänge
c_0	die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (299,792 ms^{-1})
c_a	aerodynamischen Auftriebsbeiwert
$c_{f,x}$	lokaler Wandreibungskoeffizient
c_p	dimensionsloser Druckbeiwert
c_p	spezifische Wärmekapazität
$c_{p,L}$	spezifische Wärmekapazität der Luft
c_w	aerodynamischen Widerstandsbeiwert
\bar{C}_a, \bar{C}_b	mittlere Pixelintensitäten in den Auswertebereichen a und b
C_p	Leistungsbeiwert
$C_{p,\text{max}}$	maximaler Leistungsbeiwert
dA	infinitesimales Flächenelement
$dI_{A,B}$	Intensitätsdifferenz zwischen den Auswertebereichen a und b
$d\Omega$	infinitesimales Raumwinkelelement
dr	infinitesimale Breite eines Rotorblattabschnitts
dT	Temperaturdifferenz
E_{diff}	Energiedifferenz zwischen Valenz- und Leitungsband
E_{photon}	Energie eines Photons
F_A	aerodynamischen Auftriebskraft
F_n	Schubkraft
F_{res}	resultierende Kraft
F_T	Tangentialkraft
F_W	aerodynamischen Widerstandskraft

h	Wärmeübergangskoeffizient
\bar{h}	zeitlich gemittelter Wärmeübergangskoeffizient
\tilde{h}	nicht-stationärer Anteil des Wärmeübergangskoeffizienten
h'	stationär-zufälliger Anteil des Wärmeübergangskoeffizienten
\hbar	Plancksches Wirkungsquantum ($6,626 \cdot 10^{-34} \text{Js}^{-1}$)
I	Intensität
k	Wärmeleitfähigkeit
\tilde{k}	reduzierte Frequenz
k_b	Boltzmann-Konstante ($1,38065 \cdot 10^{-23} \text{JK}^{-1}$)
L	Strahldichte
L_λ^s	spektrale Strahldichte eines schwarzen Körpers
M	spezifische Ausstrahlung
M_λ^s	spektrale spezifische Ausstrahlung
Ma	Mach-Zahl
n	Brechzahl
$n_{p,\lambda}$	Anzahl Photonen pro Wellenlänge
p	Druck
p_∞	statischer Druck in der Anströmung
\dot{q}	Wärmestromdichte
\dot{q}_k	konvektive Wärmestromdichte
\dot{q}_{quell}	Wärmequelle
\dot{q}_s	Wärmestrahlungsdichte
$\dot{q}_{s,\text{abs}}$	absorbierte solare Strahlungsleistung
$\dot{q}_{s,\text{in}}$	einfallende solare Strahlungsleistung
\dot{q}_{wl}	konduktive Wärmestromdichte
Q_λ	spektrale Strahlungsenergie
r	radiale Rotorblattposition eines Rotorblattabschnitts
r_λ	gerichteter spektraler Reflexionsgrad
r_{rb}	gerichtete Reflexionsgrad des Rotorblattes
r_T	Recovery-Faktor
$r_{1,2}$	Abstand zwischen Emitter und Empfänger
Re_c	sehenbasierte Reynolds-Zahl
t	Zeit
t_{cnr}	Thermische Antwortzeit bis zum Erreichen eines CNR von eins zwischen unterschiedlichen Strömungsbereichen
t_s	Abtastintervall
t_A	Zeitpunkt des Einsetzens einer Anstellwinkeländerung
t_{max}	Zeitpunkt der maximalen Anstellwinkeländerung
t_E	Zeitpunkt des Wiederanlegens der Strömung
T	Temperatur
T_{ad}	adiabaten Wandtemperatur

T_{fl}	Anströmtemperatur
T_s	Oberflächentemperatur
u	Strömungsgeschwindigkeit
u_e	lokalen Außengeschwindigkeit
u_{res}	resultierende Anströmgeschwindigkeit
$u_{res,0}$	initiale Anströmgeschwindigkeit
u_w	Windgeschwindigkeit
u_E	Einschaltgeschwindigkeit
u_N	Nenngeschwindigkeit
u_A	Abschaltgeschwindigkeit
u_{AP}	Messunsicherheit der lokalisierten Ablöseposition
\vec{x}	Bildkoordinaten
x	Sehnenposition (Koordinate in Strömungsrichtung)
y	Koordinate normal zur Oberfläche des Flügelprofils
z	Koordinate normal zur Profelsehne

Griechische Symbole

Symbol	Bezeichnung
α	Anstellwinkel
$\bar{\alpha}$	stationärer Anstellwinkel
α'	dynamische Änderung des Anstellwinkels
α_{design}	ausgelegter Anstellwinkel
α_{stat}	stationärer Ablösewinkel (static stall angle)
α_0	initialer Anstellwinkel
β	Auslenkung der Strömungsleitbleche
δ	Winkel zwischen der Ausstrahlrichtung und der Flächennormalen
δ_{99}	Grenzschichtdicke
$\Delta\alpha$	Änderung des Anstellwinkels
Δp	Druckdifferenz zwischen dem statischen Druck auf der Profiloberfläche und dem statischen Druck in der Anströmung
ΔT	Temperaturdifferenz
ΔT_s	Auswertegröße DIT-Ansatz
Δu_{res}	Änderung der Anströmgeschwindigkeit
ϵ	gerichteter Emissionsgrad
ϵ_λ	gerichteter spektraler Emissionsgrad
ϵ_{PU}	gerichteter Emissionsgrad Polyurethane
ϵ_{rb}	gerichtete Emissionsgrad des Rotorblattes
η	dynamische Viskosität
θ	Blattverwindungswinkel

θ_{rb}	Abstrahlwinkel Rotorblatt
κ	Isotropenkoeffizient
λ	Wellenlänge
ν	kinematischen Viskosität
ρ	Dichte
σ	Standardabweichung
σ_a, σ_b	räumliche Standardabweichung in den Auswertebereichen a und b
σ_B	Stefan-Boltzmann-Konstante ($5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^4$)
$\sigma(\Delta T_s)$	Auswertegröße σ DIT-Ansatz
$\sigma(T_{s,UIC})$	Auswertegröße UIC-Ansatz
τ	gerichteter Transmissionsgrad
τ_{atm}	atmosphärischer Transmissionsgrad
τ_λ	gerichteter spektralen Transmissionsgrad
$\bar{\tau}_w$	zeitlich gemittelte Wandreibung
φ	Anströmwinkel
ϕ	Überströmwinkel
Φ	Strahlungsleistung
ω	Kreisfrequenz
Ω	Umdrehungsgeschwindigkeit des Rotors

Akronyme

AB	Ablösebeginn
AP	Transitorische Ablösung/Ablösepunkt
CNR	Kontrast-Rausch-Verhältnis (contrast-to-noise ratio)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DFD	Strömungsleitbleche (dynamic flow deflectors)
DGV	Doppler Global Velocimetry
DIT	Differenzielle Thermografie
ECC	Enhanced Correlation Coefficient
GFK	Glasfaserverstärkten Kunststoff
H ₂ O	Wasser bzw. Wasserdampf
IR	Infrarot
IRT	Infrarot-Thermografie
ITA	Intermittierend transitorische Ablösung
LIR	Langes Infrarot (long infrared)
MCT	Quecksilber-Cadmium-Tellurid (mercury cadmium telluride)
MIR	Mittleres Infrarot (middle infrared)
NETD	Rauschäquivalente Temperaturdifferenz (noise equivalent temperature difference)
NIR	Nahes Infrarot (near infrared)
PC	Hauptkomponente (principal component)
PCA	Hauptkomponentenanalyse (principal component analysis)
PCs	Hauptkomponenten (principal components)
PIV	Particle Image Velocimetry
PU	Polyurethane
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
RLZ	Raumladungszone
SNR	Signal-zu-Rausch-Verhältnis (signal-to-noise ratio)
UIC	Instationäre Anströmbedingungen (unsteady inflow conditions)
VIS	Sichtbares Licht (visible light)
WEA	Windenergieanlagen

1 Einleitung

1.1 Motivation

Vor dem Hintergrund des weltweit steigenden Energiebedarfs, politisch bedingter Engpässe beim Import fossiler Rohstoffe sowie der notwendigen Minimierung der Emission klimaschädlichen Gase, ist der Ausbau erneuerbarer Energien eine der zentralen gesellschaftlichen Herausforderungen unserer Zeit. Im Jahr 2020 betrug der Anteil erneuerbarer Energien am deutschen Strommix 45,3 %, wobei Windenergie mit einem Anteil von 24 % am Bruttostrombedarf der wichtigste Energieträger war [16]. Das Ziel der Bundesregierung bis 2030 ist es, einen Anteil der erneuerbaren Energien am Stromverbrauch von 65 % zu erreichen, wofür die installierte Leistung von Windenergieanlagen an Land auf 80 GW und auf See auf 20 GW ausgebaut werden soll [17]. Dafür bedarf es eine Steigerung der installierten Leistung von Windenergieanlagen um 42 % an Land, und um 150 % auf See. Um diese Ziele zu erreichen, und einen Beitrag zum ökologischen und ökonomischen Erfolg der Energiewende zu leisten, ist es essenziell den Wirkungsgrad, die Zuverlässigkeit, die Lebensdauer, die soziale Akzeptanz und Netzanbindung von Windenergieanlagen weiter zu verbessern.

Windenergieanlagen (WEA) sind Energiewandler, die kinetische Energie der Luft am Rotor zunächst in mechanische Energie und anschließend über den Generator in elektrische Energie umsetzen. Als primärer Energieumwandler ist der Rotor für die Funktionsweise der Windenergieanlage von entscheidender Bedeutung. So legen die aerodynamischen Eigenschaften des Rotors weitgehend den Wirkungsgrad und die Schallemission der WEA fest und sind dafür verantwortlich, die instationäre kinetische Energie der Luft in ein möglichst gleichförmiges Drehmoment umzusetzen, wodurch Lastspitzen vermieden und die Lebensdauer der nachgelagerten mechanischen und elektrischen Komponenten erhöht wird. Bei modernen Windenergieanlagen erfolgt die Regelung der mechanischen Leistungsaufnahme des Rotors in der Regel durch die Verstellung des Blatteinstellwinkels (engl. pitch) der Rotorblätter. Bei Windenergieanlagen mit Pitchregelung ist das Auftreten von Strömungsablösung (engl. stall) ein unerwünschtes aerodynamisches Phänomen [58]. Strömungsablösung tritt auf, wenn der Anstellwinkel einen profilabhängigen kritischen Wert überschreitet und induziert eine Abnahme des Drehmomenterzeugenden Auftriebs und eine Zunahme des Strömungswiderstands [48]. Daraufhin nimmt der aerodynamische Wirkungsgrad, d.h. das Verhältnis von Auftrieb zu Strömungswiderstand, drastisch ab. Darüber hinaus verursacht Strömungsablösung eine Erhöhung des Schalldruckpegels um 10 dB, wodurch die gesellschaftliche Akzeptanz vermindert und die Standortsuche erschwert wird [15]. Ein weiterer Nachteil sind die durch Strömungsablösung induzierten Vibrationen und mögliche Lastspitzen, die zu einer vorzeitigen Materialermüdung führen [32].

Um Strömungsablösung an zukünftigen Generationen von Windenergieanlagen zu vermeiden, werden genaue Kenntnisse über die zugehörigen aerodynamischen Wirkungsmechanismen an den Rotorblättern benötigt. Zwar stehen die ingenieurwissenschaftlichen Methoden der numerischen Strömungssimulation und experimentellen Windkanaluntersuchungen prinzipiell zur Verfügung, allerdings sind beide Ansätze mit Limitierungen verbunden.

Bei der Anwendung numerischer Analysen existieren folgende Einschränkungen [98, 99]:

- Der Abstand zwischen den Längenskalen, der wenige mm breiten Grenzschicht und den bis zu 120 m langen Rotorblättern, führt zu extrem aufwendigen Rechenmodellen. Ebenso führt die zunehmende Größe der Anlagen und der Anstieg der Reynolds-Zahlen sowie die notwendige Kopplung von Strömungs- und strukturdynamischer Modellen zu erhöhten Rechenkosten. Im Ergebnis sind detaillierte Strömungssimulationen mit den verfügbaren Rechenkapazitäten nicht anwendbar, weshalb vereinfachte Strömungsmodelle verwendet werden.
- Die derzeit verwendeten vereinfachten numerischen Modelle zur Abbildung von Strömungsablösung, wie Beddoes-Leishmann-Modelle, werden häufig über ihren Gültigkeitsbereich hinaus eingesetzt bzw. sind nicht in der Lage die bei Ablösungen relevanten 3D-Strömungseffekte abzubilden.
- Eine Validierung der numerischen Analysen oder Bestimmung der Randbedingungen ist oft nicht möglich.

Aus den genannten Gründen sind numerische Analysen nicht ausreichend, um die aerodynamischen Ablösemechanismen an Rotorblättern von WEA aufzulösen. Demnach werden experimentelle Untersuchungen benötigt.

Experimentelle Windkanaluntersuchungen sind zwar dazu geeignet die grundlegenden Strömungsmechanismen unter definierten Bedingungen zu untersuchen, allerdings können reale Strömungsbedingungen an WEA nur teilweise abgebildet werden. Der größte limitierende Parameter ist hierbei die Reynolds-Zahl. Während an modernen Anlagen Reynolds-Zahlen von bis zu $5 \cdot 10^7$ erreicht werden, sind die meisten Windkanäle auf Reynolds-Zahlen von $5 \cdot 10^6$ limitiert. Darüber hinaus werden die meisten Untersuchungen an 2D-Flügelprofilen durchgeführt, wobei die bei Strömungsablösung relevanten 3D-Strömungseffekte nicht auftreten [98]. Daher ist zusätzlich zu numerischen Simulationen und Laborexperimenten an skalierten Flügelprofilen im Windkanal ein in-prozess-fähiges Messsystem zur nicht-invasiven Detektion und räumlich hochaufgelösten Lokalisierung von Strömungsablösung an in Betrieb befindlichen nicht-skalierten WEA unabdingbar, um ein grundlegendes Verständnis für die im Freifeld vorliegenden strömungsphysikalischen Effekte und die daraus resultierenden Wirkmechanismen zu erlangen.

1.2 Stand der Technik und Forschung

Bei der Auslegung der Rotorblätter von WEA müssen sowohl die aerodynamischen als auch die strukturellen Anforderungen beachtet werden. Aerodynamisch wird ein maximales Auftrieb-

zu-Widerstand-Verhältnis unter Verwendung dünner Profile angestrebt, während dicke Profile hinsichtlich der benötigten Strukturintegrität wünschenswert sind. Unter Berücksichtigung der vom Rotorradius abhängigen Anströmbedingungen und Lastverteilung kann das Rotorblatt bezüglich der aerodynamischen und strukturellen Funktion in zwei Bereiche mit unterschiedlichen Eigenschaften hinsichtlich des Auftretens von Strömungsablösung klassifiziert werden [79]:

- Rotorblattwurzelbereich (inneres Drittel des Rotorblattes). Aufgrund der hohen wirkenden Lasten und der geringen Anströmgeschwindigkeit ist die Strukturauslegung ausschlaggebend. Daher werden dicke Flügelprofile, typischerweise mit einem Dicke-zu-Sehnenlängenverhältnis von über 27 %, mit einem geringen aerodynamischen Wirkungsgrad verwendet. In Folge des starken Druckanstiegs stromabwärts der dicksten Stelle ist stationäre Strömungsablösung ein häufig auftretendes Strömungsphänomen [93]. Um Strömungsablösung zu verhindern, und somit eine aerodynamische Optimierung zu erreichen, werden häufig Hilfsmittel wie Vortex Generatoren oder abgeflachte Profil Hinterkanten angebracht [49].
- Mittlerer und äußerer Rotorblattbereich (äußere zwei Drittel des Rotorblattes). Die aerodynamische Auslegung ist dominant, d.h. es werden dünne Profile verwendet. Zwar sollte bei normalen Betriebsbedingungen keine Strömungsablösung vorliegen, allerdings können veränderliche Blatteinstellwinkel, Verformungen des Rotorblattes, Böen oder schräge Anströmungen instationäre Anströmbedingungen und in Konsequenz instationäre Strömungsablösung verursachen [19, 82].

Für die initiale Detektion von stationärer und instationärer Strömungsablösung an in Betrieb befindlichen Windenergieanlagen wird eine in-prozess-fähige und nicht-invasive Messmethode mit hoher Sensitivität bezüglich Strömungsablösung benötigt. Darüber hinaus muss die Methode bei der Lokalisierung des Ablösepunkts eine räumliche Auflösung $< 1\%$ der Sehnenlänge aufweisen, um eine Analyse der Wirkmechanismen beim Auftreten von Strömungsablösung sowie der Wirksamkeit neuer aerodynamischer Hilfsmittel und Rotorblattgeometrien zu ermöglichen. Abschließend setzt die Detektion und Lokalisierung instationärer Strömungsablösung eine hohe zeitliche Auflösung der Messungen voraus.

In Windkanalexperimenten ermöglichen Particle Image Velocimetry (PIV) [60] und Doppeler Global Velocimetry (DGV) [73] nicht-invasive und spatio-temporal hochaufgelöste Grenzschichtströmungsmessungen und sind etablierte Verfahren zur Untersuchung von Strömungsablösungsmechanismen. Für bodenbasierte Grenzschichtmessungen an nicht-skalierten WEA sind die genannten Verfahren jedoch nicht geeignet, da die großen Messabstände (> 100 m) sowie das große Messvolumen zu geringen Signal-zu-Rausch-Verhältnissen (SNR) und geringen räumlichen Auflösungen führen. Die Instrumentierung der Messtechnik am Rotorblatt würde dagegen zu einem hohen Installationsaufwand sowie Stillstandszeiten der WEA führen. Daher erfüllen die genannten Verfahren das geforderte Kriterium der In-Prozess-Fähigkeit an nicht-skalierten Windenergieanlagen nicht.

Aktuell häufig eingesetzte Verfahren zur Identifikation und Lokalisierung von Grenzschichtströmungsablösungen an WEA sind die Anbringung von Wollfäden (engl. Tufts) [100, 88], so-

genannter Stall Flags [20, 49] oder eines Ölfilms [59] an der Rotorblattoberfläche. Hierbei wird durch die Auswertung der räumlichen Orientierung der angebrachten Hilfsmittel bzw. der Struktur des Ölfilms eine wenig detaillierte Aussage über den Zustand der Grenzschichtströmung getroffen. Die genannten Messmittel sind zwar einfach anzuwenden, erfordern jedoch eine Anbringung während des Stillstands der Anlage, beeinflussen die Strömung und liefern im Fall von Bindfäden und Stall Flags eine unbefriedigende räumliche Auflösung. Im Ergebnis steht aktuell kein nicht-invasives Messmittel zur spatio-temporal hochaufgelösten Detektion und Lokalisierung von stationärer und instationärer Strömungsablösung an in Betrieb befindlichen WEA zur Verfügung.

Ein in Windkanalexperimenten etabliertes Verfahren zur Visualisierung der Grenzschichtströmungszustände und dem Potential die Anforderungen bei Messungen an WEA zu erfüllen, ist die Infrarot-Thermografie (IRT). Das Messprinzip basiert auf der Abhängigkeit der konvektiven Wärmestromdichte von den Strömungseigenschaften der Rotorblattströmung. Sofern eine Temperaturdifferenz zwischen der Anströmung und der Rotorblattoberfläche sowie große Biot-Zahlen vorliegen, resultieren auf der Rotorblattoberfläche strömungsabhängige räumliche Temperaturgradienten. Diese werden durch die Erfassung der von der Rotorblattoberfläche emittierten Infrarotstrahlung mit einer Infrarotkamera bildgebend und berührungslos gemessen. Bei einer pixelgenauen Lokalisierung der Ablöseposition ergibt sich für realistische Messbedingungen bei Feldmessungen mit IRT eine hinreichende räumliche Auflösung von etwa 0,5 % der Sehnenlänge.

Bei Windkanalmessungen mit stationären Strömungsbedingungen ist IRT ein etabliertes Verfahren zur Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition [36, 107] oder um das Auftreten laminarer Ablöseblasen [62] und turbulenter Strömungsablösung [37] zu untersuchen. Die Messobjekte werden üblicherweise intern [21] oder extern [72] erwärmt bzw. gekühlt um die konvektive Wärmestromdichte zu erhöhen, und somit einen höheren thermischen Kontrast zwischen den verschiedenen Strömungsbereichen zu erreichen. Zusätzlich erhöht eine Isolierung gegen die innere Wärmeleitfähigkeit des Messobjekts den Kontrast zwischen den Strömungsbereichen und das thermodynamische Ansprechverhalten [83]. Bei der Auflösung instationärer Strömungsphänomene ist IRT aufgrund der thermischen Trägheit der Oberfläche im Vergleich zu zeitlich hochauflösenden Messtechniken wie Hitzdrahtsensoren auf niederfrequente Anteile limitiert. Für die angestrebte IRT-basierte Detektion von instationärer Strömungsablösung an WEA sind insbesondere die Untersuchungen von Raffel et al. [69] und Gardner et al. [34] substantiell. An einem pitch-oszillierenden Hubschrauber-Flügelprofil wurde unter Auswertung differenzieller Thermogramme (DIT-Ansatz) bzw. der räumlichen Standardabweichung differentieller Thermogramme (σ DIT-Ansatz) eine zeitlich aufgelöste Lokalisierung der Transitionsposition sowie Detektion und Charakterisierung von Dynamic Stall mit einer zeitlichen Auflösung von ca. 1 ms erreicht. Somit wurde die prinzipielle Messbarkeit von stationärer und instationärer Strömungsablösung mittels IRT in Windkanaluntersuchungen nachgewiesen. Zusätzlich belegen die Untersuchungen, dass eine IRT-basierte Unterscheidung zwischen Grenzschichtströmungszuständen nicht nur anhand von Temperaturfeldern, sondern ebenfalls über zeitliche Gradienten möglich ist. Darüber hinaus zeigt die Arbeit von Gardner et al. [34], dass großskalige turbulente

Strukturen im abgelösten Strömungsgebiet spatio-temporale Temperaturfluktuationen erzeugen, anhand dessen Strömungsablösung identifizierbar ist.

Im Vergleich zu Windkanaluntersuchungen sind die Messbedingungen bei Freifeldmessungen an realen WEA hingegen limitiert. Zunächst sind die Anströmbedingungen instationär und in der Regel unbekannt. Darüber hinaus besteht die Herausforderung, dass an nicht-skalierten WEA sowohl die räumliche Auflösung, aufgrund des Messabstands, als auch die Messfrequenz, aufgrund der Rotation, stark eingeschränkt sind. Eine Modifikation des Rotorblattes ist ebenso wenig möglich wie eine aktive, leistungsstarke und gleichmäßige Erwärmung der Rotorblattoberfläche, weshalb die vorhandene Temperaturdifferenz einzig auf der absorbierten solaren Strahlungsleistung von $<175 \text{ W m}^{-2}$ basiert und geringe Kontraste zwischen den Strömungsbereichen existieren. Zum Vergleich, bei der thermografischen Detektion von Dynamic Stall in [34] wurden mit Theaterstrahlern eine Heizleistung von ca. 22 kW m^{-2} realisiert. Zusätzlich limitiert der große Messabstand von $>100 \text{ m}$ und die Umfangsgeschwindigkeit der Rotorblätter von bis zu 90 ms^{-1} [38] das erreichbare SNR. Somit erschweren die Messbedingungen an WEA die Detektion und Lokalisierung verschiedener Strömungsbereiche. Infolgedessen bestätigen die dargelegten Untersuchungen im Windkanal zwar das grundsätzliche Potential von IRT zur Detektion von Strömungsablösung, ermöglichen jedoch keine Aussage zur thermografischen Detektierbarkeit von Strömungsablösung oder der nachfolgenden Lokalisierbarkeit der Ablöseposition an Rotorblättern von WEA.

Trotz dieser herausfordernden Messbedingungen wurde IRT bereits erfolgreich zur Detektion und Lokalisierung der stationären laminar-turbulenten Transition an in Betrieb befindlichen Windenergieanlagen angewendet [71]. Hierbei verursacht der deutliche und sprunghafte Anstieg der Nusselt-Zahl im Bereich der laminar-turbulenten Transition räumliche Temperaturunterschiede von mehreren Kelvin. Daher kann anhand der Temperaturverteilung von einzelnen Thermogrammen zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich unterschieden werden. Bei Freifeldmessungen wurde beispielsweise gezeigt, dass die Approximation von Temperaturverläufen in Thermogrammen mit Hilfe einer gaußschen Fehlerfunktion eine Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition mit minimaler Unsicherheit ermöglicht, und dass die erreichbare Messunsicherheit der Transitionsposition nicht durch die Eigenschaften des Messsystems sondern durch natürlich auftretende Strömungsfluktuationen limitiert ist [25]. Ein weiteres untersuchtes Anwendungsfeld von IRT an WEA ist die Detektion von lokal verfrühten Transitionen, die in Folge rauheitsinduzierter Turbulenz auf der Rotorblattoberfläche in der Form eines Keils thermisch sichtbar werden. Die Detektion solcher Turbulenzkeile an in Betrieb befindlichen WEA ermöglicht es, die aerodynamischen Auswirkungen von Erosionen und Kontaminationen der Rotorblattoberfläche unter realen Bedingungen automatisiert zu quantifizieren [26, 64].

Obwohl sich die Wärmeübertragungsmechanismen in turbulent angelegten und turbulent abgelösten Strömungsbereichen unterscheiden, sind die Nusselt-Zahlen beider Strömungsbereiche in der gleichen Größenordnung [47, 55]. Folglich ist der thermische Kontrast zwischen Strömungsbereichen mit turbulenter Grenzschichtströmung und abgelösten Strömungsbereichen im Vergleich zur laminar-turbulenten Transition wesentlich geringer. Zusätzlich mindern Quereinflüsse wie z. B. anisotrope und laterale Wärmeleitung sowie die instationären Anströmbedin-

gungen in Verbindung mit der thermischen Trägheit der Oberfläche, die Detektierbarkeit von Strömungsablösung anhand von eindeutigen thermischen Signaturen. Im Ergebnis resultiert eine geringen Empfindlichkeit der Temperaturverteilung hinsichtlich von Strömungsablösungen, weshalb bei Messungen an WEA bisher weder stationäre noch instationäre Strömungsablösung durch die Auswertung der Temperaturverteilung einzelner Thermogramme detektiert werden konnte. Somit erfordert die thermografische Detektion von Strömungsablösungen die Anwendung eines alternativen Auswerteansatzes.

Der Nachweis der thermografischen Detektierbarkeit von stationärer Strömungsablösung anhand der zeitlichen Auswertung der Oberflächentemperatur für Messbedingungen mit geringem thermischem Kontrast wurde von Dollinger et al. [24] erbracht. Mit dem Ziel, Strömungsablösung anhand von Charakteristiken der spatio-temporalen Oberflächentemperaturfluktuation zu detektieren, wurde das dynamische Verhalten der Oberflächentemperatur anhand der zeitlichen Standardabweichung sowie Fourier Koeffizienten untersucht und eine Steigerung des Kontrasts zwischen den verschiedenen Strömungsbereichen erreicht. Physikalisch interpretierbare thermische Signaturen wurden dagegen nicht identifiziert, weshalb keine eindeutige Lokalisierung der Ablöseposition realisiert werden konnte. Weiterhin blieb das Verständnis der Messkette unvollständig, da weder die Ursache des instationären Verhaltens der Oberflächentemperatur charakterisiert noch zwischen harmonischen und transienten Anteilen der Temperaturfluktuation unterschieden wurde. Da die in [24] vorgestellten Auswerteansätze das stationäre Auftreten von Strömungsablösung während der Messdauer voraussetzten und auf einer zeitlichen Mittelung basieren, ermöglichen die Auswerteansätze keine zeitlich aufgelöste Detektion instationärer Strömungsablösung. Im Ergebnis ist die Auswertung des thermodynamischen Antwortverhaltens der Oberflächentemperatur auf instationäre Anströmbedingungen und turbulente Strukturen der am vielversprechendste Ansatz, um den Kontrast zwischen verschiedenen Strömungsbereichen zu erhöhen sowie eine Detektierbarkeit von stationärer Strömungsablösung an WEA anhand von eindeutigen thermischen Signaturen zu realisieren.

Eine offene Fragestellung ist, inwieweit eine eindeutige Detektion und Lokalisierung von Strömungsablösung, d.h. eine physikalische Interpretierbarkeit der Signalverläufe, und ein maximaler Kontrast zwischen Strömungsbereichen erreicht werden kann. Die Realisierung eines geeigneten Signalverarbeitungsansatzes impliziert hierbei einen modellbasierten Ansatz auf Grundlage des Verständnisses der Messkette. Dabei ist insbesondere zu klären, wie die Eigenschaften des thermodynamischen Antwortverhaltens der Oberfläche auf instationäre Anströmbedingungen und turbulente Strömungsstrukturen in einem Signalverarbeitungsansatz genutzt werden können. Darüber hinaus ist unbekannt, ob und wie der Transfer an reale WEA eines auf der Auswertung von Bildserien basierender Messansatzes realisierbar ist.

Für die angestrebte zeitlich aufgelöste Detektion und Lokalisierung von instationärer Strömungsablösung ist der von Gardner et al. [34] vorgestellte σ DIT-Ansatz ein vielversprechender Ausgangspunkt. Mit dem σ DIT-Ansatz lässt sich bei idealisierten Windkanalmessungen eine hohe zeitliche Auflösung erreichen, wohingegen die räumliche Auflösung gering ist. Da das verfügbare SNR bei Messungen an realen WEA sehr gering ist, ist die grundsätzliche Anwendbarkeit eines differentiellen thermografischen Messansatzes sowie die dabei erreichbare zeitliche Auf-

lösung eine bestehende Forschungsfrage. Zusätzlich ist zu klären, inwieweit ein differentieller Ansatz mit einer zeitlich gemittelten Auswertung kombiniert werden kann, um eine Detektion und Lokalisierung instationärer Strömungsablösung an WEA mit einer hohen räumlichen und einer hohen zeitlichen Auflösung zu erreichen.

Zusammenfassend steht aktuell keine geeignete Messtechnik zur nicht-invasiven Detektion und Lokalisierung von stationärer und instationärer Strömungsablösung an in Betrieb befindlichen WEA zur Verfügung. Infrarot-Thermografie hat das Potential die Anforderungen zu erfüllen, allerdings ist bisher unklar, ob und wie der thermografische Messansatz an WEA angewendet werden kann.

1.3 Ziel und Struktur der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist, die Messfähigkeiten eines auf Infrarot-Thermografie basierenden Messsystems zur nicht-invasiven Detektion und räumlich hochaufgelösten Lokalisierung von Strömungsablösungen zu charakterisieren und auf die In-Prozess-Messung an in Betrieb befindlichen nicht-skalierten WEA zu übertragen. Hinsichtlich der Einordnung der Strömungsablösungsmechanismen umfasst diese Arbeit stationär auftretende Strömungsablösung im Blattwurzelbereich von WEA sowie instationär auftretende Strömungsablösung im äußeren Rotorblattbereich. Mit den erschlossenen Fähigkeiten der Detektion und Lokalisierung von Strömungsablösungen an WEA soll die Grundlage zur Bewertung neuer aerodynamischer Hilfsmittel und Rotorblattgeometrien hinsichtlich ihrer Wirksamkeit bei der Vermeidung von Strömungsablösungen, sowie zur Validierung von Strömungssimulationen geschaffen werden.

In **Kapitel 2** werden die theoretischen Grundlagen der thermografischen Strömungsvisualisierung und die Konzeption der Signalverarbeitungsansätze vorgestellt. Das Kapitel gliedert sich in die Darstellung der aerodynamischen Grundlagen von WEA-Rotoren, einer Analyse der Messkette für die Messbedingungen an WEA mit den daraus resultierenden thermografischen Messmöglichkeiten sowie der Synthese geeigneter Signalverarbeitungsansätze zur Detektion von stationärer und instationärer Strömungsablösung.

Im Anschluss werden in **Kapitel 3** die in dieser Arbeit verwendeten Messanordnungen der Windkanal- und Freifeldmessungen, die entsprechende Versuchsplanung sowie die verwendeten Referenzmesstechniken beschrieben. Ebenso wird die Softwareimplementierung der Datenvorverarbeitung und der verschiedenen Signalverarbeitungsansätze dokumentiert. In den folgenden Kapiteln werden die entwickelten Signalverarbeitungsansätze an aerodynamischen Profilen im Windkanal verifiziert und charakterisiert sowie die Übertragbarkeit der Messansätze auf In-Prozess-Messungen an in Betrieb befindlichen nicht-skalierten WEA erprobt.

In **Kapitel 4** wird in Windkanaluntersuchungen mit definierten und reproduzierbaren Strömungsbedingungen zunächst untersucht inwieweit die Anwendung des entsprechenden Signalverarbeitungsansatzes zu einer eindeutigen Detektion von stationärer Strömungsablösung führt. Darauf basierend wird die Übertragbarkeit des Messansatzes auf die Messbedingungen an einer nicht-skalierten WEA untersucht. Das Kapitel schließt mit der Validierung einer geometrischen Zuordnung der 2D-Thermogramme auf die Oberfläche der Rotorblattgeometrie. Auf

diese Weise lässt sich erstmals die thermografisch ermittelte Ablöseposition auf die reale 3D-Rotorblattgeometrie zuordnen.

Nachfolgend widmet sich **Kapitel 5** der Klärung der spatio-temporalen Auflösungsgrenzen bei der thermografischen Erfassung instationärer Strömungsablösungen unter Einsatz eines Finite-Elemente-Modells zur Berechnung der Temperaturverteilung im Rotorblatt und einer Strömungssimulation zur Quantifizierung des konvektiven Wärmeübergangs an der Rotorblattoberfläche. Zusätzlich werden in Feldmessungen die tatsächlich erreichbaren spatio-temporalen Auflösungsgrenzen für verschiedene Messbedingungen experimentell überprüft.

Im abschließenden **Kapitel 6** werden die erzielten Forschungsergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf weiterführenden Forschungsfragen gegeben.

2 Theoretische Grundlagen und Konzeption der Signalverarbeitung

Ziel dieses Kapitels ist die Konzeption von Messansätzen zur erstmaligen thermografischen Detektion und Lokalisierung von Strömungsablösungen an WEA. An die Messansätze werden die Anforderungen einer eindeutigen Identifizierbarkeit unterschiedlicher Strömungsbereiche anhand physikalisch interpretierbarer Merkmale und einer maximalen Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche anhand des Bildkontrasts gestellt. Zur Einführung in das aerodynamische Phänomen von Strömungsablösungen an WEA und um Vorwissen zum spatio-temporalen Auftreten derselben abzuleiten, werden in Abschnitt 2.1 das Funktionsprinzip von WEA und die aerodynamischen Ablösemechanismen beschrieben. Eine Studie der Messkette in Abschnitt 2.2 klärt bestehende Limitierungen bei der bisherigen Anwendung von IRT an WEA und ermöglicht die Konzeption neuer Signalverarbeitungsansätze, deren Vorstellung in Abschnitt 2.3 erfolgt. Bei einer Prüfung der Anforderungen werden die Vor- und Nachteile der Signalverarbeitungsansätze beschrieben und die Vorteile einer komplementären Nutzung verschiedener Ansätze aufgezeigt.

2.1 Gesamtsystem WEA und aerodynamische Wirkmechanismen turbulenter Strömungsablösungen

2.1.1 Aufbau und Funktionsweise

Windenergieanlagen wandeln die kinetische Energie des Windes über den Rotor in mechanische Arbeit, und mittels eines Generators in elektrische Energie um. Hinsichtlich der Bauform wird bei WEA grundsätzlich zwischen Rotoren mit vertikaler Drehachse und Horizontalachsen-Rotoren unterschieden. Die Vorteile der Vertikalachsen-Rotoren gegenüber Horizontalachsen-Rotoren sind die Windrichtungsunabhängigkeit, die einfache Bauart sowie die Möglichkeit der bodenbasierten Anbringung mechanischer und elektrischer Komponenten. WEA mit Horizontalachsen-Rotoren weisen hingegen gegenüber WEA mit Vertikalachsen-Rotoren die folgenden Vorteile auf [49]:

- Die Rotordrehzahl und die Leistungsabgabe der Anlagen sind durch eine Verstellung der Rotorblätter regelbar.
- Die Rotorblätter erreichen höhere aerodynamische Wirkungsgrade.

- Die aero- und hydrodynamischen Theorien von Hubschraubern und Schiffspropellern lassen sich teilweise auf Horizontalachsen-Rotoren übertragen, wodurch ein gewisser technologische Entwicklungsvorsprung gegeben ist.

Aufgrund der genannten technologischen Vorzüge von Horizontalachsen-Rotoren, werden nahezu alle modernen WEA in dieser Bauart errichtet [75]. Deshalb befasst sich diese Arbeit ausschließlich mit der Untersuchung von Strömungsablösungen an Rotorblättern von WEA mit Horizontalachsen-Rotoren.

Abb. 2.1 zeigt den schematischen Aufbau einer Horizontalachsen-WEA. Von außen sichtbare Elemente dieser Art von WEA sind der Turm, welcher mit einem Fundament im Boden verankert ist, das Maschinenhaus sowie typischerweise drei an der Nabe angeflanschte Rotorblätter. Die vom Wind umströmten Rotorblätter induzieren aerodynamischen Auftrieb, wodurch der Rotor und die Rotorwelle mit einer Drehzahl von 6 min^{-1} bis 10 min^{-1} angetrieben wird. Die mechanische Leistung der Rotorwelle wird bei der Mehrzahl der Windenergieanlagen mittels eines Getriebes auf eine Generator Drehzahl im Bereich von 900 min^{-1} bis 2000 min^{-1} übersetzt bzw. bei getriebelosen WEA direkt an den Generator weitergeleitet [48]. Damit WEA im Betrieb innerhalb eines definierten Arbeitsbereiches operieren, existieren verschiedene Regelungssysteme. Mit den aerodynamischen Eigenschaften der Anlagen, und somit indirekt mit Strömungsablösungen, verknüpfte Regelungssysteme sind die Windrichtungsnachführung sowie die Leistungs- und Drehzahlregelung [49]. Um den für die Energiewandlung nutzbaren Luftstrom zu maximieren und periodische Lastwechsel in Folge von Queranströmungen zu vermeiden, wird der Rotor mittels einer Windrichtungsnachführung zum Wind ausgerichtet. Technisch wird die Windrichtungsnachführung durch mehrere elektrische oder auch hydraulische Motoren umgesetzt, welche durch eine Windfahne auf der Gondel angesteuert werden [38]. Die Nachführgeschwindigkeit ist üblicherweise auf ca. $0,5^\circ \text{ s}^{-1}$ beschränkt, weshalb bei schnell veränderlichen Anströmrichtungen zeitweise auch größere Gierwinkel ($>20^\circ$) und somit unerwünschte aerodynamische Zustände auftreten können [49].

Für die Leistungs- und Drehzahlregelung stehen an Multimegawatt-WEA der Rotorblatteinstellwinkel und das Generatormoment als Stellgrößen zur Verfügung. Wie in Abb. 2.2 veranschaulicht wird in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit zwischen den Betriebsbereichen des Teil- und Volllastbetriebs, mit jeweils angepassten Regelungskonzepten, unterschieden. Der Betriebsbereich für Windgeschwindigkeiten oberhalb der Einschaltgeschwindigkeit u_E und unterhalb einer anlagenspezifischen Nennwindgeschwindigkeit u_N ist der Teillastbetrieb. Im Teillastbetrieb wird die Drehzahl der Anlage durch eine Verstellung des Generatormoments so geregelt, dass der Rotor einen maximalen aerodynamischen Leistungsbeiwert erreicht. Der Blatteinstellwinkel bleibt hingegen konstant. Somit korreliert die Drehzahl der Anlage im Teillastbetrieb mit der Windgeschwindigkeit. Im Volllastbetrieb für Windgeschwindigkeiten bis zur Abschaltgeschwindigkeit u_A übersteigt die mögliche Leistungsaufnahme des Rotors die Auslegungsgrenzen der WEA. In diesem Fall erfolgt die aerodynamische Leistungsbegrenzung über die Verstellung des Blatteinstellwinkels, wohingegen die Drehzahl konstant bleibt. Für beide Betriebsbereiche gilt, dass die Dynamik der Regelung zur Reaktion auf kurzzeitige Fluktuationen der Windgeschwindigkeit nicht ausreicht. Es lässt sich schlussfolgern, dass Regelabweichungen in Folge

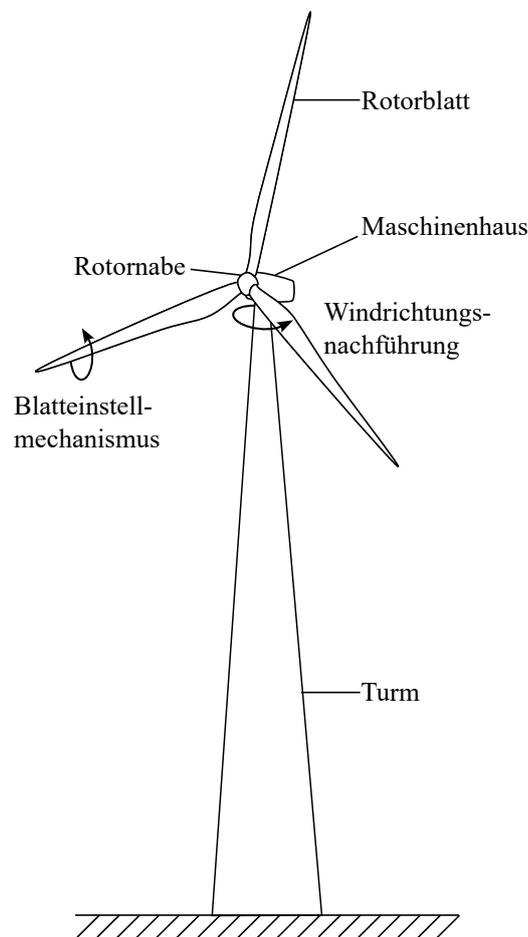


Abb. 2.1: Schematische Darstellung des Aufbaus einer Horizontalachsen-WEA. Ebenfalls eingezeichnet sind die mit den aerodynamischen Eigenschaften der Anlage verknüpfte Windrichtungsnachführung und der Blatteinstellmechanismus.

der Trägheit der Windrichtungsnachführung, des Generatormoments sowie der Verstellung des Blatteinstellwinkels zu unerwünschten aerodynamischen Betriebszuständen führen [57].

2.1.2 Aerodynamische Auslegung der Rotorblätter

Um von der Rotorblattauslegung abweichende aerodynamische Betriebszustände mit dem Auftreten von Strömungsablösungen zu verknüpfen und nachfolgend die Auswirkungen von Strömungsablösungen auf den Wirkungsgrad von WEA darzustellen, wird eine Charakterisierung der aerodynamischen Betriebspunkte der Rotorblätter benötigt.

Ziel der Auslegung der Rotorblätter unter aerodynamischen Gesichtspunkten ist die Maximierung des aerodynamischen Wirkungsgrades. Das reale Leistungsvermögen von WEA wird durch den Leistungsbeiwert C_p ausgedrückt und berechnet sich aus dem Verhältnis der entnommenen Leistung zu der theoretisch verfügbaren Leistung des die Rotorebene durchströmenden Windes. Gemäß der Impulstheorie nach Betz ist der maximale Leistungsbeiwert $C_{p,max} = 16/27$ und wird erreicht, wenn die Windgeschwindigkeit nach der Rotorebene im Vergleich zur Anströmgeschwindigkeit um 66,67 % reduziert ist [6]. Moderne WEA erreichen Leistungsbeiwerte

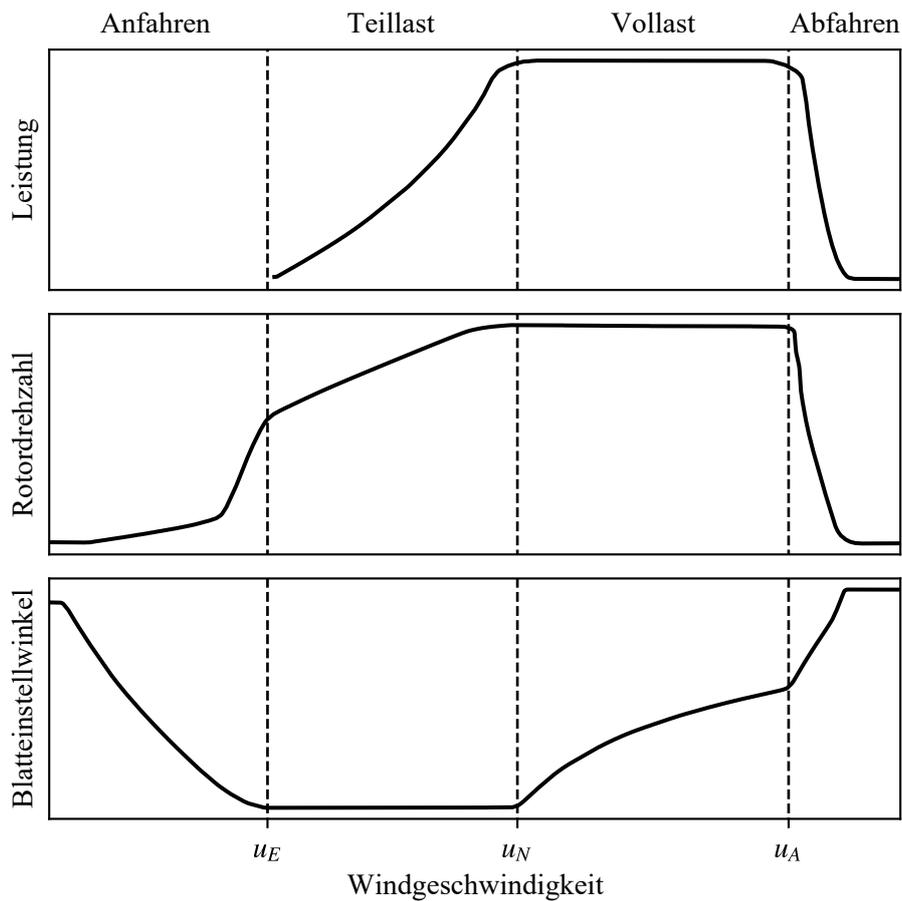


Abb. 2.2: Schematische Darstellung der Anlagenleistung, der Rotordrehzahl und des Blatteinstellwinkels in Abhängigkeit der anliegenden Windgeschwindigkeit für eine WEA mit Blatteinstellregelung. Ebenfalls eingezeichnet: die verschiedenen Betriebsbereiche in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit. Im Teillastbetrieb besteht eine direkte Korrelation zwischen der Windgeschwindigkeit und der Drehzahl, wohingegen die Leistung im Vollastbetrieb durch eine Verstellung der Blatteinstellwinkel geregelt wird und die Drehzahl konstant bleibt, nach [49].

von bis zu 0,5 [48]. Häufig gewählte Ansätze zur Analyse der aerodynamischen Kräfte an Rotorblättern, wie z. B. die Blade Element Momentum (BEM) Methode, basieren auf einer Aufteilung des Rotorblattes in Abschnitte mit einer infinitesimalen Breite dr in radialer Richtung [43]. Gemäß [68] ermöglicht die anschließende 2D-Strömungsanalyse anhand von einfachen mathematischen Beziehungen eine näherungsweise korrekte Berechnung der aerodynamischen Kräfte, sofern die richtigen Anstellwinkel eingestellt werden, die Strömung stationär ist und Querströmungen vernachlässigbar sind. In Abb. 2.3 sind die Geschwindigkeits- und Kraftvektoren für einen angeströmten und rotierenden Rotorblattabschnitt eingezeichnet.

Für die Berechnung der aerodynamischen Kräfte müssen neben der Geometrie des Rotorblattabschnitts die Anströmgeschwindigkeit u_{res} und der Anstellwinkel α bekannt sein. Unter Berücksichtigung der Geschwindigkeitsänderungen in der Rotorebene durch axiale Induktion a_{ax} und tangential Induktion a_{tan} ist die resultierende Anströmgeschwindigkeit u_{res} durch

$$u_{res} = \sqrt{(u_w \cdot (1 - a_{ax}))^2 + (r\Omega \cdot (1 + a_{tan}))^2} \quad (2.1)$$

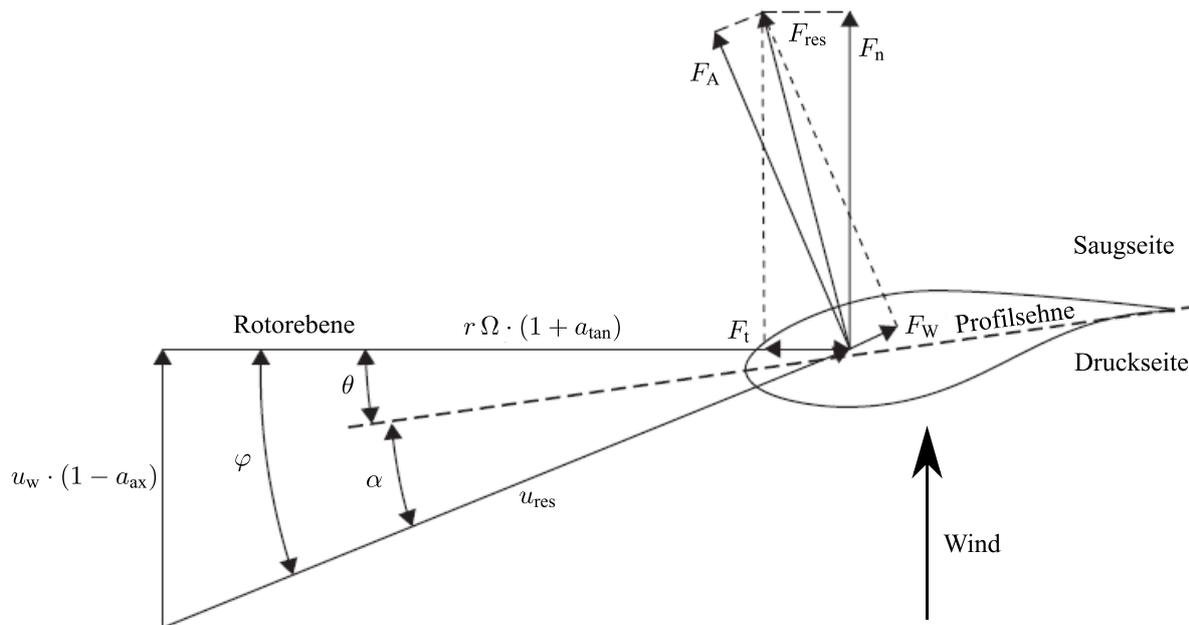


Abb. 2.3: Anströmverhältnisse am Profilquerschnitt eines Rotorblattes an der radialen Position r mit eingezeichneten Geschwindigkeitsvektoren und den resultierenden aerodynamischen Kräften, nach [91].

definiert. Hierbei bezeichnet u_w die Windgeschwindigkeit, Ω die Umdrehungsgeschwindigkeit des Rotors und r den betrachteten Rotorradius. Unter Anwendung einfacher geometrischer Beziehungen und unter Berücksichtigung des Blattverwindungswinkels θ folgt

$$\alpha = \arctan \left(\frac{u_w \cdot (1 - a_{ax})}{r \Omega \cdot (1 + a_{tan})} \right) - \theta \quad (2.2)$$

bzw.

$$\varphi = \alpha + \theta \quad (2.3)$$

für die Berechnung des Anstellwinkels α und des Anströmwinkels φ .

Auf Grundlage der Tragflächentheorie ergeben sich für die Berechnung der senkrecht zur Anströmung wirkenden aerodynamischen Auftriebskraft F_A bzw. der in Richtung der Anströmung wirkenden Widerstandskraft F_W eines überströmten infinitesimalen breiten Rotorblattabschnitts die folgenden Berechnungszusammenhänge [2]:

$$F_A = \int_{dr} \frac{1}{2} \cdot c_a \cdot \rho \cdot u_{res}^2 \cdot c(r) \, dr, \quad (2.4)$$

$$F_W = \int_{dr} \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot \rho \cdot u_{res}^2 \cdot c(r) \, dr. \quad (2.5)$$

Hierbei bezeichnet c die vom Rotorradius abhängige Sehnenlänge des Rotorblattes, ρ die Dichte des Fluids und c_a, c_w den Auftriebs- und Widerstandsbeiwert.

Aus der Vektoraddition von F_A und F_W ergibt sich die in Abb. 2.3 eingezeichnete resultierende Kraft F_{res} . Mittels einer Zerlegung der resultierende Kraft F_{res} in eine Komponente in der Rotorebene und eine Komponente senkrecht zur Rotorebene resultiert die drehmomenterzeugende Tangentialkraft F_t :

$$F_t = F_A \cdot \sin(\varphi) - F_W \cdot \cos(\varphi) \quad (2.6)$$

$$= \int_{dr} \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u_{\text{res}}^2 \cdot c_a \cdot c(r) \left(\sin(\varphi) - \frac{\cos(\varphi)}{c_a/c_w} \right) dr, \quad (2.7)$$

sowie die Schubkraft F_n :

$$F_n = F_A \cdot \cos(\varphi) - F_W \cdot \sin(\varphi) \quad (2.8)$$

$$= \int_{dr} \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u_{\text{res}}^2 \cdot c_a \cdot c(r) \left(\cos(\varphi) + \frac{\sin(\varphi)}{c_a/c_w} \right) dr, \quad (2.9)$$

welche das auf die Rotorblätter wirkende Biegemoment erzeugt. Im Ergebnis wird anhand von Gl. 2.7 und Gl. 2.9 ersichtlich, dass eine Maximierung des Verhältnisses von Auftriebs- zu Widerstandsbeiwert c_a/c_w bei einem festen Auftriebsbeiwert zu einer Steigerung des Drehmoments und einer Abnahme des Biegemoments führt [91]. Folglich wird ein Betriebspunkt gesucht, welcher zur einem maximalen Verhältnis des Auftriebs- zu Widerstandsbeiwert führt.

Für die Strömungsgeschwindigkeiten an WEA sind die Beiwerte c_a und c_w Funktionen der Rotorblattgeometrie, des Anstellwinkels und der Reynolds-Zahl Re_c . Die sehnenbasierte Reynolds-Zahl Re_c ist definiert als

$$Re_c = \frac{c \cdot u_{\text{res}}}{\nu}, \quad (2.10)$$

mit der Sehnenlänge c als charakteristische Länge und der kinematischen Viskosität ν . In Abb. 2.4 ist der experimentell bestimmte Verlauf von c_a , c_w und c_a/c_w für ein DU 96-W-180-Flügelprofil bei $Re_c = 2 \cdot 10^6$ über den Anstellwinkel α aufgetragen. Der Auftriebsbeiwert c_a nimmt bis zu $\alpha = 10^\circ$ näherungsweise linear zu, siehe Abb. 2.4a. Ab $\alpha = 10^\circ$ beginnt die Strömung an der Hinterkante abzulösen, was typischerweise zu einer Abnahme von c_a führt. Demnach lässt sich anhand des Maximums des Auftriebsbeiwert c_a der stationäre Ablöswinkel α_{stat} bestimmen. Weiterhin ist in Abb. 2.4a erkennbar, dass der Widerstandsbeiwert c_w bis zu α_{stat} leicht und darüber hinaus stark ansteigt. Schließlich lässt sich in Abb. 2.4b anhand des Maximums von c_a/c_w bei $\alpha = 7^\circ$ der aerodynamische Auslegungspunkt für den maximalen aerodynamischen Wirkungsgrad des Rotorblattabschnitts bestimmen.

Im Ergebnis der Analyse der aerodynamischen Auslegung der Rotorblätter ist ersichtlich, dass Strömungsablösung an einer definierten radialen Rotorposition auftritt, wenn der lokale Anstellwinkel den lokalen stationären Ablöswinkel übersteigt, d. h. $\alpha(r) > \alpha_{\text{stat}}(r)$. Als Folge der Ablösung nimmt der aerodynamische Wirkungsgrad deutlich ab und es werden höhere Schublasten induziert. Typische Ursachen für $\alpha(r) > \alpha_{\text{stat}}(r)$ sind Limitierungen bei der aerodynamischen Auslegung der Rotorblattgeometrie, falsch gewählte Auslegungspunkte oder Regelabweichungen bei instationären Anströmbedingungen.

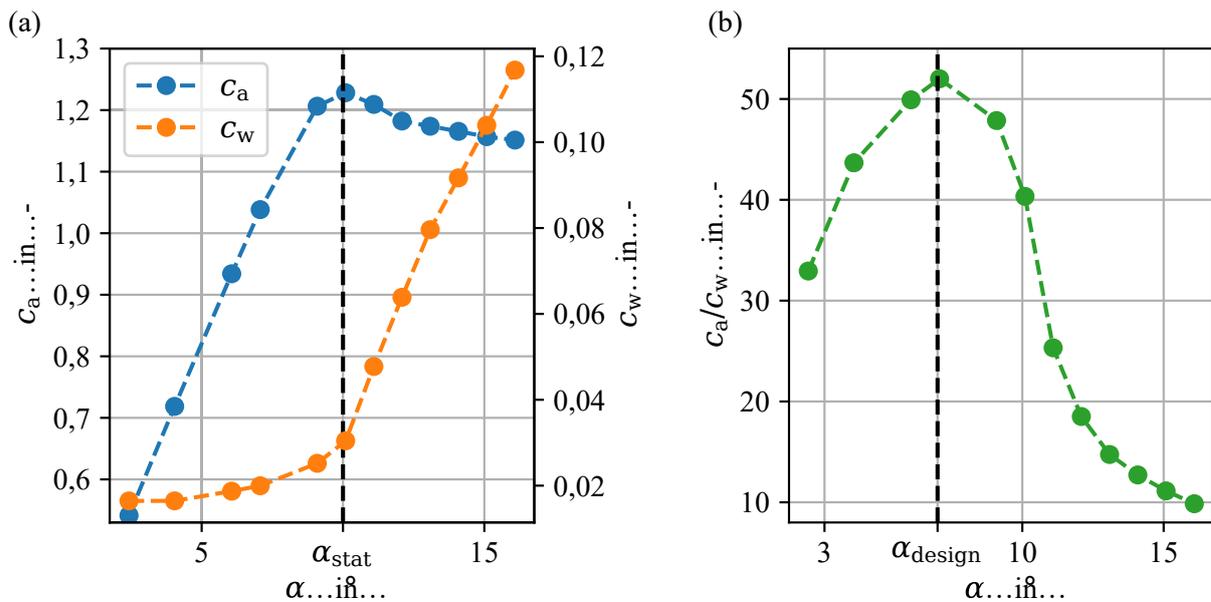


Abb. 2.4: Experimentell bestimmte Profilpolare eines DU 96-W-180-Flügelprofil bei $Re_c = 2 \cdot 10^6$. (a) Der stationäre Ablöswinkel beträgt $\alpha_{stat} = 10^\circ$ (sichtbar anhand des Maximums von c_a). (b) Das Maximum von c_a/c_w entspricht in erster Näherung dem Auslegungspunkt, es gilt $\alpha_{design} < \alpha_{stat}$.

2.1.3 Stationäre und instationäre Strömungsablösungen

Um eine Detektion und Lokalisierung von Strömungsablösung an Rotorblättern von WEA mit Hilfe von IRT zu realisieren, werden zum einen Kenntnisse über die Rotorblattströmung an WEA und zum anderen Vorwissen über die Zeitpunkte und räumlichen Bereiche mit potentieller Strömungsablösung benötigt. Im Weiteren werden zunächst die Grundlagen der Grenzschichtströmung an Rotorblättern von WEA vorgestellt und die strömungsmechanischen Wirkmechanismen beim Auftreten von Strömungsablösung analysiert. Anschließend werden anhand des Vorwissens bezüglich der Wirkmechanismen bei Strömungsablösungen sowie der Analyse der aerodynamischen Regelung und Auslegung von Rotorblättern Zeitpunkte und Rotorblattbereiche mit potentieller Strömungsablösung identifiziert.

2.1.3.1 Grenzschichtströmung

In Abb. 2.5 ist die Umströmung auf der Saugseite eines Flügelprofils schematisch dargestellt. Nach der Grenzschichttheorie von Prandtl wird die Strömung in die Gebiete der Außenströmung und die wandnahe Grenzschichtströmung unterteilt. Während in der Außenströmung viskose Reibungsverluste vernachlässigt werden können, müssen diese in der Grenzschicht berücksichtigt werden. Die Grenzschichtdicke δ_{99} wird in der Regel durch den Abstand zur Wand definiert, an dem die Strömungsgeschwindigkeit 99% der lokalen Außengeschwindigkeit u_e erreicht hat. Innerhalb der Grenzschicht wird primär zwischen den Strömungszuständen laminar und turbulent unterschieden [77]. Die in dieser Arbeit betrachtete turbulente Grenzschichtablösung ist mit einer Auflösung der Grenzschichtströmung verbunden [85].

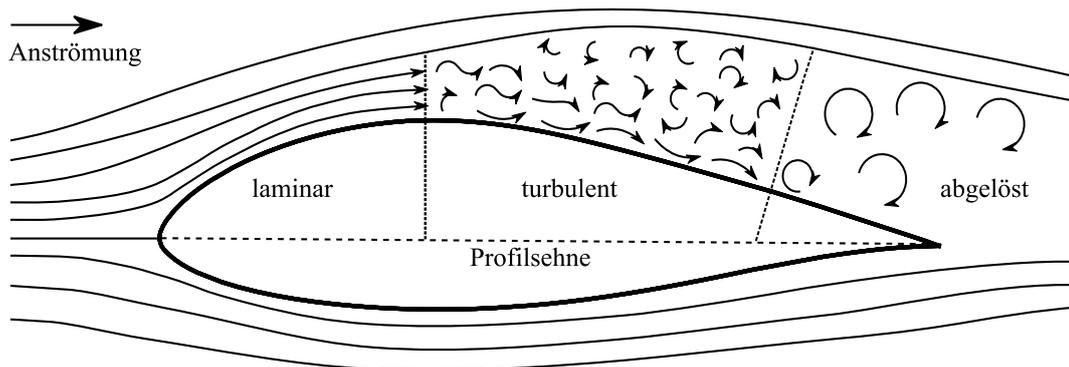


Abb. 2.5: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Bereiche der Grenzschichtströmung auf der Saugseite eines Flügelprofils mit turbulenter Strömungsablösung.

Die Anströmbedingungen und die Geometrie des Flügelprofils bestimmen maßgeblich den der Grenzschicht aufgeprägten Druck- und Geschwindigkeitsverlauf und in Konsequenz die räumliche Verteilung der verschiedenen Strömungsbereiche. Am Staupunkt beträgt die Strömungsgeschwindigkeit null. Auf der Saugseite wird die Strömung in Folge des vorherrschenden Druckabfalls ($\partial p/\partial x < 0$) bis zu einer gewissen Lauflänge beschleunigt. Im Vergleich zur Saugseite ist der Druckabfall und die daraus resultierende Beschleunigung der Strömung auf der Druckseite wesentlich geringer. Da gemäß der Kutta-Bedingung an der Hinterkante keine Unstetigkeit in Druck und Geschwindigkeit auftreten darf, steigt der Druck auf der Saugseite in Richtung der Hinterkante an. In Folge des Druckanstiegs ($\partial p/\partial x > 0$) wird die Strömung verzögert [48]. Ein negativer Druckgradient hat eine stabilisierende Wirkung auf die Strömung. Dem gegenüber induzieren positive Druckgradienten die laminar-turbulente Transition [4]. Die laminar-turbulente Transition erstreckt sich über einen räumlichen Bereich und ist mit einem sprunghaften Anstieg des Strömungswiderstands und der Grenzschichtdicke verbunden [77]. Um den Strömungswiderstand in der Grenzschicht zu minimieren werden an WEA Laminarprofile eingesetzt bzw. eine maximale Ausdehnung des laminaren Bereichs angestrebt [76].

Turbulente Strömungsablösung tritt ausschließlich in Bereichen eines Druckanstiegs auf. Der Wirkmechanismus basiert darauf, dass die kinetische Energie von Fluidelementen aufgrund von Reibungsverlusten in der Grenzschicht nicht ausreicht um Druckanstiege zu überwinden. Das abgebremste Fluid weicht dem Druckanstieg seitlich aus und löst sich vom Flügelprofil ab und es kommt zu einer starken Aufweitung der Grenzschicht. Stromabwärts des Ablösepunktes kommt es zu Rückströmungen, da das Fluid in Wandnähe dem Druckgradienten folgt, siehe Abb. 2.6. Nach [84] sind im Bereich der turbulenten Grenzschichtablösung bei der vereinfachten Betrachtung eines stationär angeströmten 2D-Flügelprofils im Bereich der turbulenten Grenzschichtablösung verschiedene Zustände unterscheidbar. Die Zustände werden in Abhängigkeit des Anteils wandnaher instantaner Rückströmungen über die Zeit bzw. der zeitlich gemittelten Wandreibung $\bar{\tau}_w$ wie folgt definiert:

- Ablösebeginn (AB): 1 % instantane Rückströmung,
- intermittierend transitorische Ablösung (ITA): 20 % instantane Rückströmung,

- transitorische Ablösung/Ablösepunkt (AP): 50 % instantane Rückströmung, $\bar{\tau}_w = 0$.

Die Ablösebedingung ist demnach

$$\bar{\tau}_w = \eta \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} = 0. \quad (2.11)$$

Die an der Wand angewendete Navier-Stokes-Gleichung,

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)_{y=0} = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x'}, \quad (2.12)$$

mit der dynamischen Viskosität η , liefert die Begründung für die Notwendigkeit eines Druckanstiegs für das Auftreten von Strömungsablösung. Gemäß Gl. 2.12 gilt in Bereichen mit verzögerter Strömung $(\partial^2 u / \partial y^2)_{y=0} > 0$, gleichzeitig ist $\partial^2 u / \partial y^2$ am Rand der Grenzschicht negativ. Folglich muss im Inneren der Grenzschicht ein Wendepunkt vorliegen, damit die Ablösebedingung erfüllt werden kann [77]. Somit ist der Grenzschicht aufgeprägte Druckverlauf für das Auftreten von Strömungsablösung entscheidend, wobei hohe Druckgradienten das Auftreten von Strömungsablösung begünstigen.

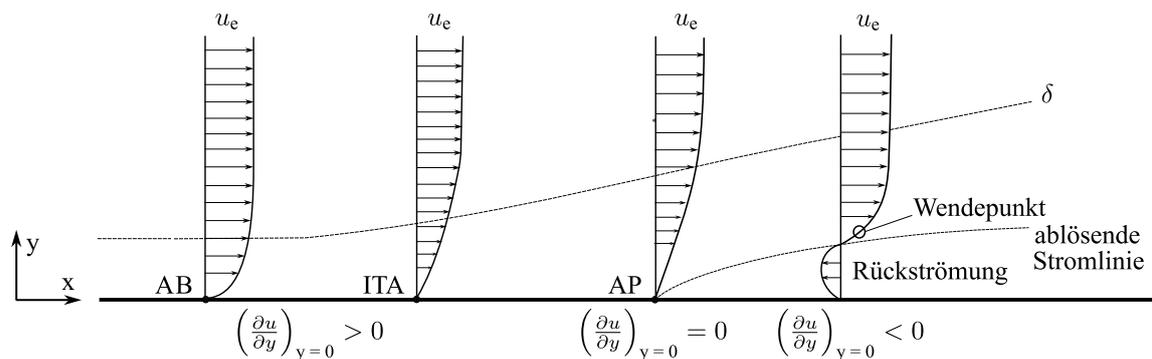


Abb. 2.6: Geschwindigkeitsverteilung im Bereich der turbulenten Grenzschichtablösung. Die definierten Ablösezustände des Ablösebeginns (AB), der intermittierend transitorischen Ablösung (ITA) und des Ablösepunkts (AP) sind eingezeichnet, nach [84, 77, 87].

2.1.3.2 Zeitpunkte und Rotorblattbereiche mit potentieller Strömungsablösung

Um auf Grundlage der dargestellten Ablösemechanismen eine Aussage über das räumliche Auftreten von Strömungsablösung zu treffen, werden im Folgenden Druckverläufe eines querangeströmten Zylinders und eines Flügelprofil vom Typ DU 96-W-180 gegenübergestellt. Der Zylinder stellt eine aerodynamisch nachteilige Extremgeometrie für den Bereich der Rotorblattwurzel dar, wohingegen das aerodynamisch optimierte DU 96-W-180-Flügelprofil im Bereich der äußeren Rotorblattbereich eingesetzt wird. In Abb. 2.7 sind die Druckverläufe beider Geometrien, ausgedrückt durch den dimensionslosen Druckbeiwert c_p , über den Überströmwinkel ϕ bzw. der

Sehnenposition x normiert auf die Sehnenlänge c dargestellt. Der dimensionslose Druckbeiwert berechnet sich mit

$$c_p = \frac{\Delta p}{0,5 \rho u_{\text{res}}^2}, \quad (2.13)$$

hierbei bezeichnet Δp die Druckdifferenz zwischen dem statischen Druck auf der Profilsaugseite und dem statischen Druck in der Anströmung.

In Abb. 2.7a nimmt der Druck zu $\phi \approx 85^\circ$ ab. Ab $\phi \approx 105^\circ$ ist ein steiler Anstieg des Druckbeiwerts zu erkennen, in Folge dessen die Strömung ab $\phi \approx 135^\circ$ ablöst. Der abgelöste Strömungsbereich ist durch konstante Druckbeiwerte gekennzeichnet [89]. Der dargestellte Verlauf ist beispielhaft für stumpfe Körper bzw. Flügelprofile mit einer hohen Profildicke für $Re_c > 2 \cdot 10^5$ [51]. Da im Rotorblattwurzelbereich hohe Lasten wirken, erfolgt die Auslegung in ebenen Bereich primär auf Grundlage struktureller Forderungen. Aus diesem Grund werden typischerweise dicke Flügelprofile mit einem Dicke-zu-Sehnenlängenverhältnis von über 27 % verwendet, weshalb im Rotorblattwurzelbereich ein stationäres Auftreten von Strömungsablösung erwartet wird [93]. Die instantane Ablöseposition ist von den Anströmbedingungen abhängig, beispielsweise wandert die Ablöseposition mit steigenden Anstellwinkel in Richtung Vorderkante.

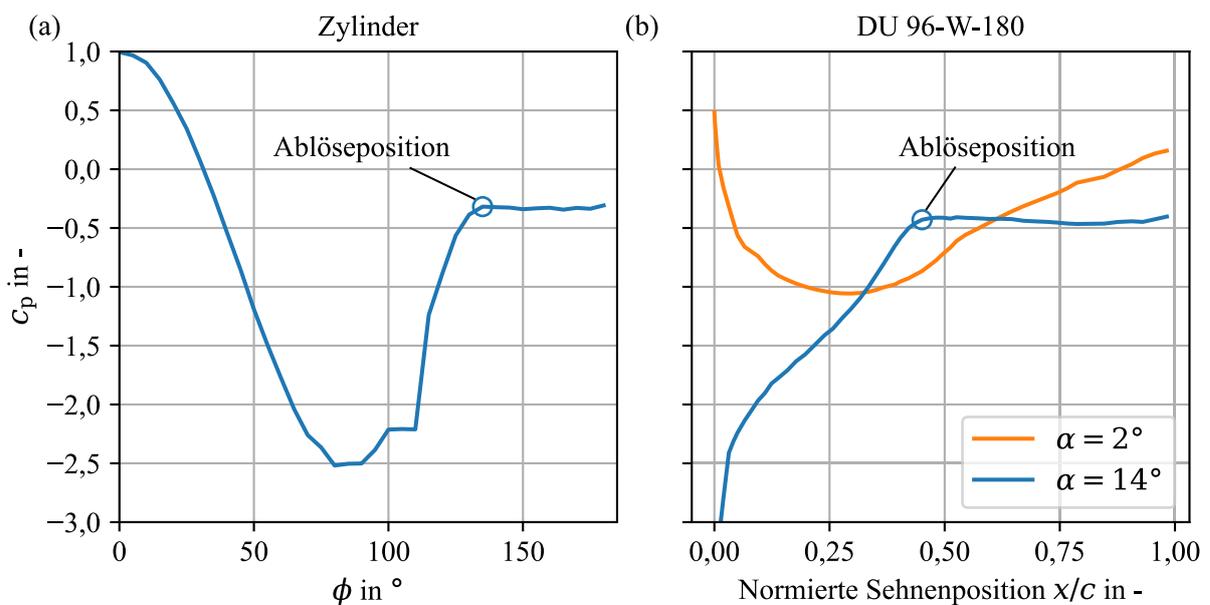


Abb. 2.7: Experimentell bestimmte Druckverläufe für ein querangeströmten Zylinder (a) bei $Re_c = 5 \cdot 10^5$ sowie ein DU 96-W-180-Flügelprofil (b) für die Anstellwinkel $\alpha = [2, 14]^\circ$ und $Re_c = 2 \cdot 10^6$.

Bei dem Flügelprofil vom Typ DU 96-W-180-Flügelprofil wird zwischen einem Anstellwinkel von 2° und 14° unterschieden. Bei einem geringen Anstellwinkel von 2° ist bis $x/c = 0,25$ ein moderater Druckabfall erkennbar. In Folge des geringen Druckanstiegs bleibt die Strömung über der gesamten Sehnenlänge angelegt. Im Vergleich dazu bildet sich bei der Erhöhung des Anstellwinkels auf 14° ein ausgeprägtes Druckminimum im Bereich der Vorderkante aus. In der Konsequenz entsteht ein deutlicher Druckanstieg und die Strömung löst bei $x/c = 0,42$ ab. Typische Ursachen für erhöhte Anstellwinkel und damit das Auftreten von Strömungsablösung im ä-

ßeren Rotorblattbereich sind atmosphärische Turbulenzen wie Böen, fehlerhafte Ausrichtungen der Rotorebene oder veränderliche Anströmbedingungen beim Turmdurchgang des Rotorblattes [54]. Da die Grenzschichtströmung in diesen Fällen nicht stationär abgelöst ist, wird der Zustand in dieser Arbeit als instationär auftretende Strömungsablösung bezeichnet.

Zur Einordnung der Begriffs „instationäre Strömungsablösung“ sei explizit erwähnt, dass der in der Literatur extensiv untersuchte und an rotierenden Flügelprofilen bedeutsame Dynamic-Stall-Prozess eine instationäre Strömungsablösung darstellt [35]. Im Vergleich zu stationärer Strömungsablösung setzt Dynamic Stall eine kritische Instationarität der Strömungsbedingungen mit einer reduzierten Frequenz $\tilde{k} > 0,05$ voraus [54]. Die reduzierte Frequenz \tilde{k} ist eine dimensionslose Kennzahl zur Beschreibung der Instationarität der Strömungsbedingungen und definiert durch

$$\tilde{k} = \frac{\omega c}{2 \bar{u}_{\text{res}}}, \quad (2.14)$$

mit der Kreisfrequenz ω , der veränderlichen Anströmgeschwindigkeit und der mittleren Geschwindigkeit der Anströmung \bar{u}_{res} [66]. Im Rahmen dieser Arbeit wird zwar das zeitlich veränderliche Verhalten der Grenzschichtströmung in Folge instationärer Anströmbedingungen untersucht, aber keine Aussage zur reduzierten Frequenz getroffen werden. Deshalb wird die Art der instationär auftretenden Strömungsablösung nicht näher spezifiziert und der allgemeingültige Begriff „instationäre Strömungsablösung“ verwendet.

Zusammenfassend werden in dieser Arbeit stationäre und instationäre Strömungsablösung behandelt. Stationäre Strömungsablösung wird an WEA unabhängig von den Anströmbedingungen im Rotorblattwurzelbereich erwartet. Allerdings ist die Ablöseposition von den Anströmbedingungen abhängig. Instationäre Strömungsablösung wird im äußeren Rotorblattbereich zeitweise durch Abweichungen der Anströmbedingungen vom aerodynamischen Auslegungspunkt der Rotorblätter induziert. Nachfolgend soll die Messkette bei der angestrebten thermografischen Detektion und Lokalisierung stationärer und instationärer Strömungsablösungen untersucht werden.

2.2 Messkette der thermografischen Strömungsvisualisierung an Windenergieanlagen

Die Messkette der thermografischen Strömungsvisualisierung an WEA lässt sich grob in die Abschnitte Wärmeübertragung an der Rotorblattoberfläche, berührungslose Temperaturmessung mittels IRT sowie die Signalverarbeitung mit einer abschließenden Expertenanalyse unterteilen. Eine Übersicht der Bestandteile der Messkette ist in Abb. 2.8 skizziert.

(1) Die Temperatur der umströmten Rotorblattoberfläche wird durch die vorherrschenden Wärmeübertragungsvorgänge festgelegt. Unter der Bedingung einer initialen Temperaturdifferenz zwischen der Anströmung und der Rotorblattoberfläche existiert ein konvektiver Wärmetransport zwischen der Grenzschichtströmung und der Rotorblattoberfläche. Da die Stärke des konvektiven Wärmeübergangs von den räumlich und zeitlich veränderlichen Eigenschaften der

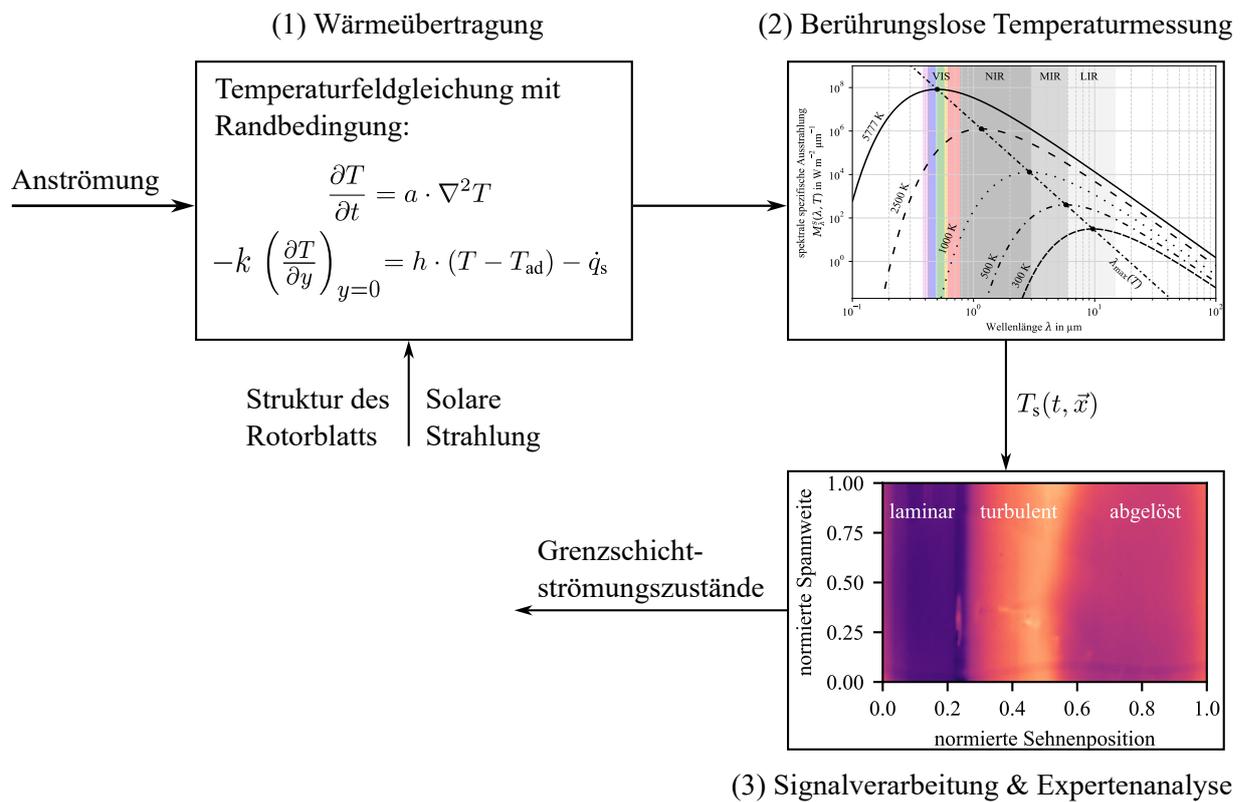


Abb. 2.8: Messkette der thermografischen Strömungsvisualisierung an WEA.

Grenzschichtströmung abhängt, resultieren auf der Rotorblattoberfläche strömungsabhängige Temperaturgradienten.

(2) Die Temperaturverteilung der Oberfläche ist durch die Erfassung der emittierten IR-Strahlung der Rotorblattoberfläche mit einer entsprechenden Kamera zeitlich aufgelöst messbar. Die Grundlage hierfür stellt der funktionelle Zusammenhang zwischen der emittierten Strahlungsleistung und der Oberflächentemperatur dar.

(3) Zur Lösung des invers gestellten Problems werden die gemessenen Temperaturfelder mit einem geeigneten Signalverarbeitungsansatz ausgewertet und die Strömungsbereiche mit Hilfe eines Experten oder einer Expertin unterschieden.

In den folgenden Abschnitten soll auf die einzelnen Bestandteile der Messkette (1–3) näher eingegangen werden. Bei der Analyse der Messkette werden für die jeweiligen Bestandteile folgende Ziele verfolgt:

- (1) Erweiterung des Verständnisses der thermischen Wirkmechanismen an der Rotorblattoberfläche, um eindeutige thermische Signaturen für die thermografische Detektion und Lokalisierung von Strömungsablösungen abzuleiten. Bewertung der Sensitivität des Messergebnisses hinsichtlich systematischer Quereinflüsse.
- (2) Identifikation der Anforderungen an den Messaufbau und das Messsystem.

- (3) Darstellung des klassischen Signalverarbeitungsansatzes zur Lösung des inversen Problems, einschließlich der bestehenden Limitierungen hinsichtlich der angestrebten eindeutigen Detektion und Lokalisierung stationärer und instationärer Strömungsablösung.

Das resultierende erweiterte Verständnis der Messkette dient als Grundlage zur nachfolgenden Konzeption neuer Signalverarbeitungsansätze.

2.2.1 Wärmeübertragung - Beschreibung des Temperaturfeldes an der Rotorblattoberfläche

Zur analytischen Beschreibung des thermischen Verhaltens der Oberfläche eines Rotorblattes wird ein infinitesimales Volumenelement an der Oberfläche eines Rotorblattes betrachtet. Für das Volumenelement ergibt sich aus der Anwendung einer Energiebilanz und dem Fourierschen Gesetz die allgemeine Wärmeleitungsgleichung [51]:

$$\rho c_P \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + \dot{q}_{\text{quell}}, \quad (2.15)$$

mit der Temperatur T , einer Wärmequelle \dot{q}_{quell} und den materialspezifischen Größen der Dichte ρ , der spezifischen Wärmekapazität c_P sowie der Wärmeleitfähigkeit k . Unter der Annahme konstanter materialspezifischer Größen und der Vernachlässigung von Wärmequellen vereinfacht sich Gl. 2.15 zu

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \nabla^2 T, \quad (2.16)$$

mit der Temperaturleitfähigkeit $a = k / (\rho \cdot c_P)$. Für die Beschreibung des strömungsabhängigen Wärmetransportes über die Rotorblattoberfläche gilt die Randbedingung

$$\dot{q}_{\text{wl}} = -\dot{q}_{\text{k}} + \dot{q}_{\text{s}}, \quad (2.17)$$

mit der konduktiven Wärmestromdichte \dot{q}_{wl} , der konvektiven Wärmestromdichte \dot{q}_{k} und der Summe der absorbierten bzw. emittierten Wärmestromdichten durch Strahlung \dot{q}_{s} . Aus den Gln. 2.16 – 2.17 folgt, dass das spatio-temporale Verhalten der thermografisch messbaren Oberflächentemperaturverteilung durch die Temperaturleitfähigkeit a , als Materialparameter, sowie den Eigenschaften der Wärmeübertragung durch Konvektion, Wärmeleitung und Strahlung definiert ist. Im Folgenden werden die Wärmeübertragungsmechanismen und Materialparameter an Rotorblättern von WEA mit der Forderung des thermografischen Messansatzes hinsichtlich einer eindeutigen thermischen Signatur beim Auftreten von Strömungsablösungen und der Vermeidung von Quereinflüssen abgeglichen.

2.2.1.1 Konvektive Wärmestromdichte \dot{q}_{k}

Unter der Bedingung einer Temperaturdifferenz zwischen der Grenzschichtströmung und der Rotorblattoberfläche entstehen auf der Rotorblattoberfläche strömungsabhängige räumliche Temperaturgradienten, da die Größe der resultierenden konvektiven Wärmestromdichte von den

Strömungseigenschaften der Grenzschicht abhängt [51]. Weil die konvektive Wärmestromdichte \dot{q}_k die gesuchten Strömungsinformationen beinhaltet, stellt die Abhängigkeit der Oberflächentemperatur von \dot{q}_k die gewünschte Sensitivität des Messansatzes dar.

Betrachtet man die Rotorblattströmung an Windkraftanlagen als eindimensional, so hängt die konvektive Wärmestromdichte \dot{q}_k für die Sehnenposition x und die Zeit t vom Wärmeübergangskoeffizienten h sowie von der Temperaturdifferenz zwischen der adiabaten Wandtemperatur T_{ad} und der Oberflächentemperatur T_s ab:

$$\dot{q}_k(x, t) = h(x, t) \cdot (T_s(x, t) - T_{ad}(x, t)). \quad (2.18)$$

Sowohl der Wärmeübergangskoeffizient h als auch die adiabate Wandtemperatur T_{ad} enthalten Strömungsinformationen. Analog zur Beschreibung der Geschwindigkeit instationärer turbulenter Strömungen kann der instantane Wert des Wärmeübergangskoeffizienten h als eine Summe aus dem zeitlich Mittelwert \bar{h} , den zeitabhängigen Anteilen \tilde{h} und h' aus einem nicht-stationären bzw. einem stationären Zufallsprozess betrachtet werden [77]:

$$h(x, t) = \bar{h}(x) + \tilde{h}(x, t) + h'(x, t). \quad (2.19)$$

Bezogen auf die Strömungsverhältnisse an Windkraftanlagen beschreibt \tilde{h} das instationäre Verhalten des Wärmeübergangskoeffizienten bei instationären Anströmbedingungen. Zur Erfassung von instationärer Strömungsablösung ist \tilde{h} daher eine geeignete Zielgröße. Stationär zufällige Änderungen des Wärmeübergangskoeffizienten werden durch h' bezeichnet und sind turbulenten Strömungsstrukturen zuzuordnen. Um charakteristische thermische Ablösemerkmale für die Auswertung von Thermogrammen zu definieren, wird eine separate Analyse der Einflüsse (a) des zeitlich gemittelten Anteils \bar{h} , (b) des nicht-stationären Anteils \tilde{h} und (c) des stationär-zufälligen Anteils h' des Wärmeübergangskoeffizienten sowie (d) der adiabatischen Wandtemperatur T_{ad} durchgeführt.

(a) Zeitlich gemittelter Wärmeübergangskoeffizient \bar{h}

Ein häufig gewählter Ansatz zur Näherung des konvektiven Wärmeübergangs in laminaren und turbulenten Strömungsbereichen an Rotorblättern ist die Reynolds-Analogie [37]. Die Reynolds-Analogie ist in 2D-Grenzschichtströmungen ohne Druckgradienten mit Prandtl-Zahlen gleich eins gültig. Die Prandtl-Zahl Pr ist ein Maß für das Verhältnis von Impuls- und Wärmeübertragung in der Grenzschichtströmung und definiert als

$$Pr = \frac{\eta c_P}{k}. \quad (2.20)$$

Da Luftströmungen eine Prandtl-Zahl von näherungsweise eins aufweisen, ist die Reynolds-Analogie für eine erste Näherung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten anwendbar. Für die Berechnung des lokalen zeitlich gemittelten Wärmeübergangskoeffizienten $\bar{h}(x)$ gilt,

$$\bar{h}(x) = 0,5 \cdot c_{f,x} \cdot u \cdot \rho_L \cdot c_{P,L}, \quad (2.21)$$

wobei $c_{f,x}$ den lokalen Wandreibungskoeffizienten sowie ρ_L und $c_{p,L}$ die Dichte bzw. Wärmekapazität der Luft bezeichnen. Der Vorteil der Reynolds-Analogie besteht darin, dass der Wandreibungskoeffizient aus dem Geschwindigkeitsfeld berechnet werden kann, wodurch eine vergleichsweise einfache Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten ermöglicht wird [13].

Zur exemplarischen Beschreibung des Verlaufs des mittleren Wärmeübergangskoeffizienten im laminaren und turbulenten Strömungsbereich, ist in Abb. 2.9 ein mit der Simulationssoftware XFoil berechneter Verlauf des Wandreibungskoeffizienten über die Sehnenlänge für die Saugseite eines NACA0020-Profiles dargestellt. Da im Bereich der Blattvorderkante typischerweise große Druckgradienten existieren, ist die Reynolds-Analogie hier nicht anwendbar. Demnach kann für den Bereich der Blattvorderkante ohne Vorwissen keine eindeutige Aussage zum qualitativen Verlauf der Oberflächentemperatur getroffen werden. In den laminaren und turbulenten Strömungsbereichen mit geringen Druckgradienten nehmen $c_{f,x}$ und \bar{h} in Strömungsrichtung durch die Zunahme der Grenzschichtdicke ab, weshalb die konvektive Kühlung abnimmt und die Oberflächentemperatur in Strömungsrichtung zunimmt. Im Bereich der laminar-turbulenten Transition, bei $x/c = 0,45$ in Abb. 2.9, steigen $c_{f,x}$ und \bar{h} in Folge der erhöhten turbulenten Durchmischung im turbulenten Strömungsbereich sprunghaft an, wodurch eine erhöhte konvektive Kühlung induziert wird [13]. Der daraus resultierende Temperaturabfall, vorausgesetzt $T_{ad} > T_s$, ist das dominierende thermische Merkmal bei der thermografischen Strömungsvisualisierung an WEA, und somit substantiell für das Verständnis der Ergebnisse.

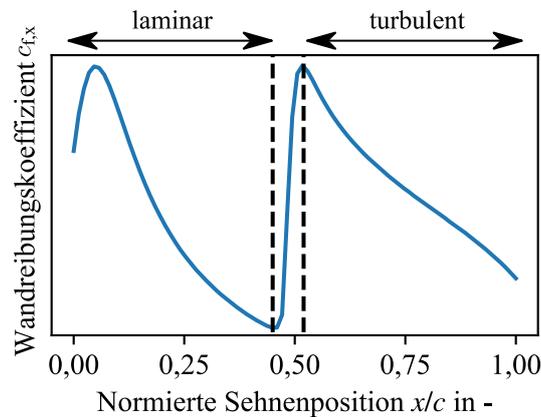


Abb. 2.9: Beispielhafter Verlauf des lokalen Wandreibungskoeffizienten $c_{f,x}$ über die Sehnenposition für die Saugseite eines NACA0020-Profiles. Der dargestellte Verlauf wurde mit der Simulationssoftware XFoil mit den Parametern $Re_c = 3 \cdot 10^6$ und $\alpha = 4^\circ$ berechnet.

Im abgelösten Strömungsbereich sind großskalige Wirbelstrukturen der dominante Mechanismus für die konvektive Wärmeübertragung und die Reynolds-Analogie ist nicht anwendbar [18, 47]. Im Bereich der Ablösung kann aufgrund der komplexen Beziehungen zwischen dem konvektiven Wärmeübergang, der Profilgeometrie, den Oberflächeneigenschaften und den externen Strömungseigenschaften, wie dem Turbulenzgrad, kein allgemeingültiges Verhalten von \bar{h} angegeben werden [90, 36]. Allerdings sind typische Merkmale der konvektiven Wärmeübertragung in Windkanalexperimenten an Flügelprofilen und an quer angeströmten Zylindern eine

Abnahme von \bar{h} ab der Position beginnender Ablösung sowie eine nachfolgende Zunahme von \bar{h} aufgrund von anwachsenden Wirbelstrukturen im abgelösten Strömungsbereich [55, 5]. In Folge der Abnahme von \bar{h} ab der Position beginnender Ablösung und der Zunahme von \bar{h} im abgelösten Strömungsbereich resultiert am Ablösepunkt ein charakteristisches Minimum von \bar{h} .

(b) Nicht-stationärer Anteil \tilde{h} des Wärmeübergangskoeffizienten

Aufgrund des nicht-monotonen Verhaltens von \bar{h} im Bereich der Transition bzw. der Ablösung und der räumlichen Verschiebung der Transitions- und Ablöseposition bei veränderlichen Anströmbedingungen, treten in den Übergangsbereichen zwischen den verschiedenen Strömungsbereichen Extrema des nicht-stationären Anteils \tilde{h} des Wärmeübergangskoeffizienten auf. Abb. 2.10 zeigt den erwarteten qualitativen Verlauf von \bar{h} für zwei verschiedene Zeitpunkte mit unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten und Anstellwinkeln, sowie die daraus resultierende instationäre Änderung \tilde{h} über die normierte Sehnenposition x/c . Im Detail ist das thermische Verhalten im Bereich der laminar-turbulenten Transition in Abb. 2.10a dargestellt, während Abb. 2.10b das thermische Verhalten um den Ablösepunkt im Fall instationärer Strömungsbilddung zeigt. Für den dargestellten Fall mit einer Erhöhung des Anstellwinkels resultiert eine verstärkte konvektive Kühlung im Transitionsbereich, siehe Abb. 2.10a, bzw. eine reduzierte konvektive Kühlung im Bereich der Ablösung, siehe Abb. 2.10b. In Folge dessen ist der Transitions- und Ablösebereich anhand von Extrema der spatio-temporalen Temperaturgradienten detektierbar und lokalisierbar.

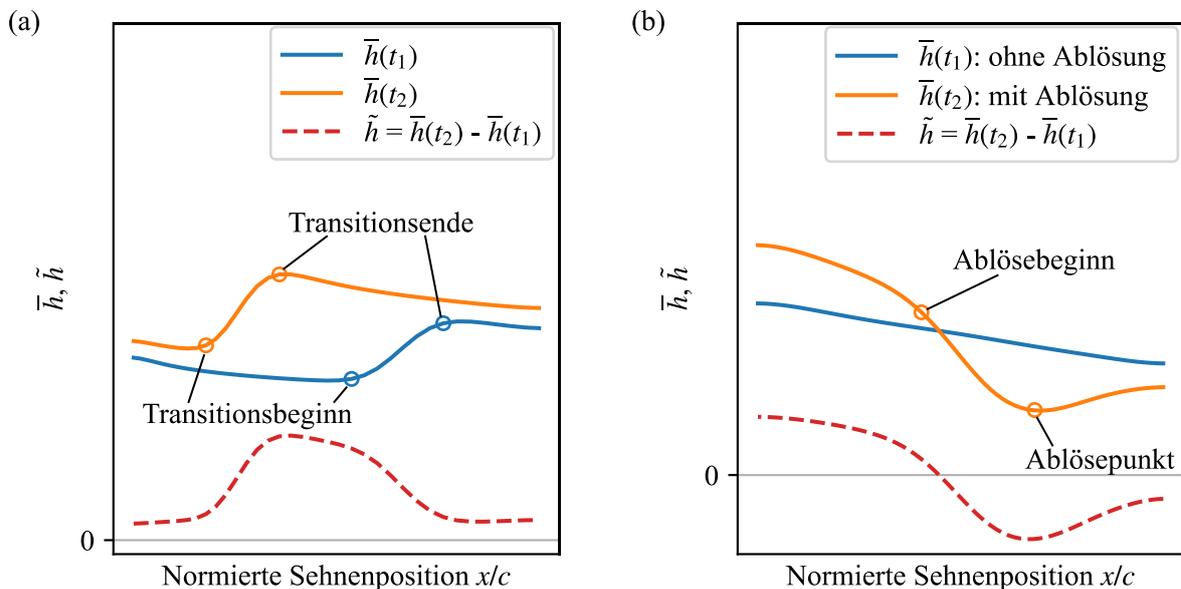


Abb. 2.10: Idealisierter Verlauf des zeitlich gemittelten \bar{h} und nicht-stationären Anteils \tilde{h} des Wärmeübergangskoeffizienten über die normierte Sehnenposition für die Bereiche der Transition (a) und Strömungsbilddung (b) zu zwei Zeitpunkten mit unterschiedlichen Anströmbedingungen. Am Beispiel eines sprunghaften Anstiegs der Windgeschwindigkeit bei einer Böe: Der erste Zeitpunkt t_1 ist unmittelbar vor dem Einsetzen der Böe, während t_2 ein Zeitpunkt beim Auftreten der Böe mit einer erhöhten Anströmgeschwindigkeit u_{res} und Anstellwinkel α repräsentiert. Daher gilt: $t_1 < t_2$, $\alpha(t_1) < \alpha(t_2)$ und $u_{\text{res}}(t_1) < u_{\text{res}}(t_2)$.

(c) Stationär-zufälliger Anteil h' des Wärmeübergangskoeffizienten

Die charakteristischen Merkmale turbulent abgelöster Strömungen sind großskalige Wirbelstrukturen [90]. Diese Merkmale führen zu stationär-zufälligen Änderungen h' des Wärmeübergangskoeffizienten und somit zu spatio-temporalen Fluktuationen der Oberflächentemperatur. Basierend auf der Arbeit von Gardner et al. [34] besteht die These, dass die durch h' induzierten Temperaturfluktuationen thermografisch messbar sind, und in abgelösten Strömungsbereichen zu einer höheren spatio-temporalen Varianz der Oberflächentemperatur als in angelegten Strömungsbereichen führen. Darüber hinaus nimmt die spatio-temporalen Varianz der Oberflächentemperatur im abgelösten Strömungsbereich in Strömungsrichtung zu, da Wirbelstrukturen anwachsen.

(d) Adiabate Wandtemperatur T_{ad}

Anhand der Differenz zwischen der Oberflächentemperatur T_s und der adiabaten Wandtemperatur T_{ad} wird die Triebkraft für die konvektive Wärmeübertragung festgelegt. In Folge der strömungsabhängigen Dissipation kinetischer Energie können lokale Unterschiede der adiabaten Wandtemperatur auftreten. Die adiabate Wandtemperatur wird mit der Anströmtemperatur T_{fl} , dem Recovery-Faktor r_T , der Mach-Zahl Ma und dem Isotropenkoeffizient κ wie folgt definiert

$$T_{ad} = r_T \cdot T_{fl} \cdot Ma^2 \cdot (\kappa - 1) / 2 + T_{fl}. \quad (2.22)$$

Für $Ma < 0,3$ wird die Strömung üblicherweise als inkompressibel betrachtet und der Einfluss viskoser Erwärmung vernachlässigt. Bei den geringen Strömungsgeschwindigkeiten im Blattwurzelbereich resultieren sehr kleine Mach-Zahlen ($Ma \ll 0,3$), gemäß Gl. 2.22 folgt $T_{ad} \approx T_{fl}$, weshalb der Einfluss der viskosen Erwärmung bei der Detektion von stationärer Strömungsablösung vernachlässigt wird. Bei Mach-Zahlen von bis zu $Ma = 0,25$ im äußeren Rotorblattbereich ist ein nicht-vernachlässigbarer Einfluss der viskosen Erwärmung auf die thermografische Detektierbarkeit von instationärer Strömungsablösung dagegen insbesondere bei Messbedingungen mit einer geringen solaren Erwärmung der Oberfläche möglich.

Die Abhängigkeit der adiabaten Wandtemperatur von den Eigenschaften der Grenzschichtströmung wird durch den Recovery-Faktor bestimmt. Der Recovery-Faktor ist grenzschichtsensitiv und gibt an, welcher Anteil der kinetischen Energie dissipiert und somit zur Erwärmung der wandnahen Strömung führt. Auf Grundlage experimenteller Untersuchungen zur viskosen Erwärmung in abgelösten Strömungsbereichen wird angenommen, dass der Recovery-Faktor im abgelösten Strömungsbereich kleinere Werte aufweist als in den angelegten Strömungsbereichen [18, 7]. In Tab. 2.1 ist die dissipative Erwärmung im turbulenten und abgelösten Strömungsbereich sowie die resultierende Differenz der dissipative Erwärmung beider Strömungsbereiche für verschiedene Mach-Zahlen gegenübergestellt.

Aufgrund der Abnahme des Recovery-Faktors wird im abgelösten Strömungsbereich eine geringere viskose Erwärmung als im angelegten Strömungsbereich erwartet. Für die Messbedin-

Tab. 2.1: Vergleich der dissipativen Erwärmung für turbulente und abgelöste Strömungsbereiche. Gemäß [18] wird für den turbulenten Bereich $r_T = 0,89$ und den abgelösten Bereich $r_T = 0,8$ angenommen.

Ma in -	$dT_{\text{diss,turbulent}}$ in K	$dT_{\text{diss,abgelöst}}$ in K	$dT_{\text{diss,turbulent}} - dT_{\text{diss,abgelöst}}$ in K
0,05	0,13	0,12	0,01
0,15	1,16	1,04	0,12
0,25	3,2	2,9	0,3

gungen an WEA mit $T_s > T_{\text{ad}}$ und unter Berücksichtigung der erwarteten Abnahme der konvektiven Kühlung um den Ablösepunkt (siehe Verlauf von \bar{h} in Abb. 2.10) führt die geringere viskose Erwärmung im abgelösten Strömungsbereich zu einer Minderung des thermischen Kontrasts zwischen angelegten und abgelösten Strömungsbereichen und ist somit ein unerwünschter Quereinfluss.

2.2.1.2 Wärmeleitung \dot{q}_{wl} und Materialparameter

Eine hohe Korrelation zwischen den thermografisch messbaren räumlichen Temperaturgradienten und den Eigenschaften der Grenzschichtströmung erfordert einen stärkeren konvektiven Wärmetransport im Vergleich zur Wärmeleitung. Die dimensionslose Biot-Zahl Bi gibt das Verhältnis vom Wärmeleitwiderstand im Rotorblatt zum Wärmeübergangswiderstand zur umgebenden Strömung an und eignet sich daher zur Abschätzung der grundsätzlichen thermodynamischen Eignung des Messansatzes der thermografischen Strömungsvisualisierung an WEA. Die thermografische Unterscheidbarkeit unterschiedlicher Strömungsbereiche wird durch $Bi > 1$ begünstigt.

In Abb. 2.11 ist der strukturelle Aufbau eines Rotorblattes schematisch dargestellt. Die äußeren Materialschichten der Rotorblätter sind typischerweise eine Polyurethane-basierte Beschichtung und darunterliegend eine glasfaserverstärkten Kunststoff. Die zur Lösung der Wärmeleitungsgleichung (Gl. 2.16) benötigten Materialparameter der genannten Materialien sind in Tab. 2.2 aufgelistet. Für einen mittleren Wärmeübergangskoeffizienten $h = 60 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, einer Schichtdicke $L_s = 0,02 \text{ m}$ der GFK und PU-Schicht mit der mittleren Wärmeleitfähigkeit $k_s = 0,348 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ sowie der Annahme einer relativen Unsicherheit der Angaben von jeweils 5 % ergibt sich mit

$$Bi = \frac{h \cdot L_s}{k_s}, \quad (2.23)$$

die Biot-Zahl $Bi = 3,4 \pm 0,3$. Da $Bi > 1$, sind die Wärmeleitungseigenschaften der Rotorblätter von WEA für das Messprinzip der thermografischen Strömungsvisualisierung grundsätzlich gut geeignet, d. h. es besteht eine hohe Korrelation zwischen den thermografisch messbaren räumlichen Temperaturgradienten und den Eigenschaften der Grenzschichtströmung.

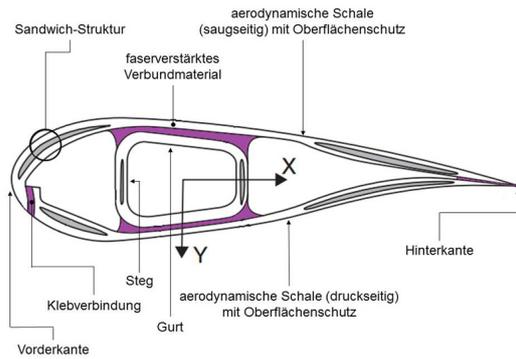


Abb. 2.11: Profilschnitt eines Rotorblattes einer WEA [52].

Trotz der hohen Biot-Zahl werden die thermografisch messbaren Temperaturfelder durch das thermische Verhalten des Rotorblattes, insbesondere durch instationäre Wärmeleitung und die anisotropen sowie inhomogenen thermischen Materialeigenschaften, beeinflusst. Auf der einen Seite wirkt laterale Wärmeleitung als Tiefpassfilter auf strömungsinduzierte räumliche Temperaturgradienten und reduziert somit die Ausbildung der ohnehin nur schwach ausgeprägten thermischen Ablösesignaturen. Auf der anderen Seite führen die in Abb. 2.11 sichtbaren anisotropen und inhomogenen Material- und Struktureigenschaften zur Ausbildung strömungsunabhängiger räumlicher Temperaturgradienten, sodass die eindeutige Detektierbarkeit thermischer Ablösesignaturen limitiert wird. Zur Messung instationärer Strömungsablösung wird zusätzlich ein schnelles thermodynamisches Ansprechverhalten der Oberfläche benötigt. Jedoch führen die thermische Trägheit der Rotorblattoberfläche und die geringe Temperaturdifferenz zwischen der adiabaten Wandtemperatur und der Oberflächentemperatur zu einer geringen Sensitivität der messbaren Oberflächentemperatur gegenüber instationären Strömungsbedingungen. Im Ergebnis ist die Auswertung instantaner Temperaturfelder mittels einzelner Thermogramme, aufgrund des Einflusses von Wärmeleitung sowie der thermischen Trägheit der Oberfläche, aus thermodynamischer Sicht nicht dazu geeignet Strömungsablösungen zu detektieren. Um die Sensitivität des Messansatzes bezüglich Strömungsablösungen zu steigern, bedarf es folglich alternativer Signalverarbeitungskonzepte.

2.2.1.3 Absorbierte solare Strahlungsleistung $\dot{q}_{s,abs}$

Die Emission und Absorption von Wärmestrahlung an der Oberfläche der Rotorblätter sind für die initiale Temperaturdifferenz zwischen der Rotorblattoberfläche und der Anströmung verantwortlich und legen somit die Triebkraft für die konvektive Wärmeübertragung fest. Je höher der Betrag der Wärmeübertragung durch Strahlung, desto größer ist der räumliche Temperaturgradient bzw. der thermografische Kontrast zwischen unterschiedlichen Bereichen der Grenzschichtströmung. Darüber hinaus ist ein räumlich gleichmäßiger Strahlungseintrag nötig, um strömungsunabhängige Temperaturgradienten auf der Oberfläche zu vermeiden.

Parameter	Material	
	GFK	PU
k in $\text{W m}^{-1} \text{K}$	0,47	0,23
c_p in $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}$	950	1040
ρ in kg m^{-3}	1830	1540
a in $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	$1,41 \cdot 10^{-7}$

Tab. 2.2: Übersicht der Materialparameter für die äußeren Materialschichten. Die Angaben für glasfaserverstärkten Kunststoff (GFK) und die Polyurethane-basierte Beschichtung (PU) basieren auf [108, 96].

Während in Windkanalexperimenten häufig eine aktive Erwärmung der Rotorblattoberfläche durch Heizstrahler erfolgt, ist eine externe Erwärmung bei Messungen an WEA ausgeschlossen. Somit basiert die Temperaturdifferenz zwischen der Rotorblattoberfläche und der Anströmung primär auf der Absorption solarer Strahlung. Die Beiträge zur Abkühlung oder Erwärmung des Rotorblattes in Folge des Strahlungsaustausches des Rotorblattes mit der direkten Umgebung werden in dieser Arbeit nicht näher betrachtet, d. h. es wird ein Nettostrahlungsstrom gleich null angenommen. Zur Charakterisierung der Messbedingungen wird folglich eine Abschätzung der bei Freifeldmessungen erreichbaren solaren Strahlungseinträge benötigt. Bei der Abschätzung der solaren Strahlungseinträge müssen Einflussgrößen wie der Ort, die Wetterbedingungen, die Jahreszeit oder die Tageszeit berücksichtigt werden, da diese Faktoren den Einstrahlwinkel der Sonnenstrahlen sowie Abschwächungen der Strahlungsintensität in Folge von atmosphärischer Absorption und Streuung beeinflussen.

In Abb. 2.12 ist der Anteil der vom Rotorblatt absorbierten solaren Strahlungsleistung $\dot{q}_{s,abs}$ über die Dauer von 24 h für die Tage mit dem minimalen bzw. maximalen Zenitwinkel der Sonne (21.06 und 21.12) sowie in Abhängigkeit der prozentualen Bewölkungsdichte aufgetragen. Die Berechnung der Strahlungsleistungen basiert auf dem in der Python-Bibliothek „pvlib“ implementierten „isotropic sky“-Modell [30]. Die verwendeten Modellannahmen sind:

- Die Krümmung der Rotorblattoberfläche wird vernachlässigt und ein Absorptionsgrad für solare Strahlung von $a_{solar} = 0,25$ angenommen. In der Literatur existieren diesbezüglich unterschiedliche Zahlenwerte, so wird in [102] $a_{solar} = 0,6$ angegeben. Die Annahme $a_{solar} = 0,25$ basiert auf der Untersuchung in [24] und der Übereinstimmung mit den Zahlenwerten für helle Kunststoffbeschichtungen in [50]. Es gilt $\dot{q}_{s,abs} = a_{solar} \dot{q}_{s,in}$, wobei $\dot{q}_{s,in}$ die einfallende solare Strahlungsleistung bezeichnet.
- Der Winkel zwischen der Normalen der Rotorblattoberfläche und der Normalen des Bodens beträgt 90° . Die Rotorblattoberfläche ist also vertikal zum Boden ausgerichtet.
- Der solare Zenitwinkel wird für den Ort der Freifeldmessungen, Thedinghausen, Deutschland, ($52^\circ 55' 59.3'' N$ $9^\circ 00' 28.1'' O$) berechnet.
- Die Sonne und die Rotorebene haben den gleichen Azimutwinkel, d. h. die Rotorebene ist stets zur Sonne ausgerichtet.

Anhand von Abb. 2.12 ist zu erkennen, dass die maximal zur Verfügung stehende absorbierte Strahlungsleistung am 21. Juni 166 W m^{-2} und am 21. Dezember 125 W m^{-2} beträgt. Im Vergleich zu Windkanalmessungen mit Heizleistungen im Bereich von mehreren Tausend W m^{-2} ist die bei Feldmessungen verfügbare solare Strahlungsleistung somit um mehrere Größenordnungen reduziert. Im Mittel sind die Maxima von $\dot{q}_{s,abs}$ für die unterschiedlichen Bewölkungsdichten am 21. Juni um 53 % höher als am 21. Dezember. Folglich sind Messzeiträume in den Sommermonaten gegenüber den Wintermonaten zu bevorzugen. Darüber hinaus führt eine Zunahme der Bewölkungsdichte zu einer Abnahme von $\dot{q}_{s,abs}$. Weiterhin ist eine ideale Ausrichtung der Rotorebene zur Sonne bei Freifeldmessungen nicht einstellbar, sodass $\dot{q}_{s,abs}$ in der Regel nochmals deutlich reduziert wird. Für die an einem Tag maximal zur Verfügung stehende absorbierte

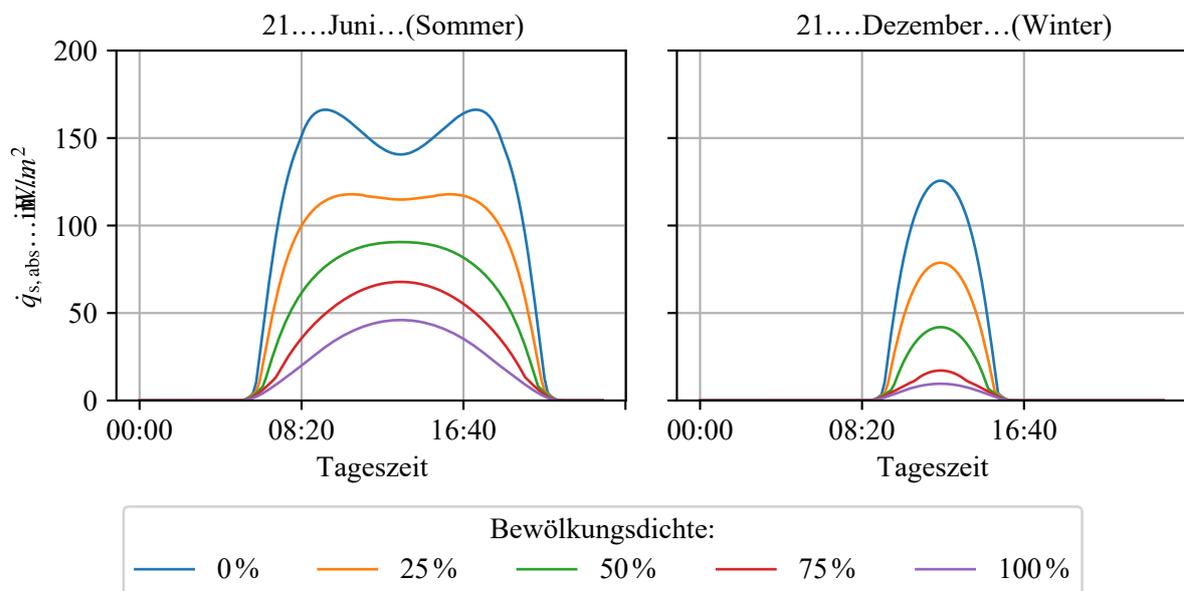


Abb. 2.12: Von dem Rotorblatt absorbierte solare Strahlungsleistung über die Dauer eines Tages für die Daten 21. Juni und 21. Dezember sowie unterschiedliche Bewölkungsdichten.

te Strahlungsleistung resultiert unter Berücksichtigung der variablen Bewölkungsdichten, den saisonalen Schwankungen und den getroffenen idealisierten Annahmen der Wertebereich von $10 W m^{-2}$ bis $166 W m^{-2}$.

Bei Feldmessungen beträgt der thermische Kontrast zwischen laminaren und turbulenten Strömungsbereichen typischerweise $>0,5 K$. Für eine minimal auflösbare Temperaturdifferenz (engl. noise equivalent temperature difference, NETD) der Kamera von 25 mK ergibt sich ein zur Detektion der Transition ausreichender Kontrast. Im Vergleich dazu ist der Kontrast zwischen angelegten und abgelösten Strömungsbereichen erfahrungsgemäß nicht ausreichend, um eine eindeutige Detektion von abgelösten Strömungsbereichen zu realisieren. Deshalb wird in dem Kapitel 4 und dem Kapitel 5 auf die Fragestellung zurückzukommen sein, inwieweit stationäre und instationäre Strömungsablösungen unter Anwendung geeigneter Signalverarbeitungsansätze thermografisch erfassbar sind.

2.2.2 Thermografie - Berührungslose Temperaturmessung

Alle Körper mit einer absoluten Temperatur über 0 K emittieren Wärmestrahlung. Beim Aussenden von Wärmestrahlung wird an der Oberfläche des Körpers innere Energie in Strahlungsenergie umgewandelt. Das Messprinzip der Thermografie basiert darauf, dass die emittierte Strahlungsleistung neben den Materialeigenschaften von der Oberflächentemperatur abhängt und durch entsprechende Kameras erfassbar ist [101]. Mit Hilfe des inversen Modells zur Beschreibung der Abhängigkeit zwischen der Messgröße (emittierte Strahlungsleistung des Rotorblattes) und dem Messwert (Oberflächentemperatur) kann die Verteilung der Oberflächentemperatur bestimmt werden.

2.2.2.1 Strahlungsphysikalische Grundlagen

Plancksches Strahlungsgesetz

Nach der von Planck [67] begründeten und von Einstein [27] erweiterten Quantentheorie kann Wärmestrahlung sowohl als elektromagnetische Welle als auch als Strahlung aus Photonen (Lichtteilchen) beschrieben werden. Die spektrale Strahlungsenergie Q_λ einer Anzahl $n_{P,\lambda}$ im Vakuum emittierten Photonen mit der Energie E_{Photon} und der Wellenlänge λ berechnet sich zu

$$Q_\lambda = E_{\text{Photon}} n_{P,\lambda} = \frac{\hbar c_0}{\lambda} n_{P,\lambda}. \quad (2.24)$$

Hierbei bezeichnet $\hbar = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{Js}^{-1}$ das Plancksche Wirkungsquantum und $c_0 = 299792458 \text{ms}^{-1}$ die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. Die von einem Körper emittierte Strahlungsleistung Φ resultiert aus der zeitlichen Ableitung des Integrals von Q_λ über das elektromagnetische Spektrum

$$\Phi = \frac{d}{dt} \int Q_\lambda d\lambda. \quad (2.25)$$

Die auf ein Flächenelement bezogene Strahlungsleistung ist die spezifische Ausstrahlung $M = \frac{d\Phi}{dA}$. Die in der Radiometrie am häufigsten gebräuchliche Größe ist hingegen die Strahldichte L [101]

$$L = \frac{d^2\Phi}{\cos(\delta) dA d\Omega'} \quad (2.26)$$

welche die Strahlungsleistung eines Emitters pro Raumwinkelelement $d\Omega$ und pro projiziertes Flächenelement $\cos(\delta) dA$ bezeichnet, wobei δ den Winkel zwischen der Ausstrahlrichtung und der Flächennormalen bezeichnet. Aus den dargestellten Grundlagen der Wärmestrahlung geht hervor, dass die Energie der emittierten Wärmestrahlung von der spektralen Verteilung der Wärmestrahlung abhängig ist.

Als kanonisches Konzept für die Berechnung der spektralen Verteilung der Wärmestrahlung wird häufig die Strahlung eines schwarzen Körpers betrachtet [1]. Ein schwarzer Körper ist ein perfekter Emittor und durch folgende Eigenschaften definiert [101, 51]:

- Ein schwarzer Körper absorbiert jedwede einfallende Wärmestrahlung.
- Kein Körper kann bei gegebener Temperatur und Wellenlänge mehr Wärmestrahlung aussenden als ein schwarzer Körper.
- Die Strahlungsintensität eines schwarzen Körpers ist richtungsunabhängig.

Nach dem Planckschen Strahlungsgesetz berechnet sich die spektrale spezifische Ausstrahlung M_λ^s bzw. spektrale Strahldichte L_λ^s in den Halbraum eines schwarzen Körpers mit einer definierten Temperatur zu

$$M_\lambda^s(\lambda, T) = L_\lambda^s \pi = \frac{2\pi \hbar c_0^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{\hbar c_0}{\lambda k_b T}} - 1}, \quad (2.27)$$

mit der Boltzmann-Konstante $k_b = 1,38065 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ [67]. Die Integration von Gl. 2.27 über den gesamten Wellenlängenbereich ergibt das Stefan-Boltzmann-Gesetz

$$\int M_\lambda^s(\lambda, T) d\lambda = \sigma_B T^4, \quad (2.28)$$

mit der Stefan-Boltzmann-Konstante $\sigma_B = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^4$, zur Berechnung der gesamten spezifischen Ausstrahlung eines schwarzen Körpers [86, 12].

In Abb. 2.13 ist die, mit Hilfe von Gl. (2.27) berechnete, spektrale spezifische Ausstrahlung eines schwarzen Körpers für unterschiedliche Temperaturen über die Wellenlänge dargestellt. Die Darstellung zeigt, dass die spektrale spezifische Ausstrahlung M_λ^s mit der Temperatur zunimmt, und sich die Lage des Maximums von M_λ^s auf den Isothermen mit ansteigenden Temperaturen zu kürzeren Wellenlängen verschiebt. Unter Verwendung des Wienschen Verschiebungsgesetz $\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$, mit der Verschiebungskonstante $b = \frac{hc_0}{4,965 \text{ K}} = 2898 \mu\text{K}$, lässt sich die Lage der Maxima von M_λ^s in Abhängigkeit der Temperatur bestimmen [105]. So liegt λ_{\max} für die Oberflächentemperatur der Sonne von $T = 5778 \text{ K}$ im für das menschliche Auge sichtbaren Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm.

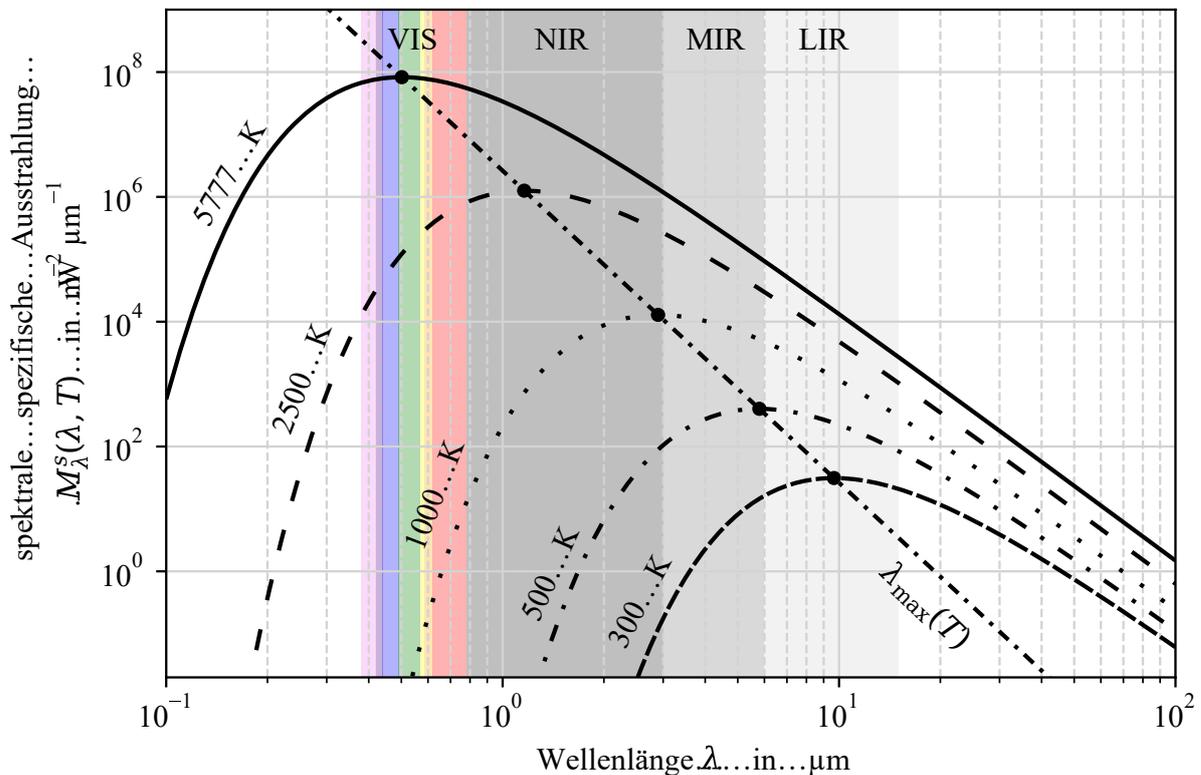


Abb. 2.13: Mit dem Planckschen Strahlungsgesetz berechnete Verteilung der spektralen spezifischen Ausstrahlung eines schwarzen Strahlers $M_\lambda^s(\lambda, T)$ über die Wellenlänge λ für verschiedene Temperaturen T . Das Wellenlängenspektrum ist in die Wellenlängenbereiche des sichtbaren Lichts (VIS), nahen Infrarots (NIR), mittleren Infrarots (MIR) und langen Infrarots (LIR) unterteilt. Der Lage der Maxima der Isothermen entsprechend, wird bei berührungslosen Temperaturmessungen an technischen Oberflächen, mit $T < 3000 \text{ K}$, die höchste Signalstärke durch die Erfassung der Ausstrahlung im infraroten Spektrum erreicht, nach [10].

Aufgrund der deutlich niedrigeren Temperaturen technischer Oberflächen ist der Infrarotstrahlungsbereich mit Wellenlängen von 760 nm bis 1 mm für die Anwendung von Thermografie von primärer Bedeutung. Für die technische Nutzung von IR Thermografie wird das infrarote Spektrum typischerweise in nahes Infrarot zwischen $0,78 \mu\text{m} - 3 \mu\text{m}$ (engl.: near infrared, NIR), mittleres Infrarot zwischen $3 \mu\text{m} - 7 \mu\text{m}$ (engl.: middle infrared, MIR) und langes Infrarot zwischen $7 \mu\text{m} - 14 \mu\text{m}$ (engl.: long infrared, LIR) unterschieden [9]. Die Beschränkung auf die genannten Wellenlängenbereiche resultiert aus Betrachtungen hinsichtlich einer Maximierung der Ausstrahlung, der Transmissioneigenschaften der Atmosphäre und der Physik der Detektoren [101].

Radiometrisches Grundgesetz

Unter Vernachlässigung atmosphärischer Abschwächungen der elektromagnetischen Strahlung ermöglicht das radiometrische Grundgesetz in der Form

$$\Phi_{12} = L_1 \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2} dA_1 dA_2, \quad (2.29)$$

die Berechnung der Strahlungsleistung Φ_{12} , welche von einem Oberflächenelement des Rotorblattes dA_1 (Emitter) auf die Apertur der IR-Kamera dA_2 (Empfänger) fällt [42]. Abb. 2.14a veranschaulicht die geometrischen Größen zur Anwendung des radiometrischen Grundgesetzes für eine beliebige geometrische Anordnung. Hierbei bezeichnen θ_1 und θ_2 die Winkel zwischen den Oberflächennormalen n_1 und n_2 der Flächen dA_1 und dA_2 und der Ausstrahlrichtung sowie $r_{1,2}$ den Abstand zwischen Emitter und Empfänger. Hinsichtlich der Abbildung eines Oberflächenelementes auf einen Pixel einer Kamera gelten bei der thermografischen Temperaturmessung folgende radiometrische Zusammenhänge bzw. Annahmen:

- Die von einem Pixel detektierte Strahlungsleistung ist unabhängig vom Messabstand $r_{1,2}$, da die auf einen Pixel abgebildete Oberfläche dA_1 mit steigendem Abstand r quadratisch zunimmt.
- Die von einem Pixel detektierte Strahlungsleistung ist unabhängig von θ_1 , da sich das auf einen Pixel abgebildete Oberflächenelement mit dem Faktor $\frac{1}{\cos(\theta_1)}$ vergrößert.
- Bei der Verwendung von Objektiven mit fester Brennweite kann jedem Pixel ein fester Einstrahlwinkel θ_2 zugeordnet werden. Durch eine Kamerakalibrierung wird der Einfluss von $\cos(\theta_2)$ korrigiert.

Im Ergebnis ist die auf die Apertur fallende Strahlungsleistung Φ_{12} ausschließlich von der emittierten Strahlungsdichte L_1 abhängig. Sofern ein Rotorblatt einer Windenergieanlage vereinfachend als idealer Emitter betrachtet wird, folgt daraus, dass die detektierte Strahlungsleistung innerhalb eines definierten Wellenlängenbereiches mit dem Planckschen Strahlungsgesetz berechnet werden kann und lediglich von der Temperatur der Oberfläche abhängt.

2.2.2.2 Emittierte Strahlungsleistung des Rotorblattes

Im Vergleich zu der vorangegangenen Darstellung handelt es sich bei einem Rotorblatt um einen realen Körper, der nur näherungsweise als idealer Emittier betrachtet werden kann. Um die reale Strahlungsdichte zu bestimmen, wird demnach eine materialabhängige Korrektur benötigt. Zu diesem Zweck wird der gerichtete spektrale Emissionsgrad ϵ_λ eingeführt

$$\epsilon_\lambda(\lambda, T, \theta) = \frac{L_\lambda(\lambda, T, \theta)}{L_\lambda^s(\lambda, T)}, \quad (2.30)$$

welcher bei definierten Materialeigenschaften von der Wellenlänge λ , der Temperatur T sowie dem Winkel θ zwischen der Oberflächennormalen und der Strahlungsrichtung abhängt, und durch das Verhältnis der gerichteten spektralen Strahldichte eines realen Körpers zur Strahldichte eines schwarzen Körpers definiert ist. Ein häufig gewählter Ansatz, um ϵ_λ abzuschätzen, ist die Anwendung des Kirchhoffschen Strahlungsgesetz. Nach dem Gesetz von Kirchhoff weisen alle im thermischen Gleichgewicht befindlichen Körper gleiche ϵ_λ und gerichtete spektrale Absorptionsgrade a_λ auf [39]. Es gilt

$$\epsilon_\lambda(\lambda, T, \theta) = a_\lambda(\lambda, T, \theta). \quad (2.31)$$

Darüber hinaus folgt aus dem Energieerhaltungssatz mit dem gerichteten spektralen Transmissionsgrad τ_λ und dem gerichteten spektralen Reflexionsgrad r_λ

$$1 = a_\lambda(\lambda, T, \theta) + \tau_\lambda(\lambda, T, \theta) + r_\lambda(\lambda, T, \theta). \quad (2.32)$$

Bei einem strahlungsundurchlässigen realen Körper ($\tau_\lambda = 0, \epsilon_\lambda < 1$) wird die nicht emittierte bzw. absorbierte Strahlung reflektiert. Somit genügt die Kenntnis über den gerichteten spektralen Reflexionsgrad eines strahlungsundurchlässigen Körpers, um den gerichteten spektralen Emissionsgrad zu bestimmen [10]. Abschließend lässt sich die Strahldichte eines Rotorblattes in einem Wellenlängenintervall von λ_1 bis λ_2 für bekannte gerichtete spektrale Emissionsgrade wie folgt berechnen

$$L = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_\lambda(\lambda, T, \theta) L_\lambda^s(\lambda, T) d\lambda. \quad (2.33)$$

Bei der IR thermografischen Strömungsvisualisierung kann die Abhängigkeit des Emissionsgrades von der Wellenlänge und der Temperatur vernachlässigt werden, da die räumlichen Temperaturunterschiede vergleichsweise gering sind ($< 5\text{K}$) und der Emissionsgrad im infraroten Spektrum üblicherweise konstant ist [101, 8]. Aus diesem Grund werden im Weiteren ausschließlich die gerichteten Emissions-, Transmissions- und Reflexionsgrade betrachtet.

Wie in Abb. 2.14b exemplarisch veranschaulicht, führt die Krümmung von Flügelprofilen an Windenergieanlagen zu substantiellen Änderungen des Abstrahlwinkels θ . Da räumliche Unterschiede des gerichteten Emissionsgrades auf der Rotorblattoberfläche ϵ_{rb} zu strömungsunab-

hängigen räumlichen Gradienten der Strahldichte führen, muss geklärt werden inwieweit dieser Quereinfluss die thermografische Strömungsvisualisierung an WEA beeinflusst.

Auf Grundlage der in Abb. 2.15a abgebildeten Winkelabhängigkeit des gerichteten Emissionsgrades für Polyurethane ϵ_{PU} und der in Abb. 2.15b aufgetragenen Abstrahlwinkel θ_{rb} , ist in Abb. 2.15c der berechnete gerichtete Emissionsgrad des Rotorblattes ϵ_{rb} über die Sehnenposition für ein Flügelprofil im Rotorblattwurzelbereich und äußeren Rotorblattbereich dargestellt. Die aus dem räumlich veränderlichen Emissionsgrad resultierende Abweichung der gemessenen Oberflächentemperatur ist in Abb. 2.15d über die Sehnenposition aufgetragen. Die der Berechnung von ϵ_{rb} zugrunde liegenden Annahmen bezüglich der geometrischen Anordnung zwischen der Kamera und den betrachteten Profilschnitten richten sich nach der Messanordnung der in dieser Arbeit vorgestellten Freifeldmessungen. Die Berechnung des Emissionsgrades für PU basiert auf einer Erweiterung der Maxwell'schen Gleichungen [10]. Nach der im Anhang A aufgeführten Modellgleichung lässt sich der Emissionsgrad schließlich in Abhängigkeit des Abstrahlwinkels θ und der Brechzahl n bestimmen. Entsprechend verschiedener Literaturangaben wird für PU die Brechzahl $n = 1,5$ eingesetzt [63, 109].

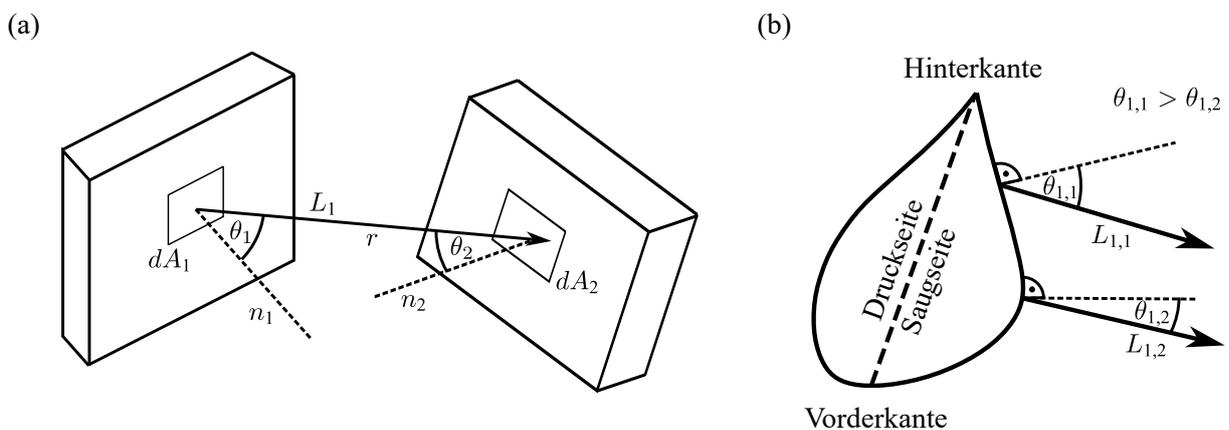


Abb. 2.14: (a): Darstellung der im Radiometrischen Grundgesetz (Gl. 2.29) enthaltenen geometrischen Variablen für eine beliebige Anordnung zweier Flächen. (b): Abbildung der 2D-Rotorblattgeometrie im Blattwurzelbereich einer, in dieser Arbeit vermessenen WEA, sowie der schematisch eingezeichneten resultierenden Abstrahlwinkel. Aufgrund der Profilkrümmung ergeben sich deutliche Unterschiede des Abstrahlwinkels am Rotorblatt θ_{rb} .

Bei einem Abstrahlwinkel von $\theta = 0^\circ$ beträgt $\epsilon_{PU} = 0,96$ und bleibt bis zu einem Abstrahlwinkel von $\theta = 50^\circ$ näherungsweise konstant, für weiter steigende Abstrahlwinkel nimmt ϵ_{PU} stark ab, siehe Abb. 2.15a. Die hohen sowie für einen breiten Abstrahlwinkelbereich näherungsweise konstanten Werte des Emissionsgrades von PU zeigen, dass die Materialeigenschaften der Oberfläche der Rotorblätter von Windenergieanlagen für IR thermografische Messungen sehr gut geeignet sind. Dennoch sind in Abb. 2.15c,d im Bereich der Vorder- und Hinterkante sowie im Rotorblattwurzelbereich bei $x/c = 0,25 - 0,45$ deutliche Änderungen des gerichteten Emissionsgrades und daraus resultierende Temperaturdifferenzen erkennbar. Während die Bereiche in unmittelbarer Nähe zur Vorder- und Hinterkante bei der thermografischen Strömungsvisualisierung an WEA in der Regel nicht von Interesse sind, wird im Bereich von $x/c = 0,25 - 0,45$ das Auftreten der laminar-turbulenten Transition erwartet. Bei dem etablierten Ansatz der Lokali-

sierung der Transitionsposition anhand des Temperaturgradienten wird im Rotorblattwurzelbereich folglich eine Korrektur der durch die räumlich veränderlichen ϵ_{rb} verursachten gemessenen Temperaturdifferenzen benötigt. Alternativ besteht die Möglichkeit den Messabstand zu erhöhen, da erhöhte Messabstände zu geringeren θ_{rb} und somit reduzierten Temperaturdifferenzen bei einer gleichzeitig limitierten räumlichen Auflösung führen.

Für die angestrebte Detektion von Strömungsablösungen ist der Einfluss veränderlicher ϵ_{rb} vernachlässigbar, weil im Bereich der Rotorblatthinterkante näherungsweise konstante Emissionsgrade angenommen werden können. Weiterhin ist der Emissionsgrad zeitlich konstant und hat daher keinen Einfluss auf die in dieser Arbeit verfolgte Detektion und Lokalisierung von Strömungsablösungen anhand der Auswertung von spatio-temporalen Temperaturfluktuationen.

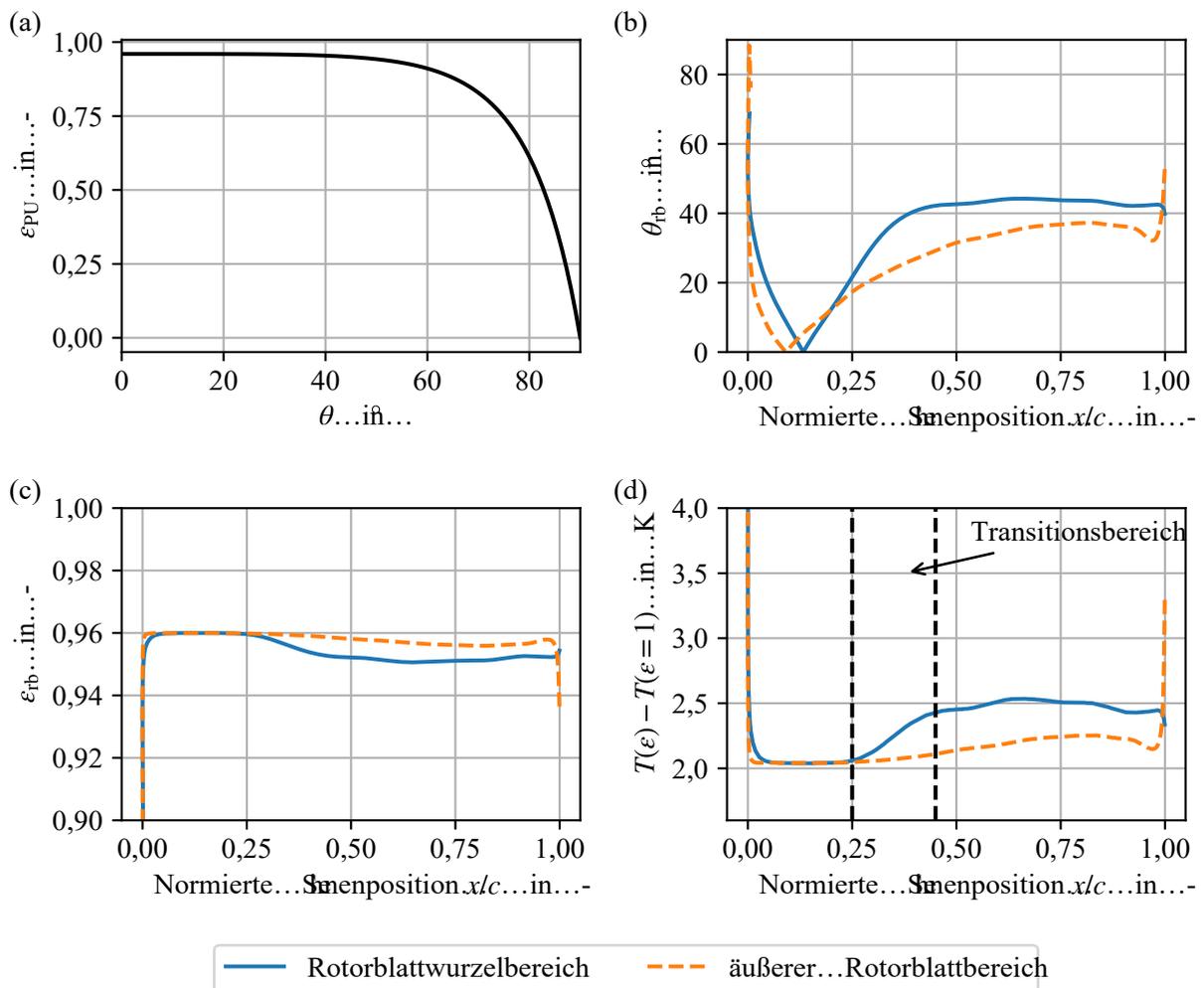


Abb. 2.15: Untersuchung des Einflusses räumlicher Unterschiede des gerichteten spektralen Emissionsgrades auf der Rotorblattoberfläche ϵ_{rb} auf die thermografische Strömungsvisualisierung für die Messanordnung der in dieser Arbeit vorgestellten Freifeldmessungen. (a) Gerichteter Emissionsgrad von Polyurethane ϵ_{rb} über den Winkelbereich von 0° bis 90° . (b) Abstrahlwinkel am Rotorblatt θ_{rb} über die Sehnenposition. (c)+(d) Berechneter gerichteter Emissionsgrad des Rotorblattes ϵ_{rb} sowie die durch räumlich veränderliche ϵ_{rb} verursachte Abweichungen der gemessenen Oberflächentemperatur über die Sehnenposition für ein Flügelprofil im Rotorblattwurzelbereich und im äußeren Rotorblattbereich.

2.2.2.3 Strahlungstransport

Aufgrund der bei Messungen an WEA vorherrschenden großen Messabstände (>100 m) zwischen dem Emitter und Empfänger muss die isolierte Betrachtung der Ausstrahlung des Rotorblattes hinsichtlich des Übertragungspfades erweitert werden. Darüber hinaus erfordert eine vollständige Betrachtung der detektierten Strahlungsflüsse die Berücksichtigung von Strahlungsanteilen aus der Messumgebung.

Bei der atmosphärischen Ausbreitung von Infrarotstrahlung führt insbesondere die Absorption an Wasserdampf (H_2O) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) zu einer von der Übertragungsstrecke abhängigen Minderung der übertragenen Strahlungsleistung [10]. In Abb. 2.16 ist der atmosphärische Transmissionsgrad τ_{atm} über die Wellenlänge λ für die Übertragungsstrecken $s = 10$ m und $s = 1000$ m dargestellt. Die Transmissionsgrade wurden von [24] unter Anwendung eines von [39] vorgestellten Modells für eine Luftfeuchtigkeit von 75 % und eine Umgebungstemperatur von 293,15 K berechnet. Die Wellenlängenbereiche mit hohen Transmissionsgraden bzw. geringen Absorptionsgraden werden atmosphärische Fenster genannt und sind grau hinterlegt. Zum einen ist anhand von Abb. 2.16 erkennbar, dass der Transmissionsgrad mit einer steigen-

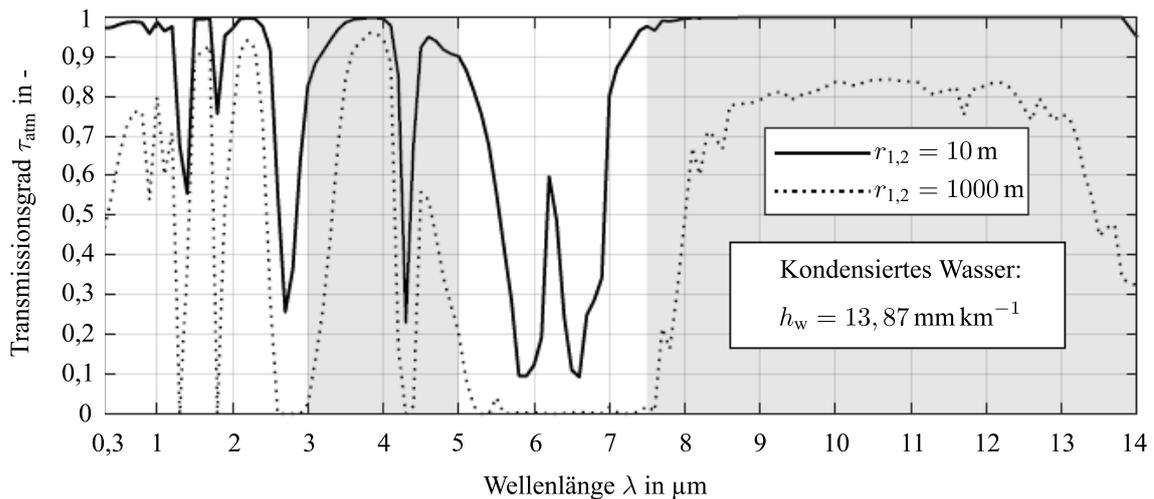


Abb. 2.16: Transmissionsgrad der Atmosphäre τ_{atm} in Abhängigkeit der Wellenlänge für zwei Übertragungsstrecken $r_{1,2}$. Die grau markierten Bereiche sind aufgrund des hohen Transmissionsgrads für IRT-Messungen gut geeignet und werden atmosphärische Fenster genannt. Berechnet nach einem atmosphärischen Modell von [39], nach [23].

den Übertragungsstrecke erwartungsgemäß abnimmt. Zum anderen zeigt der Vergleich der in Abschnitt 2.2.2.1 benannten infraroten Wellenlängenbereiche und des Verlaufes von τ_{atm} , dass bei einer Detektion im langwelligen Infrarotbereich ($7 \mu\text{m} - 14 \mu\text{m}$) die geringsten Strahlungsverluste in Folge atmosphärischer Absorption auftreten. Um das erreichbare SNR zu maximieren, sollte unter dem Gesichtspunkt der atmosphärischen Transmissionseigenschaften eine Detektion im langwelligen Infrarotspektrum angestrebt werden.

Nach [9] lässt sich die von der IR-Kamera detektierte Strahlungsleistung in folgende Beiträge aufteilen:

- Die vom Rotorblatt emittierte und durch die atmosphärische Absorption um den Faktor τ_{atm} gedämpfte Strahlungsleistung $\Phi_{\text{rb}} = \tau_{\text{atm}} \epsilon_{\text{rb}} \Phi_{\text{rb}}^{\text{s}}$.
- Die vom Rotorblatt reflektierte Strahlungsleistung der Messumgebung $\Phi_{\text{u}} = \tau_{\text{atm}} (1 - \epsilon_{\text{rb}}) \epsilon_{\text{u}} \Phi_{\text{u}}^{\text{s}}$. Die von der Messumgebung in Richtung des Rotorblattes emittierte Strahlungsleistung berechnet sich analog zu Φ_{rb} , wobei ϵ_{u} den Emissionsgrad der Umgebung bezeichnet. Der Anteil der vom Rotorblatt reflektierten und durch die Atmosphäre transmittierten Strahlung ergibt sich durch die Multiplikation von $\epsilon_{\text{u}} \Phi_{\text{u}}^{\text{s}}$ mit dem Reflexionsgrad des Rotorblattes $r_{\text{rb}} = 1 - \epsilon_{\text{rb}}$ und dem Transmissionsgrad der Atmosphäre τ_{atm} .
- Unter der Annahme vernachlässigbarer Strahlungsreflexionen in der Atmosphäre, berechnet sich die aus der Atmosphäre stammende Strahlungsleistung gemäß $\Phi_{\text{atm}} = (1 - \tau_{\text{atm}}) \Phi_{\text{atm}}^{\text{s}}$.

Die von einer IR-Kamera detektierte Gesamtstrahlungsleistung ergibt sich folglich zu

$$\Phi_{\text{detekt}} = \Phi_{\text{rb}} + \Phi_{\text{u}} + \Phi_{\text{atm}} = \tau_{\text{atm}} \epsilon_{\text{rb}} \Phi_{\text{rb}}^{\text{s}} + \tau_{\text{atm}} (1 - \epsilon_{\text{rb}}) \epsilon_{\text{u}} \Phi_{\text{u}}^{\text{s}} + (1 - \tau_{\text{atm}}) \Phi_{\text{atm}}^{\text{s}}. \quad (2.34)$$

Während der Anteil der atmosphärischen Strahlungsleistung üblicherweise vernachlässigt werden kann, ist der Umgang mit Strahlungsreflexionen an der Oberfläche des Messobjektes bei der Anwendung von IRT oft eine Herausforderung [107, 33]. Hinsichtlich der Anwendung von IRT an WEA gilt, dass insbesondere in Profildbereichen mit einer großen Krümmung, aufgrund veränderlicher Abstrahlwinkel bzw. Emissions- und Reflexionsgrade, Strahlungsreflexionen räumliche Gradienten der detektierten Strahlungsleistung verursachen können. Analog zur Betrachtung der räumlichen Verteilung des gerichteten Emissionsgrades am Rotorblatt in Abschnitt 2.2.2.2, ist der Einfluss von Strahlungsreflexionen bei der Detektion und Lokalisierung von Strömungsablösungen im Bereich der Hinterkante zu vernachlässigen.

2.2.2.4 Inverses Modell zur Temperaturberechnung

Die thermografisch ermittelte Oberflächentemperatur des Rotorblattes wird in dieser Arbeit mit T_{s} bezeichnet. Um einer Verwechslung mit der Temperatur eines schwarzen Strahlers vorzubeugen, ist die Rotorblatttemperatur im nachfolgenden Abschnitt mit T_{rb} benannt.

Für eine linear proportionale Abhängigkeit zwischen dem Ausgangssignal des IR-Detektors U_{detektor} und der detektierten Gesamtstrahlungsleistung Φ_{detekt} und unter der Annahme, dass sich die einzelnen Strahlungsanteile durch einer dem Planckschen Strahlungsgesetz (Gl. 2.27) angenäherten Funktion approximieren lassen, berechnet sich U_{detektor} zu [9, 61]

$$U_{\text{detektor}} = U_{\text{rb}} + U_{\text{u}} + U_{\text{atm}} \quad (2.35)$$

$$U_{\text{detektor}} = \tau_{\text{atm}} \epsilon_{\text{rb}} \frac{R}{e^{B/T_{\text{rb}}} - F} + \tau_{\text{atm}} (1 - \epsilon_{\text{rb}}) \epsilon_{\text{u}} \frac{R}{e^{B/T_{\text{u}}} - F} + (1 - \tau_{\text{atm}}) \frac{R}{e^{B/T_{\text{atm}}} - F}. \quad (2.36)$$

Hierbei bezeichnen B , F und R Kalibrierkonstanten. Die Temperatur bzw. Signalanteile des Rotorblattes, der Atmosphäre und Umgebung sind durch T_{rb} , T_{atm} und T_u bzw. U_{rb} , U_u und U_{atm} bezeichnet. Durch das Umstellen nach T_{rb}

$$T_{rb} = \frac{B}{\ln \left(\frac{\tau_{atm} \epsilon_{rb} R}{U_{detektor} - \tau_{atm} (1 - \epsilon_{rb}) \epsilon_u U_u - (1 - \tau_{atm}) U_{atm}} + F \right)}. \quad (2.37)$$

ergibt sich die inverse Modellfunktion zur Berechnung der Temperatur der Rotorblattoberfläche. Zur Berechnung der Temperatur der Rotorblattoberfläche werden in der vorliegenden Arbeit atmosphärische Strahlungsverluste vernachlässigt ($\tau_{atm} = 1$), und das Rotorblatt als schwarzer Strahler ($\epsilon_{rb} = 1$) betrachtet. Demnach vereinfacht sich Gl. 2.37 zu

$$T_{rb} = \frac{B}{\ln \left(\frac{R}{U_{detektor}} + F \right)}. \quad (2.38)$$

Bei der angestrebten thermografischen Detektion von Strömungsablösungen an WEA ist die Anwendung der vereinfachten inversen Modellfunktion zulässig, da

- bei der Unterscheidung verschiedener Strömungsbereiche räumliche Temperaturgradienten und keine absoluten Temperaturen ausgewertet werden,
- räumliche Gradienten von ϵ_{rb} im Bereich der Hinterkante vernachlässigt werden können (siehe Abschnitt 2.2.2.2),
- ϵ_{rb} und τ_{atm} Werte nahe eins aufweisen und die berechneten Temperaturen somit die richtige Größenordnung aufweisen.

2.2.2.5 Auswahl geeigneter Kamertechnik

Bei Detektoren für Wärmestrahlung im Infrarotbereich wird hinsichtlich des physikalischen Funktionsprinzips zwischen thermischen Detektoren und Photonendetektoren unterschieden. Bei thermischen Detektoren führt die absorbierte Wärmestrahlung zu einer Änderung der Temperatur und nachfolgend zu einer Änderung der elektrischen Eigenschaften des Detektors. Bei Photonendetektoren erfolgt eine direkte Interaktion zwischen den empfangenen Photonen und den Elektronen im Detektormaterial [9]. Im Ergebnis ist die Signalgröße thermischer Detektoren proportional zur gesamten absorbierten Strahlungsenergie, während sich die Signalgröße bei Photonendetektoren proportional zur Anzahl der absorbierten Photonen verhält [94]. Da Photonendetektoren eine schnellere Ansprechzeit, höhere Empfindlichkeit und ein geringeres Signalausrauschen als thermische Detektoren aufweisen, wird in dieser Arbeit eine IR-Kamera mit einem Photonendetektor verwendet [104, 80]. Im Detail wird für die thermografische Bildaufnahme eine IR-Kamera vom Typ IR8800 des Herstellers InfraTec mit einem aktiv gekühlten Detektor mit Photodioden verwendet. Dieser besteht aus der Halbleiterverbindung Quecksilber-Cadmium-Tellurid (engl. mercury cadmium telluride, MCT) und ist für Wellenlängen zwischen (7,7-10,2) μm empfindlich. Im Weiteren wird die Funktionsweise des Detektors erläutert und die Auswahl des Spektralbereiches des Detektors begründet.

Funktionsweise Photodetektor mit Photodioden

Bei der Absorption eines Photons werden in der Raumladungszone eines p-n-Übergangs einer Photodiode Elektronen-Defektelektronen-Paare gebildet. Aufgrund des inneren elektrischen Feldes in der Raumladungszone (RLZ) diffundieren die angeregten Elektronen in das n-Gebiet und die Defektelektronen in das p-Gebiet. Die resultierende Verschiebung der Kennlinie der Photodiode führt zu einem Photostrom oder Photospannung, welche proportional zur absorbierten Strahlungsleistung sind [11, 94]. Die beschriebene Umwandlung von Photonen in elektrische Energie wird als photovoltaischer Effekt bezeichnet.

Anhand des in Abb. 2.17 dargestellten Bändermodells eines p-n-Übergangs wird ersichtlich, dass bei der Ausbildung von Elektronen-Defektelektronen-Paaren das angeregte Elektron vom Valenzband in das energetisch höhere Leitungsband gehoben wird. Demnach muss die Energie des absorbierten Photons größer als die Energiedifferenz zwischen dem Valenz- und Leitungsband E_{diff} sein. Da aus Gl. 2.24 hervorgeht, dass die Energie eines Photons im langwelligen Infrarotbereich gering ist, besteht hinsichtlich des verwendeten Halbleitermaterials die Forderung einer geringen E_{diff} . Im Fall von MCT-Detektoren werden E_{diff} von 0,04 eV erreicht, womit Photonen mit Wellenlängen von bis zu 30 μm detektiert werden können [94]. Auf der anderen Seite genügen aufgrund der geringen E_{diff} bereits geringe Energieeinträge aus der Detektorumgebung, um Elektronen ins Leitungsband zu heben, und somit Dunkelströme zu induzieren. Zur Minimierung des so genannten Hintergrundstrahlungsrauschens, werden der Detektor sowie alle anderen optischen Komponenten und die Gehäusewände auf 77 K gekühlt. Über das Hintergrundstrahlungsrauschen hinaus sind Schrotrauschen, Generations/Rekombinationsrauschen und thermisches Rauschen die wichtigsten Rauschquellen bei einem Photonendetektor mit Photodiode [94].

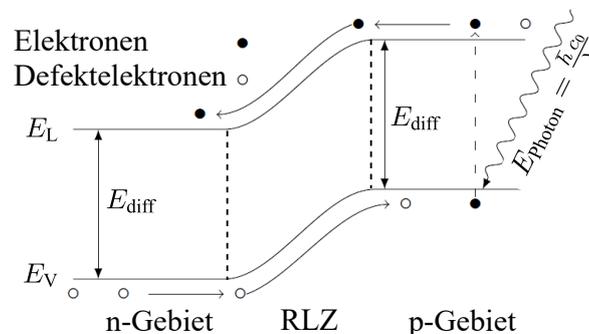


Abb. 2.17: Bändermodell eines beleuchteten p-n-Übergangs, nach [80, 23].

Um eine bildgebende Strahlungsmessung zu realisieren, werden die Detektorelemente in der Regel in einer Matrixstruktur angeordnet. High-End-Matrix-Bildsensoren (engl.: focal plane arrays, FPA) erreichen Megapixel-Auflösungen, Aufnahmefrequenzen von >100 Hz und ein thermisches Auflösungsvermögen von 20 μK [94].

Auswahl des Spektralbereiches

Für die thermografische Strömungsvisualisierung an Messobjekten werden aufgrund der Lage der atmosphärischen Fenster, siehe Abb. 2.16, standardmäßig Detektoren für das MIR und den LIR eingesetzt [9]. Aus der Betrachtung der atmosphärischen Absorption in Abschnitt 2.2.2.3 wurde bereits die Wahl eines LIR-Detektors motiviert. Im Detail wurde in der Arbeit von Gleichauf [44] die Eigenschaften von LIR und MIR-Detektoren für die Messaufgabe der thermografischen Strömungsvisualisierung an WEA verglichen. Unter der Annahme eines Temperaturbereiches von $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ wurden unter anderem folgende Vorteile für die Detektion im LIR ($6\text{ }\mu\text{m}$ – $15\text{ }\mu\text{m}$) gegenüber der Detektion im MIR ($3\text{ }\mu\text{m}$ – $6\text{ }\mu\text{m}$) ausgemacht und quantifiziert:

- Die spezifische Ausstrahlung M ist um den Faktor 15 erhöht. Somit erhöht sich das SNR. Bei gleichem SNR kann eine niedrigere Integrationszeit gewählt werden, wodurch Bewegungsunschärfe reduziert wird.
- Die Ableitung der spezifischen Ausstrahlung nach der Temperatur $\frac{dM}{dT}$ erhöht sich um den Faktor 8.
- Der Quereinfluss durch reflektierte solare Strahlung ist um den Faktor 0,12 kleiner.

Im Ergebnis ist eine IR-Kamera mit einem LIR-Detektor für die Messaufgabe der thermografischen Strömungsvisualisierung an WEA besser geeignet. Aus diesem Grund werden die experimentellen Untersuchungen mit einer langwelligen IR-Kamera durchgeführt.

2.2.3 Klassische Signalverarbeitung - Lösung des inversen Problems

Der klassische Signalverarbeitungsansatz bei der thermografischen Strömungsvisualisierung an WEA ist die Auswertung instantaner oder zeitlich gemittelter räumlicher Temperaturgradienten mittels einzelner Thermogramme bzw. zeitlich gemittelten Thermogrammen. In beiden Fällen werden die räumlichen Temperaturgradienten nur als Funktion des zeitunabhängigen mittleren Wärmeübergangskoeffizienten \bar{h} ausgewertet. Aufgrund des sprunghaften Anstieges von \bar{h} im Bereich der Transition besteht eine hohe Empfindlichkeit der räumlichen Temperaturgradienten gegenüber des Transitionsbereiches. Folglich ist der klassische Signalverarbeitungsansatz zur Lokalisierung der zeitlich gemittelten Transitionsposition gut geeignet und ein etabliertes Verfahren. Abb. 2.18 veranschaulicht die Unterscheidbarkeit laminarer und turbulenter Strömungsbereiche, inklusive rauheitsinduzierter Turbulenzkeile, anhand eines Thermogramms von einem Rotorblattabschnitt einer WEA.

Im Vergleich zur Transition ist die Empfindlichkeit des klassischen Signalverarbeitungsansatzes gegenüber Strömungsablösungen deutlich reduziert, da \bar{h} im Bereich der Ablösung nur geringe räumliche Gradienten aufweist. Darüber hinaus wurden bei der Analyse der thermischen Wirkmechanismen in Abschnitt 2.2.1 und der berührungslosen Temperaturmessung mittels IRT in Abschnitt 2.2.2 zahlreiche Quereinflüsse identifiziert, welche die räumlichen Temperaturgradienten beeinflussen. Aus der Analyse der Messkette geht zusammenfassend hervor, dass die Eignung des klassischen Signalverarbeitungsansatzes zur eindeutigen Detektion und Lokalisierung von Strömungsablösungen, d.h. physikalische Interpretierbarkeit der Temperaturverläufe

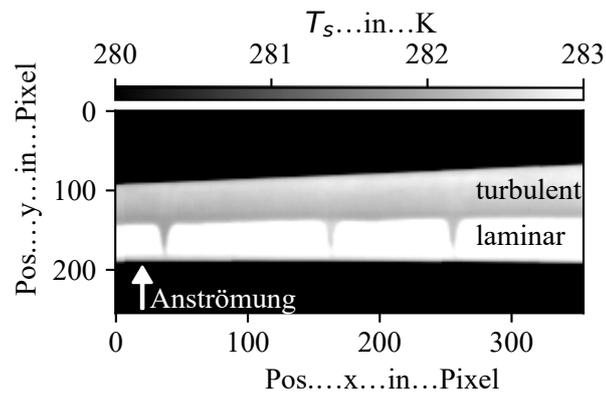


Abb. 2.18: Thermogramm eines Rotorblattabschnitts einer WEA. Laminare und turbulente Strömungsbereiche sind anhand des Bildkontrastes deutlich unterscheidbar.

und ein maximaler Kontrast zwischen angelegten und abgelösten Strömungsbereichen, durch folgende Quereinflüsse limitiert wird:

- Zeitlich veränderliche Anteile des Wärmeübergangskoeffizienten \tilde{h} und h' : thermische Ablösemerkmale, welche in den zeitlich veränderlichen Anteilen des Wärmeübergangskoeffizienten enthalten sind, werden nicht betrachtet und wirken als Quereinfluss.
- Kompressibilitätseffekte: für $T_s > T_{ad}$ und einer Abnahme von \bar{h} im Bereich des Ablösepunktes führt die reduzierte viskose Erwärmung im abgelösten Strömungsbereich zu einer Minderung des thermischen Kontrastes.
- Instationäre Wärmeleitung und anisotrope sowie inhomogene thermische Materialeigenschaften: laterale Wärmeleitung wirkt als örtlicher Tiefpassfilter auf strömungsinduzierte räumliche Temperaturgradienten und reduziert somit die Ausbildung thermischer Ablösesignaturen. Anisotrope und inhomogene Materialeigenschaften führen hingegen zur Ausbildung strömungsunabhängiger räumlicher Temperaturgradienten.
- Nicht-isotrope Emissionsgrade ϵ_{rb} , Reflexionsgrade r_{rb} und solare Absorptionsgrade a_{solar} : Nicht-isotrope ϵ_{rb} und r_{rb} führen zu räumlichen Gradienten der detektierten Strahlungsleistung und somit zu systematischen Abweichungen der berechneten Temperaturverteilung. Analog dazu resultieren strömungsunabhängige räumliche Temperaturgradienten aus nicht-isotropen solaren Strahlungseinträgen. Die genannten Effekte treten insbesondere im Bereich der Rotorblattvorderkante auf, während Strömungsablösungen in der Nähe der Rotorblatthinterkante erwartet werden. Dennoch limitieren nicht-isotrope ϵ_{rb} , r_{rb} und a_{solar} die physikalische Interpretierbarkeit der thermischen Wirkmechanismen bei der Betrachtung des gesamten Rotorblattes.

Zur Messung instationärer Strömungsablösung wird zusätzlich ein schnelles thermodynamisches Ansprechverhalten der Oberfläche benötigt. Jedoch führen die thermische Trägheit der Rotorblattoberfläche und die geringe Temperaturdifferenz zwischen der adiabaten Wandtemperatur und der Oberflächentemperatur zu einer geringen Sensitivität der messbaren Oberflächen-

temperatur gegenüber instationären Strömungsbedingungen. Im Ergebnis der genannten Quereinflüsse sowie der thermischen Trägheit der Oberfläche ist der klassische Signalverarbeitungsansatz nicht zur Realisierung einer eindeutigen Detektion und Lokalisierung von Strömungsablösungen geeignet. Folglich besteht die Notwendigkeit den klassischen Signalverarbeitungsansatz durch die Konzeption neuer Signalverarbeitungsansätze zu ergänzen.

2.3 Konzeption neuer Signalverarbeitungsansätze

Um eine eindeutige Detektion und Lokalisierung von stationären und instationären Strömungsablösungen an WEA mittels IRT zu realisieren, ist es das Ziel, Signalverarbeitungsansätze mit einer maximalen Empfindlichkeit hinsichtlich thermischer Ablösesignaturen zu konzipieren. Konkret wird eine physikalische Interpretierbarkeit der Signalverläufe zur eindeutigen Identifikation abgelöster Strömungsbereiche und insbesondere des Ablösepunktes, sowie eine maximale Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche anhand des Bildkontrasts gefordert. Darüber hinaus besteht bei der Detektion und Lokalisierung von instationärer Strömungsablösung die Anforderung, dass neben einer hohen räumlichen Auflösung eine hohe zeitliche Auflösung benötigt wird.

Um die Sensitivität des thermografischen Messansatzes bezüglich thermischer Ablösesignaturen zu erhöhen, ist die Auswertung von zeitlichen Temperaturänderungen mithilfe von Bildserien ein vielversprechender Ansatz. Hierbei besteht die Forschungshypothese, dass bei der Auswertung zeitlicher Temperaturfluktuationen der Einfluss mehrerer Quereinflüsse im Vergleich zum klassischen Signalverarbeitungsansatz reduziert ist. Erstens: Die Auswertung von Temperaturfluktuationen führt zu einem geringeren Einfluss von lateraler Wärmeleitung auf die räumliche Verteilung der Auswertegröße als bei der klassischen Auswertung von Thermogrammen. Dies ist dadurch begründet, dass die konvektive Wärmeübertragung, aufgrund der hohen Biot-Zahl, deutlich schneller abläuft als die konduktive Wärmeübertragung und bei der Auswertung von Temperaturfluktuationen kurze Ausgleichszeiten betrachtet werden. Zweitens: Der Quereinfluss anisotroper sowie inhomogener thermischen Materialeigenschaften wird reduziert, da die zeitlichen Temperaturänderungen bei kurzen Ausgleichszeiten fast ausschließlich im Randbereich des Rotorblattes auftreten. Thermodynamisch lässt sich das beschriebene Verhalten anhand der geringen vorliegenden Fourier-Zahlen Fo begründen. Drittens: Der reduzierter Einfluss lateraler Wärmeleitung führt bei der Auswertung zeitlicher Temperaturfluktuationen zu erhöhten räumlichen Amplituden und Frequenzen der Auswertegröße. Da die Änderung der Strahlungsintensität nach Gl. 2.28 in 4. Potenz von der Temperaturänderung abhängt, vom Emissionsgrad hingegen nur linear, ist der Einfluss nicht-isotroper Strahlungseigenschaften der Oberfläche bei der Auswertung von Temperaturfluktuationen in erster Näherung zu vernachlässigen. Auf Grundlage der genannten Vorüberlegungen wird bei der nachfolgenden Konzeption neuer Signalverarbeitungsansätze die Auswertung spatio-temporaler Temperaturfluktuationen verfolgt. Im Weiteren werden für die Erfassung stationärer und instationärer Strömungsablösungen separate Signalverarbeitungskonzepte entworfen.

2.3.1 Stationäre Strömungsablösung

2.3.1.1 UIC-Ansatz – thermodynamisches Antwortverhalten auf instationäre Anströmbedingungen

Der vorgestellte Signalverarbeitungsansatz zielt auf eine hohe physikalische Interpretierbarkeit der Signalverläufe zur merkmalsbasierten Identifikation abgelöster Strömungsbereiche ab. Um eine merkmalsbasierte Identifikation abgelöster Strömungsbereiche zu realisieren, werden zeitliche Fluktuationen der Oberflächentemperatur als thermische Antwort auf instationäre Anströmbedingungen (engl. unsteady inflow conditions, UIC-Ansatz) ausgewertet. Im Fall von instationären Anströmbedingungen besteht eine direkte Korrelation zwischen der Änderung der Oberflächentemperatur und dem zeitlich gemittelten \bar{h} sowie dem instationären Anteil \tilde{h} des Wärmeübergangskoeffizienten. Das spatio-temporale Verhalten der stationär-zufälligen Änderungen des Wärmeübergangskoeffizienten h' wird als zusätzlicher Einflussparameter für die Oberflächentemperaturantwort betrachtet.

Um das Antwortverhalten der Oberflächentemperatur auf instationäre Anströmbedingungen zu bewerten, wird die zeitliche Standardabweichung der Oberflächentemperatur $\sigma(T_{s,UIC})$ als Auswertegröße des UIC-Ansatzes berechnet. Die angestrebte eindeutige Identifikation unterschiedlicher Strömungsbereiche, hier mit dem Schwerpunkt der Detektion und Lokalisierung stationärer Strömungsablösung, basiert auf dem a-priori-Wissen aus Theorie und Experimenten über den unterschiedlichen qualitativen Verlauf der zeitlichen Standardabweichung der Oberflächentemperatur $\sigma(T_{s,UIC})$ in jedem Strömungsbereich. Bei den Experimenten in der vorliegenden Arbeit sind veränderliche Temperaturen der Anströmung sowie Änderungen der Wind- und Rotorgeschwindigkeit die Hauptursache für instationäre Anströmbedingungen. Nach Gl. 2.18 führen veränderliche Fluidtemperaturen zu einem veränderlichen konvektiven Wärmestrom und damit zu einer Änderung der Oberflächentemperatur. Daher ist die Oberflächentemperaturschwankung aufgrund veränderlicher Temperaturen der Anströmung proportional zum mittleren Wärmeübergangskoeffizienten \bar{h} .

Der zweite instationäre Effekt der veränderlichen Wind- und Rotorgeschwindigkeit führt zu veränderten Anströmgeschwindigkeiten u_{res} und Anstellwinkeln α , siehe Abb. 2.3. Mit einer Zunahme des Anstellwinkels verschiebt sich sowohl die Transition als auch die Ablöseposition in Richtung der Vorderkante [22, 36, 41]. Zudem führen die sich ändernden Anströmgeschwindigkeiten und Anstellwinkel zu veränderten Geschwindigkeitsprofilen entlang der Sehne bzw. Turbulenzintensitäten. Die Verschiebung der Grenzen zwischen den verschiedenen Strömungsbereichen, die nicht konstanten Strömungsgeschwindigkeiten und Turbulenzintensitäten bewirken ein instationäres Verhalten des Wärmeübergangskoeffizienten, ausgedrückt durch \tilde{h} , und es kommt zu einer Oberflächentemperaturänderung. Daher ist die zeitliche Oberflächentemperaturfluktuation, in Folge von Änderungen der Wind- und Rotorgeschwindigkeit, proportional zur zeitlichen Standardabweichung $\sigma(\tilde{h})$ des nicht-stationären Anteils des Wärmeübergangskoeffizienten. Infolgedessen führen instationäre Anströmbedingungen zu strömungsabhängigen und interpretierbaren Fluktuationen der Oberflächentemperatur, wodurch eine eindeutige Identifizierung der unterschiedlichen Strömungsbereiche ermöglicht wird.

Bei den betrachteten instationären Anströmbedingungen ist die resultierende Standardabweichung der Oberflächentemperatur $\sigma(T_{s,UIC})$ annähernd proportional zur Überlagerung von \bar{h} und $\sigma(\tilde{h})$. Unter Berücksichtigung des in Abschnitt 2.2.1 dargestellten qualitativen Verlaufs von \bar{h} und \tilde{h} , stehen die folgenden strömungsphysikalisch-erklärten Merkmale für die Auswertegröße $\sigma(T_{s,UIC})$ zur Verfügung, um die verschiedenen Strömungsbereiche in sequenzieller Reihenfolge zu identifizieren:

- laminaire Grenzschichtströmung: $\sigma(T_{s,UIC})$ nimmt kontinuierlich ab
- laminar-turbulenter Übergang: $\sigma(T_{s,UIC})$ hat ein globales Maximum
- turbulente Grenzschichtströmung: $\sigma(T_{s,UIC})$ nimmt kontinuierlich ab
- Bereich der Strömungsablösung: $\sigma(T_{s,UIC})$ hat ein lokales Maximum
- turbulente abgelöste Strömung: $\sigma(T_{s,UIC})$ nimmt zu.

Auf der Arbeit von Gardener et al. [34] basierend besteht darüber hinaus die These, dass das Merkmal einer Zunahme von $\sigma(T_{s,UIC})$ im abgelösten Strömungsbereich durch eine Zunahme der stationär zufälligen Änderung des Wärmeübergangskoeffizienten h' in Folge von großskaligen instationären Strömungsstrukturen verstärkt wird. Somit werden bei der Auswertung mit dem UIC-Ansatz alle im Wärmeübergangskoeffizienten enthaltenen spatio-temporalen Ablösemerkmale zur eindeutigen Identifikation von Strömungsablösung genutzt.

Im Vergleich zum klassischen Signalverarbeitungsansatz weist der UIC-Ansatz folglich eine höhere Empfindlichkeit hinsichtlich der thermischen Ablösemerkmale bei einer gleichzeitig reduzierten Empfindlichkeit hinsichtlich unerwünschter Quereinflüsse auf und ist ein vielversprechender Ansatz, um eine merkmalsbasierte und eindeutige Detektion und Lokalisierung stationärer Strömungsablösung zu realisieren. Ein maximaler Bildkontrast wird aufgrund des hier ausgewerteten Kleinsignalverhaltens des thermischen und strömungsmechanischen Systems hingegen nicht erreicht.

2.3.1.2 Hauptkomponentenanalyse

Mit dem Ziel die Unterscheidbarkeit angelegter und abgelöster Strömungsbereiche anhand des Bildkontrasts zu maximieren wird der Ansatz verfolgt, die spatio-temporale Varianz thermografischer Bildserien statistisch mittels einer Hauptkomponentenanalyse (engl. principal component analysis, PCA) auszuwerten. Die Motivation einer PCA besteht darin, die Dimensionalität einer Datenmatrix ohne Informationsverlust zu minimieren. Hierfür werden neue, unkorrelierte Variablen berechnet, indem auf eine beliebige Datenmatrix eine Singulärwertzerlegung angewendet wird. Die gebildeten Variablen werden als Hauptkomponenten bezeichnet (engl. principal components, PCs) und erklären mit absteigendem Anteil die in der Datenmatrix enthaltene Varianz [53]. Eine Dimensionsreduktion wird erreicht, indem die Datenmatrix auf die Hauptkomponenten reduziert wird, welche den größten Teil der Varianz abbilden. Für die angestrebte Detektion und Lokalisierung von Strömungsablösungen besteht die Hypothese, dass die gesamte

spatio-temporale Varianz thermischer Ablösesignaturen in einer Hauptkomponente (engl. principal component, PC) zusammengefasst, und somit bei der Auswertung der entsprechenden PC ein maximaler Kontrast zwischen angelegten und abgelösten Bereichen erreicht wird.

Im Bereich der Bildverarbeitung ist die PCA für viele verschiedene Anwendungen eine häufig verwendete Methode [14]. Eine Anwendung der PCA im Zusammenhang mit Thermographie an aktiv beheizten Oberflächen, ist die Detektion von Defektstellen in Materialstrukturen [70, 103, 106]. Für den Anwendungsbereich der thermografischen Strömungsvisualisierung an WEA konnten Gleichauf et al. [45] zeigen, dass die Anwendung einer PCA zu einem verbesserten Kontrast zwischen laminaren und turbulenten Strömungsbereichen führen kann. Wenn der Datensatz einer thermografischen Bildserie durch eine Matrix X der Dimension $n_{\text{Bilder}} \times m_{\text{Pixel}}$ beschrieben wird, ermöglicht eine Singulärwertzerlegung die Berechnung der PCs. Die Überführung der dreidimensionalen thermografischen Bildserie, bestehend aus den zwei Dimensionen der Ortskoordinate x, y und den diskreten Aufnahmezeitpunkten t der einzelnen Bilder, in die zweidimensionale Matrix X erfordert eine Dimensionsreduktion. Wie in Abb. 2.19 dargestellt, erfolgt eine Umformung der 2D-Thermogramme in einen 1D-Vektor, indem die Pixel der Bildspalten vertikal gestapelt werden. Die Singulärwertzerlegung der Matrix X mit dem Rang rg ist definiert als

$$X = ULA^T, \quad (2.39)$$

wobei U, A Matrizen der Dimension $n_{\text{Bilder}} \times rg$ bzw. $m_{\text{Pixel}} \times rg$ mit orthogonalen Spalten sind, während L eine $rg \times rg$ Diagonalmatrix ist [3]. Die Spalten von A werden als rechte Singulärvektoren von X bezeichnet und sind die Eigenvektoren der $X^T X$ -Matrix. Analog dazu werden die Spalten von U als linke Singulärvektoren von X bezeichnet und entsprechen den Eigenvektoren der XX^T -Matrix. Die Diagonalelemente der Matrix L enthalten die mit abnehmenden Betrag angeordneten positiven Eigenwerte der Matrizen $X^T X, XX^T$ und werden als Singulärwerte bezeichnet. Die PCs von X berechnen sich schließlich als die Spalten der Matrizenprodukte $XA = ULA^T A = UL$ und haben die Dimension $m_{\text{Pixel}} \times 1$. Die von den einzelnen PCs erklärte Varianz lässt sich durch die Division der quadrierten Singulärwerte mit $(m_{\text{Pixel}} - 1)$ ermitteln [53]. Abschließend werden die einzelnen PCs in eine bildliche Darstellung überführt, indem die Spaltenvektoren in eine 2D-Matrix der Dimension der Thermogramme rücktransformiert werden. Die Pixelintensitäten I entsprechen hierbei der Wichtung eines jeden Pixels bei der Berechnung der entsprechenden PC. Für den gewünschten Fall, dass durch eine PC die spatio-temporale Varianz thermischer Ablösesignaturen abbildet wird, werden im abgelösten Bereich also besonders hohe oder niedrige Pixelintensitäten erwartet.

Bei der Interpretation der PCs im Kontext der thermografischen Strömungsvisualisierung an WEA kommt zu Gute, dass nur eine geringe Anzahl a priori erklärbarer Bildmerkmale erwartet werden. Die zu erwartenden Bildmerkmale sind räumliche Intensitätsgradienten aufgrund:

- der laminar-turbulenten Transition,
- der räumlichen Dynamik der zeitlich veränderlichen Transitionsposition,

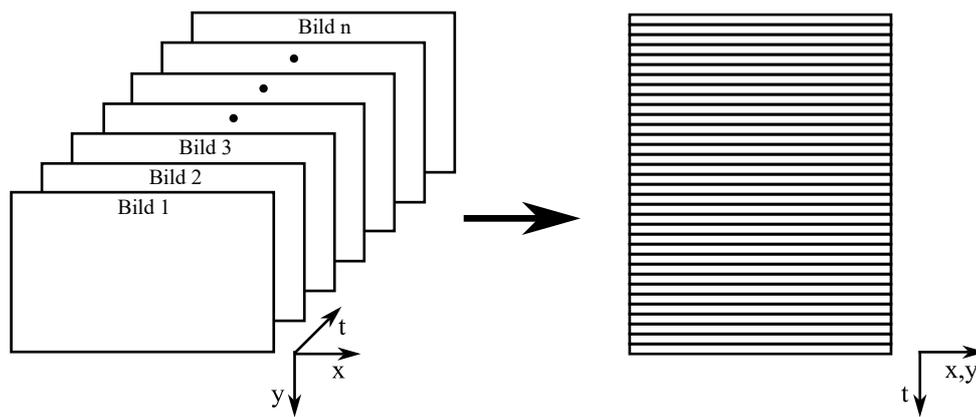


Abb. 2.19: Für die Anwendung der PCA wird die Bildserie mit n Bildern mit den Ortskoordinaten x, y in eine 2D-Matrix umgeformt, indem die Pixel der Bildspalten der einzelnen Thermogramme vertikal gestapelt werden. Die Singulärwertzerlegung wird anschließend auf die gebildete 2D-Matrix angewendet.

- durch Rauheiten induzierter Turbulenzkeile,
- abgelöster Strömungsbereiche.

Trotz der limitierten Anzahl der Bildmerkmale bestehen bei der Interpretation der PCs umfassende Einschränkungen. Die ermittelten PCs resultieren aus der Struktur der Kovarianz der Datenmatrix und korrelieren nicht zwangsläufig mit den untersuchten Strömungsphänomenen. Weiterhin können sich die Merkmale eines gesuchten Strömungsphänomens, über mehrere PCs verteilen oder aber eine PC mehrere Strömungsphänomene abbilden [28]. Somit ist eine PCA nicht zur eindeutigen Detektion von Strömungsablösungen geeignet. Stattdessen setzt die zweckmäßige Anwendung einer PCA eine initiale Detektion von Strömungsablösungen anhand physikalisch eindeutig interpretierbarer Bildmerkmale voraus. Aus diesem Grund wird die Kombination des UIC-Ansatzes und einer PCA verfolgt.

2.3.2 Instationäre Strömungsablösung

Gemäß der Definition instationärer Strömungsablösung in Abschnitt 2.1.3 wird instationäre Strömungsablösung an WEA durch instationäre Anströmbedingungen in Folge von z. B.:

- dem Turmdurchgang des Rotorblattes,
- einer fehlerhaften Ausrichtung der Rotorebene,
- atmosphärischen Turbulenzen (Böen),

induziert. Die Untersuchungen in dieser Arbeit beschränken sich auf das Auftreten von instationären Strömungsablösungen in Folge von Böen.

Während des Auftretens von Böen steigt die Windgeschwindigkeit und damit die Anströmgeschwindigkeit sowie der Anstellwinkel. Unter der Annahme einer konstanten Rotordrehzahl

berechnet sich die Änderung der effektiven Anströmgeschwindigkeit Δu_{res} sowie die Änderung des Anstellwinkels $\Delta\alpha$ gemäß

$$\Delta u_{\text{res}} = \sqrt{((u_w + \Delta u_w)(1 - a_{\text{ax}}))^2 + ((\Omega r)(1 + a_{\text{tan}}))^2} - u_{\text{res},0}, \quad (2.40)$$

$$\Delta\alpha(r) = \arctan\left(\frac{1 - a_{\text{ax}}}{1 + a_{\text{tan}}}\frac{u_w + \Delta u_w}{\Omega r}\right) - \theta - \alpha_0, \quad (2.41)$$

wobei $u_{\text{res},0}$ die initiale effektive Anströmgeschwindigkeit und α_0 den initialen Anstellwinkel bezeichnen. Wenn sich die Windgeschwindigkeit ausreichend ändert, überschreitet der Anstellwinkel den stationären Ablöswinkel, was zu einer Strömungsablösung an der Hinterkante führt, vgl. Abb. 2.3 und Abb. 2.4. Zudem verschiebt sich die Transition in Richtung der Vorderkante. Die räumliche Verschiebung der Grenzen der verschiedenen Strömungsbereiche und die nicht konstanten Strömungsgeschwindigkeiten führen zu einem instationären Verhalten der adiabaten Wandtemperatur T_{ad} und des nicht stationären Anteils des Wärmeübergangskoeffizienten \tilde{h} , sodass eine Änderung der Oberflächentemperatur auftritt.

Um eine IRT-basierte Detektion und Lokalisierung instationärer Strömungsablösungen mit einer hohen spatio-temporalen Auflösung zu realisieren, wird ein zweistufiger Signalverarbeitungsansatz vorgeschlagen. In Abb. 2.20 ist ein exemplarischen Verlauf der Änderung der Oberflächentemperatur ΔT_s für einen Bereich mit instationärer Strömungsablösung sowie die korrespondierende Änderung des Anstellwinkels $\Delta\alpha$ über die Zeit aufgetragen. Zur Veranschaulichung der sequentiellen Abfolge der Signalverarbeitungsansätze sind zusätzlich die zeitlichen Auswertefenster der Auswertemethoden eingezeichnet.

Das Ziel des ersten Schrittes ist die Identifizierung von Zeitschritten mit potenziellen instationären Strömungsablösungen (σ DIT-Ansatz), während der zweite Schritt die zeit- und ortsaufgelöste Detektion von instationären Strömungsablösungen (DIT-Ansatz und PCA) zum Ziel hat. Analog zur Signalverarbeitung für die Detektion von stationärer Strömungsablösung beinhaltet der zweite Signalverarbeitungsschritt eine Kombination aus einer eindeutigen Detektion und Lokalisierung von Strömungsablösungen anhand physikalisch interpretierbarer Bildmerkmale, wofür Differenzbilder ausgewertet werden, und der Maximierung des Bildkontrasts durch die Anwendung einer PCA.

2.3.2.1 σ DIT-Ansatz

Der erste Schritt der Signalverarbeitung zur Detektion und Lokalisierung instationärer Strömungsablösungen basiert auf der Auswertung der räumlichen Standardabweichung von zeitlichen Differenzbildern (σ DIT-Ansatz). Die Differenzbilder ΔT_s werden durch eine Subtraktion von zeitlich aufeinanderfolgenden Bildern einer thermografischen Bildserie $T_s(\vec{x}, t)$ mit den Bildkoordinaten \vec{x} zum Zeitschritt t berechnet, mit

$$\Delta T_s(\vec{x}, t) = T_s(\vec{x}, t + 1) - T_s(\vec{x}, t). \quad (2.42)$$

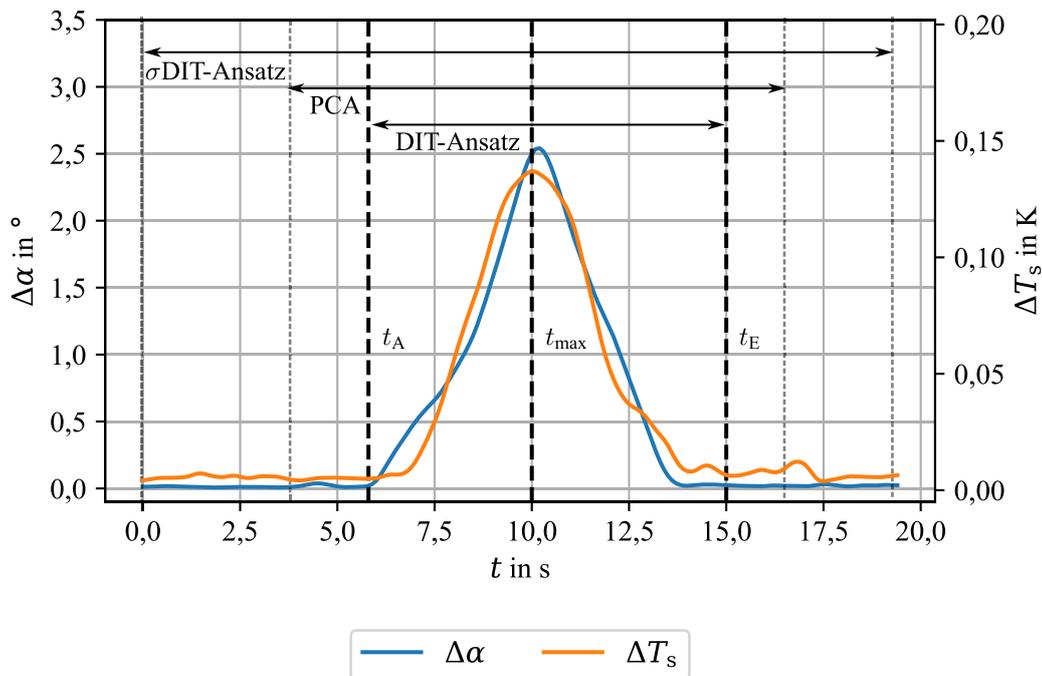


Abb. 2.20: Änderung der Oberflächentemperatur ΔT_s und des Anstellwinkels $\Delta\alpha$ über die Zeit für ein Windkanalexperiment mit instationärer Strömungsablösung. Die eingezeichneten Zeitpunkte sind wie folgt definiert: t_A : potentieller Ablösebeginn aufgrund des Einsetzens einer Anstellwinkeländerung, t_{max} : maximale Strömungsablösung bzw. Beginn des Wiederanlegens, t_E : Ende des Wiederanlegens.

Die räumliche Standardabweichung $\sigma(\Delta T_s)$ jedes Differenzbildes ist die Auswertegröße. Im Gegensatz zur Einführung des σ DIT-Ansatzes durch [34] zielt die Auswertung auf das räumlich unterschiedliche Antwortverhalten der Oberflächentemperatur bei instationären Anströmbedingungen und nicht auf stationäre zufällige Strömungsstrukturen in abgelösten Strömungsgebieten. Im Ergebnis sind Zeitbereiche mit instationären Anströmbedingungen anhand von Maxima der räumlichen Standardabweichung $\sigma(\Delta T_s)$ identifizierbar.

2.3.2.2 DIT-Ansatz

Die Auswertung von Differenzbildern (DIT-Ansatz) ist für die thermografische Analyse zeitlich veränderlicher Transitionspositionen etabliert [107]. Hier zielt die Anwendung des DIT-Ansatzes darauf ab, instationäre Strömungsablösung anhand physikalisch interpretierbarer Merkmale zu detektieren und die Ablöseposition mit der maximalen zeitlichen Auflösung zu lokalisieren. Dafür wird das transiente thermische Antwortverhaltens während des Auftretens einer Böe ausgewertet (zwischen t_A und t_E , vgl. Abb. 2.20). Zur Ableitung charakteristischer thermischer Ablösemerkmale bei der Anwendung des DIT-Ansatzes wird eine Analyse des thermischen Antwortverhaltens während einer Böe benötigt. Dazu wird mit Hilfe der theoretischen Analyse der konvektiven Wärmeübertragungsmechanismen aus Abschnitt 2.2.1 eine differenzierte Analyse der Einflüsse der adiabaten Wandtemperatur T_{ad} und des instationären Teils \tilde{h} des Wärmeübergangskoeffizienten durchgeführt.

Zunächst wird der Einfluss der adiabaten Wandtemperatur auf das Antwortverhalten der Oberflächentemperatur bei einer Böe betrachtet. Im Falle einer Böe steigt die adiabate Wandtemperatur mit der Änderung der effektiven Anströmgeschwindigkeit u_{res} . Nach experimentellen Untersuchungen zur viskosen Erwärmung in abgelösten Strömungsbereichen wird angenommen, dass die adiabate Wandtemperatur in abgelösten Strömungsbereichen aufgrund des geringeren Recovery-Faktors [7, 18] einen geringeren Anstieg aufweist als in angelegten Strömungsbereichen. Infolgedessen sind abgelöste Strömungsbereiche während einer Böe durch einen geringeren zeitlichen Temperaturgradienten im Vergleich zu angelegten Strömungsbereichen erkennbar.

Anschließend wird eine idealisierte Betrachtung des instationären Anteils \tilde{h} des Wärmeübergangskoeffizienten während einer Böe durchgeführt. Wie in Abb. 2.10a dargestellt, nimmt \bar{h} im Bereich der Transition sprunghaft zu. Als Folge des nicht-monotonen Verhaltens von \bar{h} im Bereich der Transition und der räumlichen Verschiebung der Transitionsposition zur Vorderkante ergibt sich im Bereich der Transitionsverschiebung ein Maximum des nicht-stationären Teils \tilde{h} des Wärmeübergangskoeffizienten, was zu einer verstärkten konvektiven Abkühlung führt. Für die typischen Messbedingungen an Windkraftanlagen mit $T_w > T_{\text{ad}}$ wird daher, verglichen mit dem Rest des Profils, ein Minimum des zeitlichen Temperaturgradienten im Bereich der Transitionsverschiebung erwartet. Im Bereich des Ablösepunktes wird in Folge der Abnahme von \bar{h} ein Minimum von \tilde{h} erwartet, siehe Abb. 2.10b, wodurch die konvektive Kühlung abnimmt und ein maximaler zeitlicher Temperaturgradient resultiert. Im abgelösten Strömungsbereich nimmt \tilde{h} in Strömungsrichtung hingegen zu, weshalb bis zur Hinterkante eine Abnahme des zeitlichen Temperaturgradienten erwartet wird.

Zusammenfassend stehen bei der Auswertung des transienten thermischen Antwortverhaltens auf Böen folgende thermische Merkmale zur Verfügung, um den Bereich der laminar-turbulenten Transition und der instationären Strömungsablösung zu identifizieren:

- Bereich der laminar-turbulenten Transition: Minimum des zeitlichen Temperaturgradienten, verursacht durch eine zunehmende konvektive Abkühlung.
- Ablösepunkt: Maximum des zeitlichen Temperaturgradienten, aufgrund abnehmender konvektiver Kühlung.
- Abgelöster Strömungsbereich: der zeitliche Temperaturgradient nimmt aufgrund des Einflusses der adiabaten Erwärmung und der Zunahme der konvektiven Kühlung zur Hinterkante hin ab.

Die daraus resultierende Forschungshypothese ist, dass die Auswertung dieser thermischen Merkmale die zeitaufgelöste Detektion und Lokalisierung von instationären Strömungsablösungen ermöglicht.

Eine Limitierung des DIT-Ansatzes ist das niedrige SNR in Folge des geringen Temperaturunterschieds zwischen zwei Bildern. Aufgrund des geringen SNR kann eine räumliche Mittelung über mehrere Pixel erforderlich sein, wodurch sich die räumliche Auflösung verringert. Im Ergebnis hat der DIT-Ansatz das Potential eine merkmalsbasierte Detektion und Lokalisierung

instationärer Strömungsablösungen mit der messsystemseitig maximalen zeitlichen Auflösung zu ermöglichen, wohingegen bei der Lokalisierung der Ablöseposition die räumliche Auflösung durch das niedrige SNR begrenzt ist.

2.3.2.3 PCA

Analog zu dem kombinierten Signalverarbeitungsansatz bei der Erfassung stationärer Strömungsablösung wird bei der Messung instationärer Strömungsablösungen der physikalisch interpretierbare DIT-Ansatz durch die Anwendung einer PCA ergänzt. Da das Auftreten von instationären Strömungsablösungen durch spatio-temporale Temperaturfluktuationen gekennzeichnet ist, wird erwartet, dass die spatio-temporale Auswertung von IR-Bildserien mit einer PCA geeignet ist, thermische Ablösungssignaturen zu extrahieren. Nach der Bildverarbeitung mittels PCA wird durch Auswertung der räumlichen Intensitäten $I(\vec{x})$ von ausgewählten PCs eine Kontraststeigerung zwischen angelegten und abgelösten Strömungsbereichen erreicht. Im Vergleich zum DIT-Ansatz führt die Anwendung einer PCA zu einer höheren räumlichen Auflösung bei der Lokalisierung der instationären Strömungsablösung, da der Kontrast zwischen verschiedenen Strömungsbereichen verbessert wird. Da die PCA jedoch eine Bildserie verarbeitet, wird die zeitliche Auflösung limitiert. Demzufolge scheint die Kombination des DIT-Ansatzes mit einer PCA-basierten Auswertung vielversprechend, um eine IRT-basierte Detektion und Lokalisierung von instationären Strömungsablösungen an Rotorblättern von WEA mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung zu erreichen.

3 Experimentelles Setup

In diesem Kapitel wird der Messaufbau und Versuchsplan der in dieser Arbeit vorgestellten Experimente vorgestellt, sowie die an die Experimente anschließende Bildverarbeitung dokumentiert. Die Planung der realisierten Experimente richtet sich nach den Anforderungen zur Anwendung der zuvor konzipierten Signalverarbeitungskonzepte. Darüber hinaus finden die in Kapitel 2 benannten Anforderungen an den Messaufbau und das Messsystem Beachtung. In Abschnitt 3.1 erfolgt zunächst eine Beschreibung der durchgeführten Windkanaluntersuchungen. Diese haben die Verifizierung und Charakterisierung des Signalverarbeitungsansatzes zur Detektion und Lokalisierung stationärer Strömungsablösung zum Ziel. Anschließend werden in Abschnitt 3.2 die durchgeführten Freifeldmessungen zur Erfassung stationärer und instationärer Strömungsablösungen an einer in Betrieb befindlichen WEA vorgestellt. Abschließend wird in Abschnitt 3.3 die Softwareimplementierung der Datenvorverarbeitung und der verschiedenen Signalverarbeitungsansätze dokumentiert. Abschnitt 3.3 schließt mit der Definition von Auswertekriterien für die weiterführende Bewertung der thermografischen Detektier- und Lokalisierbarkeit von stationären und instationären Strömungsablösungen bei der Anwendung der konzipierten Signalverarbeitungskonzepte.

3.1 Windkanalexperimente

Um den konzipierten Signalverarbeitungsansatz zur Detektion und Lokalisierung stationärer Strömungsablösung zu verifizieren und zu charakterisieren werden Messungen unter Laborbedingungen im Windkanal durchgeführt. Die in dieser Arbeit vorgestellten Windkanalexperimente wurden im Windkanal der Deutschen WindGuard Engineering GmbH in Bremerhaven, Deutschland, durchgeführt. Die Auswahl der Versuchsbedingungen zielt auf eine hohe Ähnlichkeit zwischen den Windkanalexperimenten und den Messbedingungen an realen WEA ab. So wird bei den vorgestellten Windkanalmessungen die Reynolds-Ähnlichkeit weitgehend eingehalten, Profilschnitte von Rotorblättern von WEA als 2D-Flügelprofile verwendet, und auf eine aktive Erwärmung der Oberfläche der Flügelprofile verzichtet. Ungeachtet dessen ist eine vollständige Skalierung der Messbedingungen an realen Anlagen auf einen Labormaßstab technologisch kaum umsetzbar, sodass die vorgestellten Windkanalexperimente hinsichtlich von Parametern wie der atmosphärischen Turbulenz oder der Verwendung eines 2D-Flügelprofils eine signifikante Vereinfachung im Vergleich zu Freifeldexperimenten darstellen. Somit beschränkt sich die Zielsetzung der Untersuchungen darauf, den kombinierten Signalverarbeitungsansatz zur Erfassung stationärer Strömungsablösung zu verifizieren und zu charakterisieren, nicht aber eine direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die anschließenden Freifeldmessungen zu reali-

sieren. Im Weiteren wird der verwendete Messaufbau sowie die Konzeption und Durchführung der Experimente erläutert.

3.1.1 Messaufbau

Der Windkanal ist Göttinger Bauart und ermöglicht innerhalb einer geschlossenen Messstrecke laminare Strömungsbedingungen mit Turbulenzintensitäten von weniger als 0,3 % bei Windgeschwindigkeiten von bis zu 100 ms^{-1} . Für 2D-Flügelprofile mit einer Sehnenlänge von maximal $c = 0,9 \text{ m}$ werden sehnenbasierte Reynolds-Zahlen von bis zu $6 \cdot 10^6$ erreicht. Abb. 3.1 und Abb. 3.1 veranschaulichen den Grundriss des Windkanals sowie die Messanordnung innerhalb der Messstrecke. Die Messobjekte sind in vertikaler Ausrichtung an zwei Drehtellern am Boden und in der Decke der Messstrecke drehbar gelagert, wodurch der Anstellwinkel der Flügelprofile stufenlos mit einer Unsicherheit von $0,05^\circ$ eingestellt werden kann. Die am Eingang der Messstrecke angebrachten beweglichen Strömungsleitbleche (engl. dynamic flow deflectors, DFD) ermöglichen zeitlich veränderliche Anströmwinkel bei einer statischen geometrischen Ausrichtung zwischen dem Messobjekt und der IR-Kamera. Für IR-Strahlung durchlässige Fenster aus Kalziumfluorid (CaF_2) befinden sich an den Seiten der Messstrecke und dienen als optischer Zugang für Messungen mit IR-Kameras. Die für die IRT-Messungen erforderliche Temperaturdifferenz zwischen dem Messobjekt und der Anströmung beruht einzig auf einer zeitlich ansteigenden Strömungstemperatur in Folge von Wärmeeinträgen durch die Ventilatoren und Reibung an der Kanalinnenwand. Für die Windkanalexperimente wurde ein WEA-Flügelprofil vom Typ DU 00-W2-401

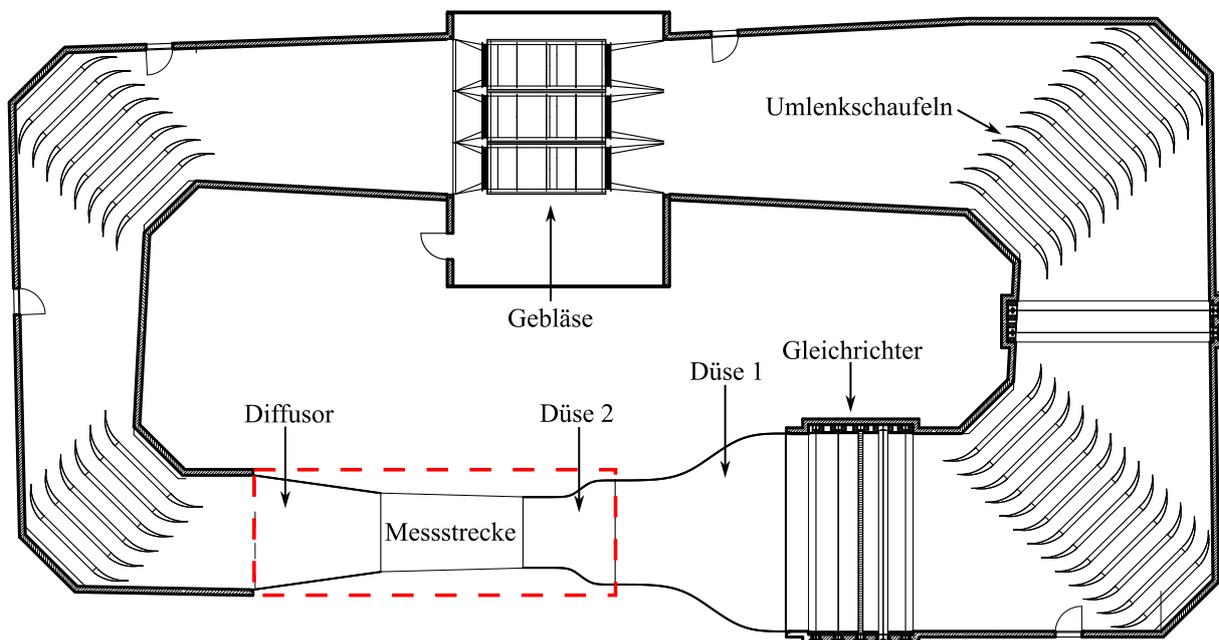


Abb. 3.1: Grundriss des Windkanals der Deutschen WindGuard Engineering GmbH in Bremerhaven. Eine Detailansicht der rot umrandeten Messstrecke befindet sich in Abb. 3.2.

ausgewählt. Das DU 00-W2-401-Profil mit einer Sehnenlänge von 500 mm ist für den Rotorblattwurzelbereich von WEA ausgelegt und eignet sich somit für die Untersuchung stationärer Strömungsablösungen [56]. Abb. 3.3 zeigt die Profilform des DU 00-W2-401-Profil im Vergleich zu

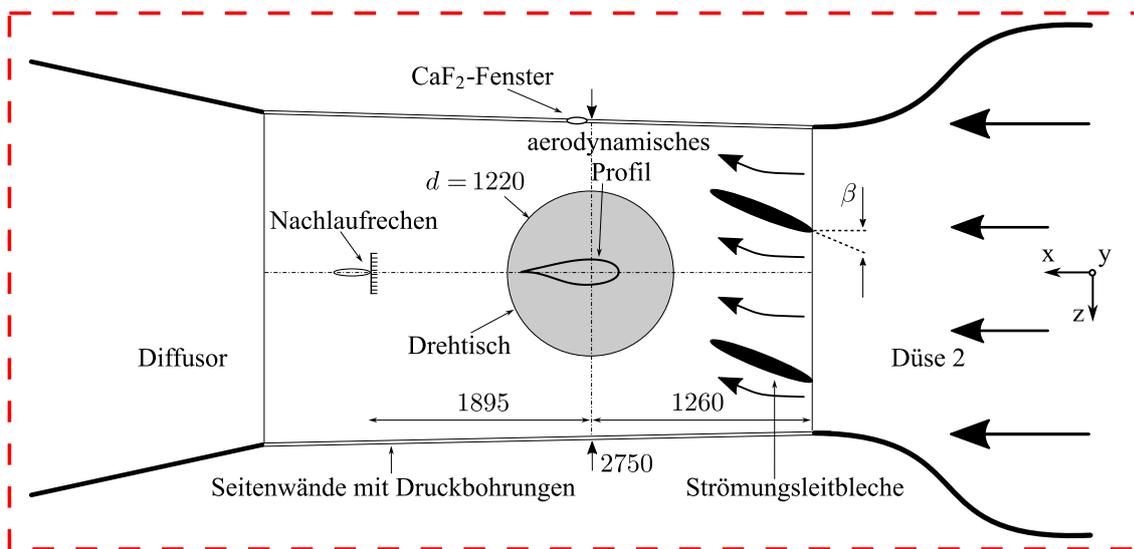


Abb. 3.2: Schematische Übersicht des Aufbaus der Messstrecke in der Draufsicht. Die Höhe der Messstrecke beträgt 1250 mm.

einem, in der Windenergieforschung weit verbreiteten und für den äußeren Rotorblattbereich ausgelegten, DU 96-W-180-Profil [92, 74]. Das verwendete Windkanalmodell besteht aus GFRP mit einer PU-basierten Lackschicht und ähnelt somit dem Aufbau realer Rotorblätter.

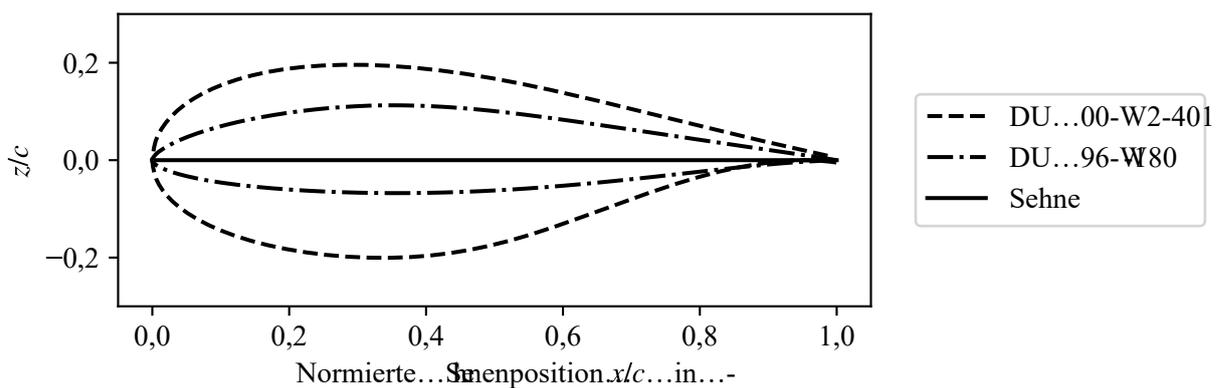


Abb. 3.3: Vergleich der Profilformen des vermessenen DU 00-W2-401-Profiles mit einem für den äußeren Rotorblattbereich ausgelegten DU 96-W-180-Profil. Verglichen mit dem aerodynamisch optimierten DU 96-W-180-Profil weist das DU 00-W2-401-Profil eine etwa doppelte maximale Profildicke auf und ist somit anfällig für das Auftreten von stationären Strömungsablösungen.

Als Referenzmesstechnik zur Detektion und Lokalisierung von Strömungsablösungen sind an der Druck- und Saugseite des Windkanalmodells über die Sehnenlänge verteilte Druckbohrungen eingelassen und an insgesamt 110 Piezo-Drucksensoren angeschlossen, welche laut Herstellerangaben eine Unsicherheit von 2 mbar aufweisen. Um einen Einfluss der Druckbohrungen auf die Grenzschichtströmung und die nachfolgenden Druckmessungen zu vermeiden, sind die Druckbohrungen in Strömungsrichtung versetzt angeordnet. Weiterhin ermöglichen eine 6-Komponenten-Kraftwaage am unteren Drehtisch, eine 2-Komponenten-Kraftwaage am oberen Drehtisch, jeweils 32 Druckbohrungen in den Seitenwänden der Messstrecke sowie ein Nach-

laufrechen mit 52 Gesamtdrucksensoren und 11 statischen Drucksensoren die Erfassung der Auftriebs- und Widerstandskräfte. Die Messung der Freistrahlgeschwindigkeit erfolgt mit Hilfe von Pitot-Rohren auf Höhe des Drehtellers mit einer Unsicherheit von $0,3 \text{ ms}^{-1}$.

Für die thermografische Bildaufnahme wird eine IR-Kamera vom Typ IR8800 des Herstellers InfraTec mit einem aktiv gekühlten Detektor und einer Pixelauflösung von $640 \times 512 \text{ px}^2$ mit einem 25 mm Normalobjektiv eingesetzt. Gemäß der Vorbetrachtungen in Abschnitt 2.2.2.5 wird ein für den LWIR-Bereich, konkret für Wellenlängen zwischen $(7,7-10,2) \mu\text{m}$, empfindlicher Detektor ausgewählt. Die Kamera weist eine rauschäquivalente Temperaturdifferenz von weniger als 25 mK bei $30 \text{ }^\circ\text{C}$ auf. Die Abmaße des Bildfelds sowie die resultierende Pixelauflösung sind in Tab. 3.1 zusammengefasst. Während perspektivische Verzerrungen vernachlässigt werden, werden optische Verzeichnungen unter Anwendung von Zhangs geometrische Kalibrierungsmethode korrigiert [110]. Somit wird vereinfachend angenommen, dass die Pixel der Oberfläche des Windkanalmodells linear zugeordnet sind.

Tab. 3.1: Abmaße des Bildfelds und resultierende Pixelauflösung bei der thermografischen Bildaufnahme im Windkanal.

Parameter	Wert
Bildfeld	$0,54 \times 0,43 \text{ m}^2$
Pixelauflösung	$0,84 \times 0,84 \text{ mm}^2$

3.1.2 Versuchsplanung

Bei der Analyse des kombinierten Signalverarbeitungsansatzes zur Detektion und Lokalisierung von stationärer Strömungsablösung wird zwischen zwei Testfällen unterschieden. Im ersten Testfall erfolgt eine isolierte Betrachtung des thermischen Antwortverhaltens auf fluktuierende Anströmtemperaturen bei einem stationären Anstellwinkel. In diesem Fall bleiben die Grenzen der unterschiedlichen Strömungsbereiche konstant und das thermische Antwortverhalten ist primär von der räumlichen Verteilung des zeitlich gemittelten Wärmeübergangskoeffizienten \bar{h} abhängig. Im zweiten Testfall wird das thermische Antwortverhalten auf instationären Anströmbedingungen an WEA mittels zusätzlicher dynamischen Änderungen des Anstellwinkels nachgebildet. Hierbei wird von einem dominanten Einfluss des instationären Anteils des Wärmeübergangskoeffizienten \tilde{h} auf das thermische Antwortverhalten ausgegangen. Somit wird durch die beiden Testfälle die Eignung des UIC-Ansatzes für eine physikalisch interpretierbare Identifikation der verschiedenen Strömungsbereiche bei einer näherungsweise isolierten Betrachtung der konvektiven Wärmeübertragungsmechanismen geprüft. Um zusätzlich die Sensitivität des UIC-Ansatzes für eine eindeutige Detektion von Strömungsablösungen zu überprüfen wird in beiden Testfällen zwischen einem Experiment mit und einem Experiment ohne Strömungsablösung unterschieden. Beispielsweise wird dafür im zweiten Testfall der stationäre Anstellwinkel $\bar{\alpha}$ von 12° im ersten Experiment auf -2° im zweiten Experiment reduziert. Da die Anwendung der PCA eine Kontraststeigerung zwischen verschiedenen Strömungsbereichen, jedoch keine eindeutige physikalische Interpretierbarkeit der verarbeiteten Thermogramme zum Ziel hat, findet die PCA nur im zweiten Testfall bei dem Experiment mit Strömungsablösung Anwendung.

Instationäre Anstellwinkel werden im zweiten Testfall durch die Bewegung der DFD mit einer Amplitude β von 15° bei einer Frequenz von $0,5\text{ Hz}$ nachgebildet. Dabei ist zu beachten, dass die DFD zu einer leicht erhöhten Turbulenzintensität innerhalb der Teststrecke führen. Die Amplitude der DFD ist nicht gleich der resultierenden Änderung des Anstellwinkels α' , stattdessen wurde anhand der Analyse der Profilpolare die folgende empirische Näherung bestimmt:

$$\alpha = \bar{\alpha} \pm \alpha' \approx \bar{\alpha} \pm 0,1 \cdot \beta. \quad (3.1)$$

Die stationären und dynamischen Anstellwinkel beider Testfälle sowie der jeweiligen Experimente sind zusammen mit den resultierenden Strömungseigenschaften in Tab. 3.2 aufgeführt. In Tab. 3.3 sind die für beide Testfälle gültigen Versuchsparameter zusammengefasst.

Tab. 3.2: Übersicht der vorgestellten Testfälle und Experimente.

Testfall	Experiment	$\bar{\alpha}$	α'	Strömungseigenschaft
1. Testfall	1. Exp.	12°	$\pm 0^\circ$	abgelöst
	2. Exp.	-2°	$\pm 0^\circ$	vollständig angelegt
2. Testfall	1. Exp	12°	$\pm 1,5^\circ$	abgelöst
	2. Exp	-2°	$\pm 1,5^\circ$	vollständig angelegt

Bei den vorgestellten Experimenten wird die Strömungsgeschwindigkeit mit 58 ms^{-1} so gewählt, dass für das verwendete DU 00-W2-401-Profil als Arbeitspunkt eine Re_c von $2 \cdot 10^6$ resultiert, wodurch die Reynolds-Ähnlichkeit zu realen Anlagen näherungsweise eingehalten wird [40]. Für eine Re_c von $2 \cdot 10^6$ beträgt die Aufheizrate des Windkanals etwa $0,01\text{ Kmin}^{-1}$. Zusätzlich zu dem großskaligen Temperaturgradienten der Anströmung existieren kleinskalige Oszillationen der Strömungstemperatur, die wahrscheinlich auf Schwankungen in der Ventilatorleistung zurückzuführen sind. Die Oszillationen treten hauptsächlich in einem niederfrequenten Bereich von $[0,1 - 0,3]\text{ Hz}$ auf. Als Messdauer wird 30 s gewählt. Für die Aufnahmezeit der IR-Kamera von 100 Hz ergibt sich eine Bildanzahl von 3000 Bildern für jedes Experiment.

Tab. 3.3: Für beide Testfälle bzw. alle Experimente gültige Versuchsparameter.

Versuchsparameter	Wert
Reynolds-Zahl Re_c in -	$2 \cdot 10^6$
Strömungsgeschwindigkeit in ms^{-1}	58
Messdauer in s	30

3.2 Freifeldmessungen

Um eine thermografische Detektion und Lokalisierung stationärer und instationärer Strömungsablösungen an einer nicht-skalierten WEA zu realisieren, werden Feldmessungen an der Saugseite einer WEA des Herstellers General Electric Company vom Typ GE 1.5sl durchgeführt. Die WEA befindet sich in Thedinghausen, Deutschland und hat eine Nennleistung von $1,5\text{ MW}$ sowie eine Nabenhöhe von 62 m . Die Rotorblätter wurden von dem Hersteller LM Wind Power

gefertigt und haben eine Länge von 37,3 m. Für die Messungen wurde die genannte WEA ausgewählt, da die Geometrie des Rotorblattes an fünf verschiedenen Rotorradien ($r_1 - r_5$) aus früheren Forschungsprojekten bekannt ist und der Anlagenbetreiber, die Firma Energiequelle GmbH, ein Zugriff auf die WEA für Forschungszwecke ermöglichte. Zudem ist der Anlagentyp weltweit weit verbreitet und entspricht aktuellen technologischen Standards, wodurch die grundsätzliche Übertragbarkeit der Ergebnisse auf moderne Multimegawatt-WEA gegeben ist.

Im Weiteren wird zunächst der Messaufbau und anschließend die Versuchsdurchführung der Messungen zur Erfassung stationärer und instationärer Strömungsablösungen präsentiert. Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse basieren im Wesentlichen auf einer im November 2021 durchgeführten Messkampagne, bei welcher ein Rotorblatt aufwendig mit Tufts, als Referenzmethode, instrumentiert wurde. Aufgrund dessen wird der Messaufbau bei der genannten Messkampagne vorgestellt.

3.2.1 Messaufbau

Um die thermografische Detektion von stationären und instationären Strömungsablösungen zu validieren, sind auf der Saugseite eines Rotorblattes mit Tufts bestückte Klebestreifen aufgeklebt. Die einzelnen Tufts eines Klebestreifen sind äquidistant, mit einem Abstand von 0,1 m zueinander. Abb. 3.4a zeigt das mit Tufts instrumentierte Rotorblatt. Zur Validierung stationärer Strömungsablösung sind im Rotorblattwurzelbereich von $r = 4\text{ m}$ bis $r = 14\text{ m}$ Klebestreifen mit einem radialen Abstand von 1 m in orthogonaler Ausrichtung zur Vorderkante angeordnet. Darüber hinausgehend befinden sich orthogonale Klebestreifen bei $r = [15,5, 22,1, 28,7, 35,3]\text{ m}$, was den radialen Rotorblattpositionen mit bekannter Rotorblattgeometrie entspricht. Zur Validierung instationärer Strömungsablösung im äußeren Rotorblattbereich sind zusätzlich bei ca. $r = 24\text{ m}$ und $r = 31\text{ m}$ jeweils Klebestreifen in radialer Ausrichtung in der Nähe der Blatthinterkante angebracht.

Die Strömungsvisualisierung mit Tufts gibt einen Einblick in die Hauptströmungsrichtung und ermöglicht auf Grundlage der räumlichen Ausrichtung und Dynamik der Tufts die Detektion von Strömungsablösungen bzw. die Lokalisierung der Ablöseposition [100]. Die wandnahe Rückströmung sowie die großskaligen Wirbelstrukturen führen in abgelösten Strömungsbereichen typischerweise zu einer der Hauptströmungsrichtung entgegengesetzte Ausrichtung bzw. hohen räumlichen Dynamik der Tufts. In Anlehnung an die Ablösebedingung in Gl. 2.11 wird die Ablöseposition in der vorliegenden Arbeit durch eine verschwindende Ausrichtungskomponente in Richtung der Sehne identifiziert. Da die Tufts die Strömung beeinflussen, wird nur eines der Rotorblätter mit diesen instrumentiert. Die übrigen Rotorblätter werden zur Detektion von Strömungsablösungen mit IRT verwendet.

Abb. 3.4b zeigt den Versuchsaufbau für Feldmessungen. Das optische Messsystem besteht aus einer IR-Kamera für die thermografische Bildaufnahme, zwei Kameras für den sichtbaren Wellenlängenbereich (VIS), welche zur Aufnahme der Tufts und als Triggerquelle verwendet werden, sowie einem Laserscanner zur Erfassung von Gierbewegungen des Rotors. Bei der Feldmessung wird die gleiche IR-Kamera wie bei der in Abschnitt 2.1.3 vorgestellten Windkanalmessung

verwendet. Um eine möglichst hohe Pixelauflösung zu erreichen, wird bei der Freifeldmessung ein 200 mm Teleobjektiv verwendet. Für den Messabstand von ca. 100 m resultiert ein Bildfeld mit 5,28 m Breite \times 4,28 m Höhe, dargestellt durch $640 \times 512 \text{ px}^2$.

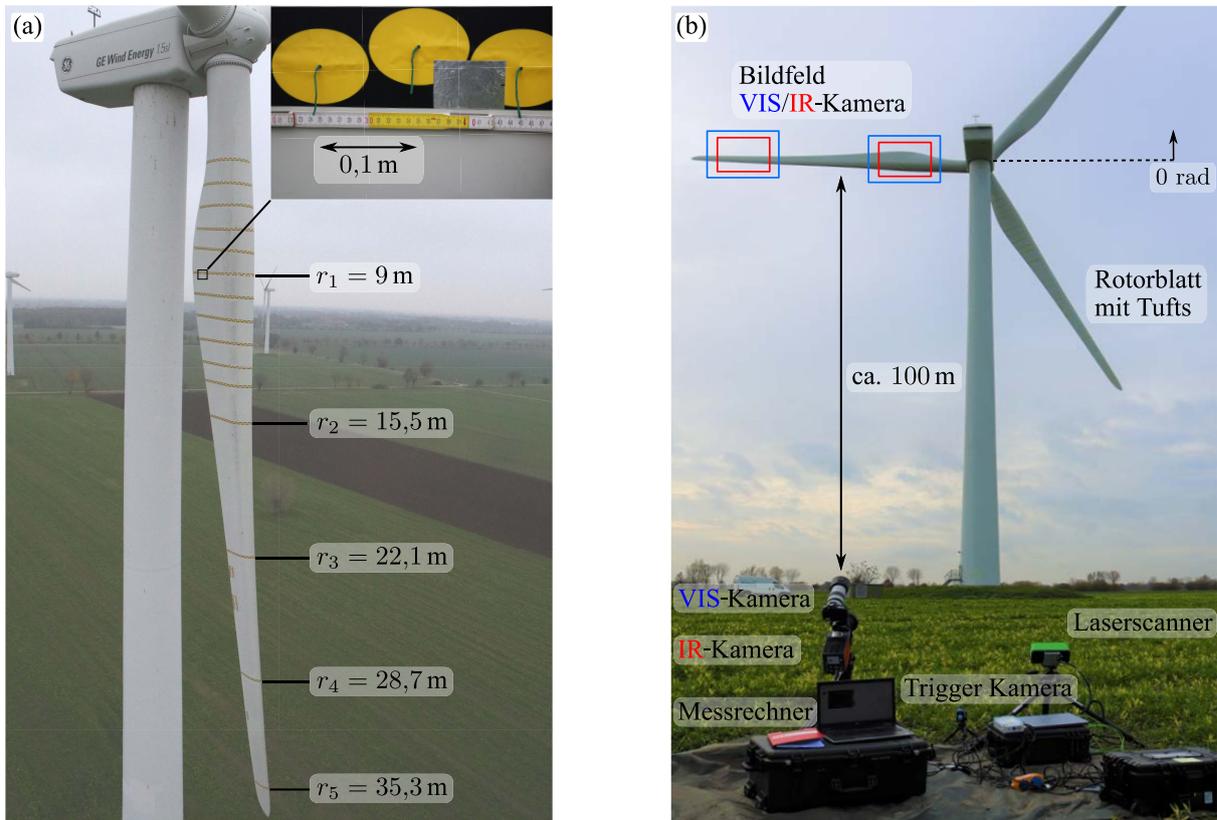


Abb. 3.4: Versuchsaufbau bei den Feldmessungen an der Saugseite einer in Betrieb befindlichen nicht-skalierten WEA. (a) Vorderansicht auf das mit Tufts instrumentierte Rotorblatt. (b) Überblick über das optische Messsystem. Im Bild sind die Bildfelder der IR- und VIS-Kamera für die Messung stationärer Strömungsablösung (Rotorblattwurzelbereich) und instationärer Strömungsablösung (äußerer Rotorblattbereich) eingezeichnet.

Da zum Zeitpunkt der Messung kein zum Rotor mitrotierender Messsystemträger zur Verfügung stand, wurde das Bildfeld auf die Rotorposition $\pi \text{ rad}$ fixiert. Die getriggerte Messung an der gewählten Rotorposition ermöglicht einen vollständigen Blick auf die Rotorblatthinterkante, d.h. den Bereich mit potenzieller Strömungsablösung. Gemäß der Vorbetrachtungen in Abschnitt 2.1.3 wird stationäre Strömungsablösung im Rotorblattwurzelbereich erwartet. Deshalb wird das Bildfeld der Kameras zur Erfassung stationärer Strömungsablösung auf den Rotorradius um $r = 9 \text{ m}$ ausgerichtet. Bei der angestrebten Messung instationärer Strömungsablösung wird als Bildbereich der äußere Rotorblattbereich um $r = 28,7 \text{ m}$ gewählt. Die simultane Bildaufnahme der IR- und VIS-Kamera erfolgt jedes Mal, wenn eines der Rotorblätter das definierte Bildfeld passiert. Bei den Messungen im Rotorblattwurzelbereich werden 4 Bilder pro Umdrehung aufgenommen, im äußeren Rotorblattbereich aufgrund der größeren Umdrehungsgeschwindigkeit hingegen nur 1 Bild pro Umdrehung. Im Ergebnis werden die für die Anwendung der Signalverarbeitungsansätze benötigten IR-Bildserien sowie zeitgleich aufgenommene VIS-Referenzbilder akquiriert.

3.2.2 Versuchsdurchführung

Im Unterschied zu Experimenten im Windkanal, sind die Mess- und Strömungsbedingungen bei Feldmessungen nicht einstellbar und nur teilweise bekannt. Zur Anwendung der Signalverarbeitungsansätze besteht die Forderung, dass die ausgewerteten Temperaturfluktuationen an der Oberfläche der Rotorblätter primär durch instationäre Anströmbedingungen induziert werden. Zusätzlich wird eine feste geometrische Ausrichtung zwischen dem Messsystem und dem betrachteten Rotorblattabschnitt benötigt. Daraus resultieren die folgenden Forderungen an die Mess- und Strömungsbedingungen bei Feldmessungen:

- Die Windgeschwindigkeit muss dauerhaft zwischen der Einschalt- und Abschaltgeschwindigkeit der Anlage liegen. Darüber hinaus ist ein Betrieb im Teillastbereich wünschenswert (siehe Abb. 2.2), da im Teillastbetrieb eine lineare Abhängigkeit zwischen der Windgeschwindigkeit und der Rotordrehzahl besteht und somit die optische Erfassung der Rotordrehzahl eine Näherung der Anströmgeschwindigkeit ermöglicht.
- Die solare Erwärmung der Rotorblätter ist zeitlich konstant.
- Für eine feste geometrische Ausrichtung zwischen der Kamera und dem betrachteten Rotorblattabschnitt darf während der Messdauer keine Rotation der Rotorebene erfolgen, d. h. die Hauptwindrichtung muss konstant sein. Die Ausrichtung der Rotorebene wird während der Messdauer durch einen Laserscanner erfasst.

Die aufgenommenen Bildserien werden hinsichtlich der genannten Forderungen gefiltert und ausschließlich Zeitbereiche ausgewertet, welche die Forderungen erfüllen. Über die genannten Forderungen hinaus bestehen nachfolgende Kriterien zur Auswahl geeigneter Versuchsbedingungen für die thermografische Detektion und Lokalisierung stationärer sowie instationärer Strömungsablösungen:

- (1) Um das SNR bzw. CNR zu maximieren, wird eine maximale solare Erwärmung der Rotorblätter benötigt. In Abhängigkeit des Messorts, des Datums, der Tageszeit und der Ausrichtung der Rotorebene wird die absorbierte solare Strahlungsleistung mittels des in Abschnitt 2.2.1.3 vorgestellten solaren Strahlungsmodells abgeschätzt.
- (2) Für die Anwendung des UIC-Ansatzes zur Erfassung stationärer Strömungsablösung ist zusätzlich eine hohe Varianz der Strömungsgeschwindigkeit bzw. der Anstellwinkel, wünschenswert.
- (3) Zur Induktion instationärer Strömungsablösung wird ein singuläres Böenereignis, also ein sprunghafter Anstieg der Windgeschwindigkeit, benötigt.

Im Weiteren werden die durchgeführten Freifeldmessungen vorgestellt und hinsichtlich der Kriterien (1) – (3) charakterisiert. In Tab. 3.4 sind die Mess- und Strömungsbedingungen der durchgeführten Messreihen aufgeführt. Bei der Messreihe zur Erfassung stationärer Strömungsablösung im Rotorblattwurzelbereich liegt die Drehzahl im Teillastbereich der Anlage und weist eine empirische Standardabweichung von $1,5 \text{ min}^{-1}$ auf. Demnach wird eine hohe Varianz der

Windgeschwindigkeit erwartet, wodurch das Kriterium der instationären Anströmbedingungen erfüllt ist. Aufgrund der jahreszeitbedingt limitierten Strahlungsbedingungen steht bei der Messkampagne mit Tufts als Referenz lediglich eine absorbierte solare Strahlungsleistung $\dot{q}_{\text{abs.}}$ von ca. 25 W m^{-2} zur Verfügung. Somit erfolgt die Auswertung bei nicht optimalen Strahlungsbedingungen.

Tab. 3.4: Übersicht der Mess- und Strömungsbedingungen bei den durchgeführten Freifeldexperimenten.
*Es werden 4 Bilder pro Umdrehung aufgenommen, welche bei der nachfolgenden Bildverarbeitung gemittelt werden.

Parameter der Messung	stationäre Strömungsablösung	instationäre Strömungsablösung	
		Exp. 1 (Winter)	Exp. 2 (Sommer)
Datum, Uhrzeit	18.11.2021, 11:24 Uhr	18.11.2021, 11:52 Uhr	28.08.2022, 15:30 Uhr
Messdauer	15 min	15 min	20 min
Ausgew. Zeitbereich	308 s	340 s	340 s
Anzahl ausgew. Bilder pro Rotorblatt	320*	97	71
Tufts als Referenz	✓	✓	-
Bewölkungsdichte	50 %	50 %	0 %
Ausrichtung Rotorebene	83° Nordost	83° Nordost	315° Nordwest
abs. solare Strahlung	$\approx 25 \text{ W m}^{-2}$	$\approx 20 \text{ W m}^{-2}$	$\approx 70 \text{ W m}^{-2}$
Drehzahl	$(16 \pm 1,5) \text{ min}^{-1}$	$(17 \pm 1,4) \text{ min}^{-1}$	$(12,5 \pm 1,4) \text{ min}^{-1}$
starkes Böenereignis	-	✓	✓

Bei der Untersuchung instationärer Strömungsablösung wird zwischen zwei Experimenten mit unterschiedlichen Strahlungsbedingungen unterschieden. Das erste Experiment fand im Rahmen der Tufts-Messkampagne statt und ist somit durch eine geringe solare Erwärmung des Rotorblattes ($\dot{q}_{\text{abs.}} \approx 20 \text{ W m}^{-2}$) charakterisiert. Im Vergleich dazu sind die solaren Strahlungsbedingungen im zweiten Experiment mit ($\dot{q}_{\text{abs.}} \approx 70 \text{ W m}^{-2}$) deutlich erhöht. Der Vergleich der beiden Experimente ermöglicht einerseits eine Prüfung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse hinsichtlich der grundsätzlichen Detektier- und Lokalisierbarkeit von instationären Strömungsablösungen und andererseits eine Untersuchung der dabei erreichbaren spatio-temporalen Auflösungen in Abhängigkeit von $\dot{q}_{\text{abs.}}$. Während beider Experimente traten starke Böenereignisse auf, welche zu einem sprunghaften Anstieg der Rotordrehzahl führten. Somit besteht die Hypothese, dass instationäre Strömungsablösungen während der Messdauer beider Experimente im äußeren Rotorblattbereich aufgetreten sind.

3.3 Bildverarbeitung

3.3.1 Vorverarbeitung

Die thermografische Bildaufnahme erfolgt mit der Software Irbis des Kameraherstellers InfraTec, während die Software Python für die Bildverarbeitung verwendet wird. Aus diesem Grund werden die aus Irbis in dem Dateiformat „.irb“ ausgegebenen Thermogramme zunächst in das Dateiformat „.npy“ umgewandelt und somit eine weitere Bildverarbeitung mit Python ermög-

licht. Im ersten Schritt der nachfolgenden Bildverarbeitung werden die bei LWIR-Kameras häufig auftretenden Pixelfehler auf dem Kamerachip mit Hilfe der „biharmonic equation inpainting“-Methode der Python-Bibliothek „scikit-image“ gefiltert und ausgefüllt [97]. Im Fall der Windkanalmessungen erfolgt anschließend eine Korrektur durch Verzeichnung verursachter geometrischer Abbildungsfehler. Hierfür wird die in der Python-Bibliothek „opencv“ implementierte Kalibriermethode von Zhang verwendet [110]. Bei den Freifeldmessungen ist der Effekt von Verzeichnungen aufgrund der großen Bildwinkel hingegen vernachlässigbar und wird deshalb nicht bereinigt.

Bei den konzipierten Signalverarbeitungsansätzen werden zeitliche Temperaturfluktuationen pixelweise ausgewertet, wofür eine konstante geometrische Ausrichtung des Messobjektes im Bildfeld benötigt wird. In den Windkanaluntersuchungen wird diese Bedingung erfüllt, da eine feste geometrische Anordnung des Flügelprofils zur IR Kamera vorliegt. Bei den Freifeldmessungen ist die Aufnahme des rotierenden Rotorblattes hingegen mit einer Unsicherheit der Aufnahmeposition von mehreren px verbunden. Somit ist die Korrektur der Bildausrichtung für die Anwendung der Signalverarbeitungsansätze bei Freifeldmessungen substantiell. Die Korrektur der Bildausrichtung umfasst folgende Bildverarbeitungsschritte:

- (1) Derotation der einzelnen Bilder für eine horizontale Ausrichtung der Rotorblätter. Hierfür wird die Position der Rotorblattvorderkante mit einem „Canny edge detection“-Filter bestimmt („scikit-image“-Bibliothek) und mit einer linearen Funktion approximiert. Der Anstieg der linearen Funktion definiert den zu korrigierenden Rotationswinkel.
- (2) Translation der Bilder auf die Ausrichtung eines Referenzbildes. Zur Berechnung der Transformationsvorschrift wird der „Enhanced Correlation Coefficient (ECC)“-Algorithmus aus der „opencv“-Bibliothek verwendet [29]. Um den Einfluss von Hintergrundeffekten, wie Wolkenformationen, auf die Bildausrichtung zu vermeiden, wird der Grauwert des Hintergrunds vor der Anwendung des ECC-Algorithmus auf null gesetzt.
- (3) Manuelle Prüfung der Ausrichtungsgüte bzw. auf Ausreißer. Um die Ausrichtungsgüte zu prüfen bzw. Ausreißer zu identifizieren bietet sich bei der thermografischen Strömungsvisualisierung die Analyse der Form spatio-temporal konstanter Bildmerkmale, wie Turbulenzkeile, in Differenzbildern an.

Durch die Verwendung von Markern wurde die verbleibende mittlere euklidische Verschiebung zwischen zwei Bildern auf 0,2 px quantifiziert, wodurch die Anwendung der konzipierten Signalverarbeitungskonzepte ermöglicht wird.

3.3.2 Implementierung der Signalverarbeitungsansätze

Im Weiteren wird die Implementierung der konzipierten Signalverarbeitungsansätze zur Erfassung stationärer und instationärer Strömungsablösungen dokumentiert. Das Ziel ist hierbei jeweils eine gezielte Analyse des thermischen Antwortverhaltens auf veränderliche Anströmbedingungen durch die Auswertung von Bildserien mit J Bildern zu realisieren. Abb. 3.5 veranschaulicht den Ablauf aller in dieser Arbeit verwendeten Signalverarbeitungsansätze.

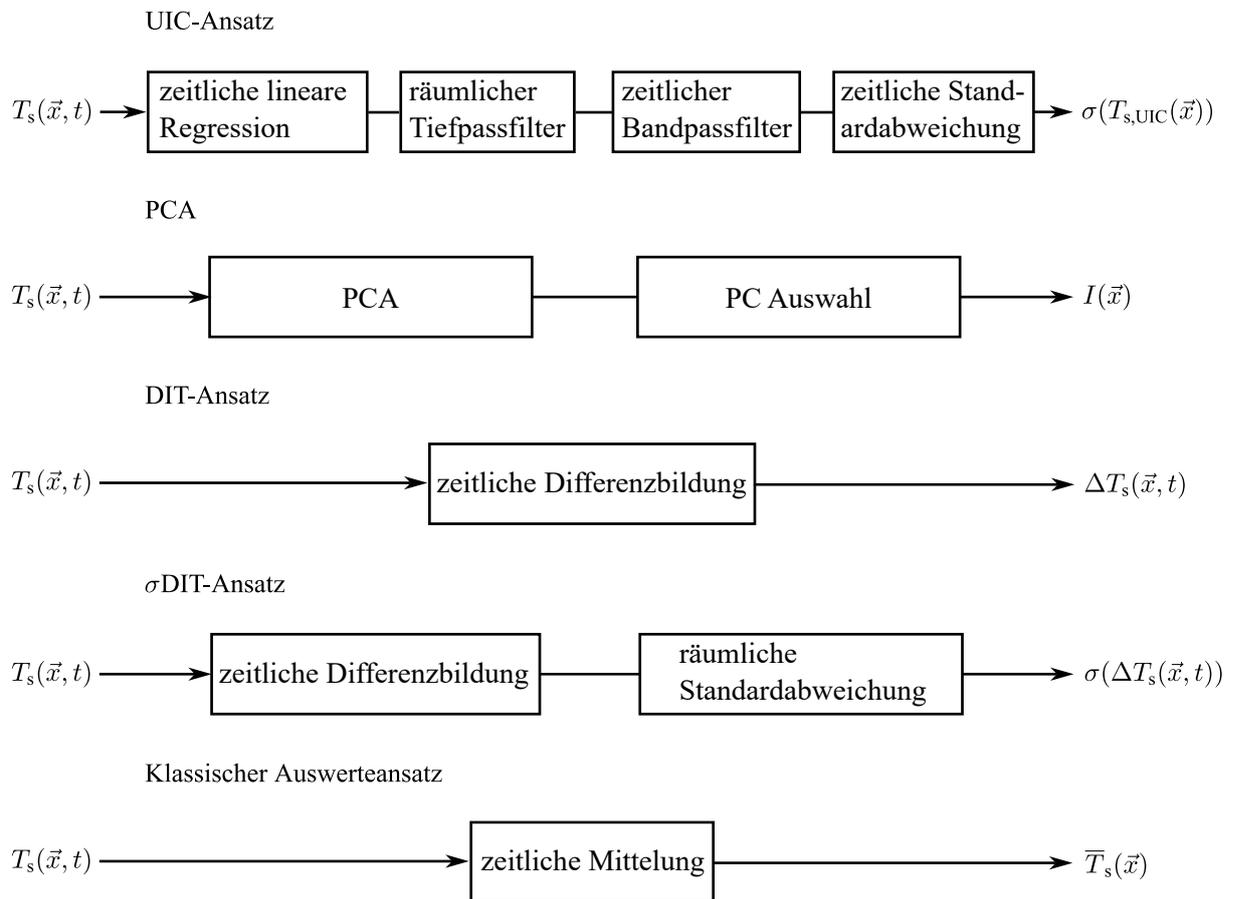


Abb. 3.5: Schematische Übersicht über die in dieser Arbeit verwendeten Signalverarbeitungsansätze.

UIC-Ansatz

Bei der Implementierung des UIC-Ansatzes werden der zeitliche Mittelwert sowie der zeitliche Gradient mit Hilfe einer linearer Regression pixelweise subtrahiert. Mit dem Ziel einer Rauschminimierung erfolgt im nächsten Schritt eine räumliche Tiefpassfilterung für jedes Bild unter Anwendung eines Gauß-Filters mit einer gewählten Standardabweichung von einem Pixel. In einem weiteren Schritt der Signalverarbeitung wird eine zeitliche Bandpassfilterung für jedes Pixel mittels einer Fourier-Transformation durchgeführt. Bei den Windkanalmessungen wird der Durchlassbereich auf 0,1 Hz bis 0,6 Hz festgelegt. Der genannte Bereich enthält das thermische Antwortverhalten der Oberfläche auf die Oszillation der Anströmtemperatur und die Bewegung der DFD. Bei den Freifeldmessungen werden Frequenzanteile über 0,08 Hz ausgeschlossen, um den Einfluss von unerwünschten Querempfindlichkeiten zu reduzieren und das Rauschen zu minimieren. Im letzten Schritt wird die zeitliche Standardabweichung der gefilterten Oberflächentemperaturen $T_{s,UIC}$ mit den Bildkoordinaten \vec{x} und der Bildnummer j pixelweise wie folgt berechnet:

$$\sigma(T_{s,UIC}(\vec{x})) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^J (T_{s,UIC}(\vec{x}, j) - \bar{T}_{s,UIC}(\vec{x}, j))^2}{J - 1}}. \quad (3.2)$$

$\sigma(T_{s,\text{UIC}}(\vec{x}))$ entspricht schließlich der Auswertegröße des UIC-Ansatzes.

PCA

Die PCA-basierte Auswertung umfasst die Schritte der Anwendung einer PCA auf die Bildserie und der anschließenden manuellen Sichtung und Auswahl der berechneten PCs. Für die methodischen Grundlagen der PCA im Kontext der thermografischen Strömungsvisualisierung sei auf den Abschnitt 2.3.1.2 verwiesen. Für die Anwendung der PCA wird die Implementierung der Singulärwertzerlegung in der Python-Bibliothek „scikit-learn“ verwendet [65]. Hierbei sei erwähnt, dass in die Singulärwertzerlegung ausschließlich Pixel eingehen, welche das Rotorblatt abbilden. Im Unterschied zu der PCA-basierten Auswertung von Gleichauf [44] erfolgt vor der Singulärwertzerlegung eine Studentisierung der verwendeten Pixel-Werte jedes einzelnen Thermogramms. Abschließend wird die Intensitätsverteilung $I(\vec{x})$ der berechneten PCs hinsichtlich der Detektierbarkeit der a priori erwarteten und bei den physikalisch interpretierbaren Signalverarbeitungsansätzen nachgewiesenen Bildmerkmalen geprüft.

DIT und σ DIT-Ansatz

Die Implementierung des DIT und σ DIT-Ansatzes erfordert lediglich die Berechnung zeitlicher Differenzbilder sowie die Berechnung der Standardabweichung der Differenzbilder. Die Differenzbilder ΔT_s werden durch eine Subtraktion von zeitlich aufeinanderfolgenden Bildern der thermografischen Bildserie $T_s(\vec{x}, t)$ mit den Bildkoordinaten \vec{x} zum Zeitschritt t gemäß

$$\Delta T_s(\vec{x}, t) = T_s(\vec{x}, t + 1) - T_s(\vec{x}, t), \quad (3.3)$$

berechnet. Die nachfolgende Berechnung der räumlichen Standardabweichung der Differenzbilder $\sigma(\Delta T_s)$ beschränkt sich auf den Bildbereich des Rotorblattes.

Klassischer Auswerteanatz

Neben den konzipierten dynamischen Signalverarbeitungsansätzen wird der klassische IRT-Ansatz zur Auswertung der zeitlich gemittelten Oberflächentemperatur \bar{T}_s als Referenzmethode verwendet. Die zeitlich gemittelte Oberflächentemperatur wird wie folgt berechnet:

$$\bar{T}_s(\vec{x}) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J T_s(\vec{x}, j). \quad (3.4)$$

3.3.3 Definition von Auswertekriterien

Auf Grundlage der Analyse der Messkette werden im Folgenden die qualitativen und quantitativen Kriterien zur Bewertung der thermografischen Detektier- und Lokalisierbarkeit von stationären und instationären Strömungsablösungen bei der Anwendung der konzipierten Signalverarbeitungskonzepte zusammengefasst.

Stationäre Strömungsablösung

Für eine eindeutige Identifikation der unterschiedlichen Strömungsbereiche, mit Fokus auf der Detektion und Lokalisierung stationärer Strömungsablösung, mit dem UIC-Ansatz stehen die folgenden qualitativen Merkmale der Auswertegröße $\sigma(T_{s,UIC})$ zur Verfügung:

- Laminare und turbulent-angelegte Strömungsbereiche (mit geringen Druckgradienten): $\sigma(T_{s,UIC})$ nimmt in Folge der Abnahme von \bar{h} in Strömungsrichtung kontinuierlich ab.
- Laminar-turbulenter Transitionsbereich, Ablösebereich: $\sigma(T_{s,UIC})$ weist aufgrund der Änderung von \bar{h} im Bereich der Transition und Ablösung sowie der räumlichen Verschiebung der Strömungsbereiche Maxima auf.
- Turbulent abgelöster Strömungsbereich: $\sigma(T_{s,UIC})$ nimmt aufgrund der Zunahme von \bar{h} und h' zu.

Bei der PCA-basierten Auswertung werden in den einzelnen PCs Intensitätssprünge zwischen den unterschiedlichen Strömungsbereichen erwartet.

Die Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche wird anhand des CNR quantifiziert. Eine übliche Definition des CNR im Bereich der Bildverarbeitung ist

$$\text{CNR} = \frac{|\bar{C}_a - \bar{C}_b|}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2}}. \quad (3.5)$$

Die Indizes a und b bezeichnen die zu unterscheidenden Strömungsbereiche, \bar{C}_a und \bar{C}_b die mittleren Pixelintensitäten in den Auswertebereichen sowie σ_a und σ_b die korrespondierenden Standardabweichungen. Im Kontext der thermografischen Strömungsvisualisierung setzt das CNR den Kontrast zwischen den verschiedenen Strömungsbereichen, die Nutzsignalamplitude, und die zugehörige kombinierte Standardabweichung, die Rausch-Standardabweichung, ins Verhältnis. Folglich wird eine Maximierung der Unterscheidbarkeit von Strömungsbereichen durch eine Steigerung des Kontrasts zwischen den Strömungsbereichen oder durch eine Reduktion der Standardabweichung in den einzelnen Auswertebereichen erreicht.

Instationäre Strömungsablösung

Bei der Anwendung des σ DIT-Ansatzes werden während des Auftretens instationärer Anströmbedingungen Maxima der Auswertegröße $\sigma(\Delta T_s)$ erwartet. Bei der nachfolgenden Auswertung der identifizierten Zeitbereiche mit instationären Anströmbedingungen mit dem DIT-Ansatz stehen die folgenden Merkmale der Auswertegröße ΔT_s zur Verfügung, um veränderliche Transitions- und Ablöseposition zu detektieren und zu lokalisieren:

- Bereich der laminar-turbulenten Transition: Minimum von ΔT_s , verursacht durch eine zunehmende konvektive Abkühlung.
- Ablösepunkt: Maximum von ΔT_s , aufgrund abnehmender konvektiver Kühlung.

- Abgelöster Strömungsbereich: ΔT_s nimmt aufgrund des Einflusses der adiabaten Erwärmung und der Zunahme der konvektiven Kühlung zur Hinterkante hin ab.

Die Analyse der erreichbaren räumlichen Auflösung bei der Lokalisierung instationärer Strömungsablösung basiert auf der Auswertung des Bildkontrasts. Es wird geprüft, ob mit dem Vorwissen der zuvor erfolgten Detektion und räumlich gemittelten Lokalisierung der unterschiedlichen Strömungsbereiche, eine manuelle, räumlich aufgelöste Lokalisierung der Transitions- und Ablöseposition anhand des Bildkontrasts realisierbar ist. Als Maßzahl für die Unterscheid- und Lokalisierbarkeit der unterschiedlichen Strömungsbereiche wird das CNR verwendet. Hierbei werden die zu vergleichenden Auswertebereiche entlang der definierten Übergänge zwischen den Strömungsbereichen angeordnet. Sofern das CNR zwischen den Auswertebereichen > 1 ist, wird eine theoretische Lokalisierbarkeit der entsprechenden Transitions- oder Ablöseposition mit der maximalen Pixelauflösung angenommen.

Die vorgestellte Auswertung des CNR hat den Nachteil, dass die Auswertebereiche manuell und somit subjektiv festgelegt werden. Sofern ein $\text{CNR} > 1$ zwischen dem angelegten und abgelösten Bereich nachgewiesen werden kann, erfolgt deshalb zusätzlich eine modellbasierte und somit objektive Bestimmung der Ablöseposition in jeder Bildzeile bzw. Bildspalte. Bei der Auswertung von Differenzbildern mit dem DIT-Ansatz wird der Verlauf der Auswertegröße in Strömungsrichtung mit einem Gauß-Filter geglättet und die Ablöseposition anhand des charakteristischen Maximum bestimmt. Bei der Auswertung mit der PCA wird im Bereich der Ablösung in Strömungsrichtung ein Intensitätssprung erwartet. Mit dem von [25] vorgestellten Verfahren zur Lokalisierung der Transitionsposition wird der Intensitätsverlauf mit der Verteilungsfunktion der Normalverteilung

$$\hat{I} = \hat{a} \operatorname{erf} \left(\frac{x - \hat{b}}{\sqrt{2} \hat{c}} + \hat{d} \right), \quad (3.6)$$

approximiert. Die Position des Intensitätssprungs, also die Ablöseposition, ist anhand des Wendepunkts \hat{b} ablesbar. Da Strömungsablösung im Bereich der Hinterkante auftritt, wird spaltenweise bzw. zeilenweise nur der Bereich ab 50 % der Sehnenlänge ausgewertet.

Um die zufällige Unsicherheit der ermittelten Ablösepositionen zu minimieren und zu quantifizieren, werden die zeilen- oder spaltenweise bestimmten Ablösepositionen als Wiederholungsmessungen behandelt und unter Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate mit einem Polynom 4. Grades approximiert. Anschließend wird die Messunsicherheit der Ablöseposition u_{AP} anhand der Standardabweichung der Differenzen der zeilen- oder spaltenweise bestimmten Ablösepositionen und der Modellfunktion berechnet.

4 Stationäre Strömungsablösung

Um eine eindeutige Detektion und Lokalisierung von stationären Strömungsablösungen an WEA mittels IRT zu realisieren, wird eine physikalische Interpretierbarkeit der Signalverläufe und ein maximaler Kontrast zwischen den Strömungsbereichen benötigt. Zu diesem Zweck wurde in Abschnitt 2.3.1 ein Signalverarbeitungsansatz konzipiert, welcher eine physikalisch interpretierbare Signalverarbeitung des thermodynamischen Antwortverhaltens der Oberfläche auf instationäre Anströmbedingungen mit der Anwendung einer PCA kombiniert. In diesem Kapitel soll in Abschnitt 4.1 zunächst die Eignung der Signalverarbeitungsansätze anhand der in Kapitel 3 vorgestellten Windkanalexperimente und Auswertekriterien geprüft werden. Anschließend werden in Abschnitt 4.2 die Fähigkeiten und Grenzen des Messansatzes bei der Anwendung an realen WEA geklärt, und somit bestimmt inwieweit stationäre Strömungsablösungen mit IRT detektierbar sind bzw. sich Ablösepositionen und -bereiche lokalisieren lassen. Abschließend erfolgt in Abschnitt 4.3 eine Validierung einer geometrischen Zuordnung der 2D-Thermogramme auf die Oberfläche der Rotorblattgeometrie, wodurch die thermografisch ermittelte Ablöseposition der realen 3D-Rotorblattgeometrie zugeordnet wird.

4.1 Verifizierung und Charakterisierung der Signalverarbeitungsansätze für stationäre Strömungsablösung in Windkanaluntersuchungen

4.1.1 Referenzierung der Strömungsbereiche

Zunächst wird mit Hilfe von Referenzmessungen der stationäre Ablöswinkel für die untersuchte Windkanalkonfiguration sowie die Grenzen der verschiedenen Strömungsbereiche bestimmt. Dazu wird die in Abschnitt 2.1.2 eingeführte Auswertung von Profilpolaren sowie die in Abschnitt 2.1.3.2 vorgestellte Analyse der Druckverläufe auf der Rotorblattoberfläche auf die hier untersuchte Windkanalkonfiguration angewendet.

Abb. 4.1 zeigt die gemessenen Profilpolare für das DU 00-W2-401-Profil. Bis zu einem Anstellwinkel von $\alpha = 6^\circ$ nimmt c_a näherungsweise linear zu, darüber hinaus ist ein Abflachen des Verlaufs zu erkennen. Ein charakteristisches Maximum von c_a beim Einsetzen von Strömungsablösung ist somit nicht erkennbar. Allerdings deutet der abflachende Verlauf von c_a bei $\alpha > 6^\circ$ bei der gleichzeitig exponentiellen Zunahme von c_w bzw. Abnahme von c_a/c_w auf das Einsetzen von Strömungsablösung ab $\alpha > 6^\circ$ hin. Demnach wird von der Existenz von Strömungsablösung bei den Experimenten mit $\bar{\alpha} = 12^\circ$ ausgegangen.

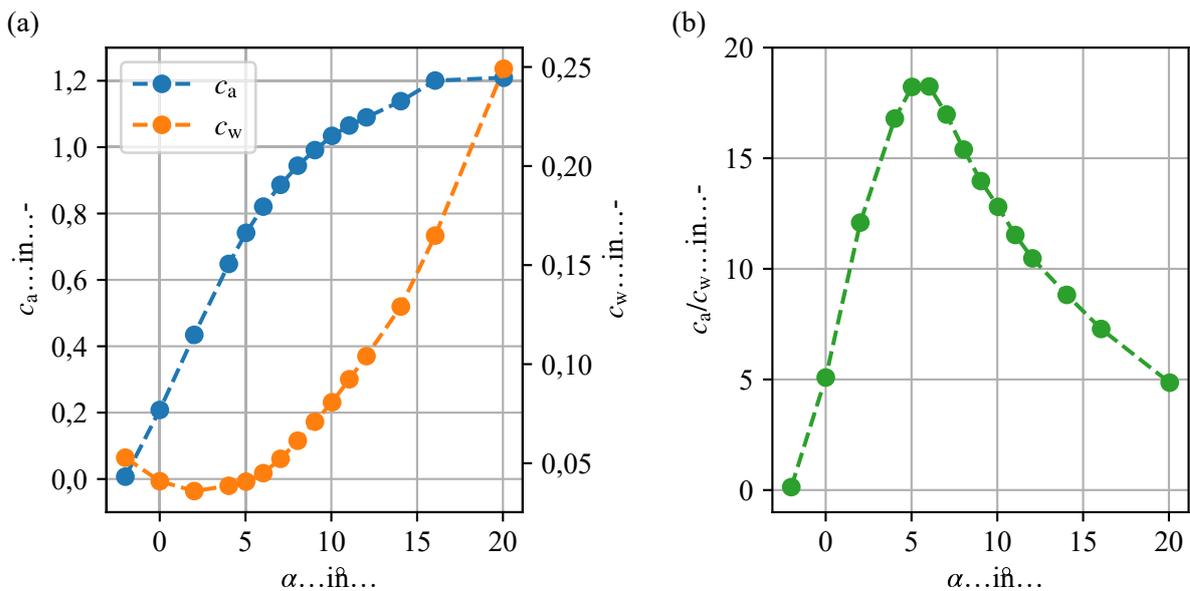


Abb. 4.1: Bei der Windkanalmessung bestimmte Profilpolare des DU 00-W2-401-Profiles für $Re_c = 2 \cdot 10^6$. Der abflachende Verlauf von c_a sowie die näherungsweise exponentiellen Zunahme von c_w bzw. Abnahme von c_a/c_w deuten auf das Einsetzen von Strömungsablösung ab $\alpha > 6^\circ$ hin.

Um den Ablösepunkt sowie die Lage der laminar-turbulenten Transition zu lokalisieren wird anhand der Oberflächendruckmessungen der dimensionslose Druckbeiwert in Abhängigkeit der Sehnenposition ausgewertet. In Abb. 4.2 sind die experimentell ermittelten Verläufe von c_p für die Anstellwinkel $\alpha = [-2 \pm 1,5^\circ, 12 \pm 1,5^\circ]$ dargestellt. Zusätzlich sind die 3σ -Konfidenzintervalle als Unsicherheitsbalken eingezeichnet. Im ersten Experiment mit $\alpha = 12 \pm 1,5^\circ$ weisen ein Sattelpunkt im c_p -Verlauf und ein lokales Maximum in der Breite des Konfidenzintervalls auf die Transition bei $x/c = 0,25$ hin. Der konstante statische Druck in abgelösten Strömungsbereichen führt gemäß Gl. 2.13 zu ebenfalls konstanten c_p -Werten, wodurch Strömungsablösung bei ca. $x/c = 0,5$ detektiert werden kann. Zusätzlich zu den Oberflächendruckmessungen wird die Lage der Strömungsablösung durch Tufts überprüft. Die Strömungsablösung ist in Abb. 4.3c und Abb. 4.3a durch eine hohe Varianz und eine der Hauptströmungsrichtung entgegengesetzte Ausrichtung der Tufts erkennbar. Im zweiten Experiment mit einem geringeren Anstellwinkel, d.h. $\alpha = -2 \pm 1,5^\circ$, zeigt ein Sattelpunkt im c_p -Verlauf den Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung bei $x/c = 0,4$ an. Danach bleibt die Grenzschichtströmung angelegt, d.h. es findet keine turbulente Strömungsablösung statt.

4.1.2 UIC-Ansatz – physikalisch interpretierbare Detektion und Lokalisierung von stationären Strömungsablösungen

Die Verifizierung und Charakterisierung des UIC-Ansatzes basiert auf den in Abschnitt 3.3.3 zusammengefassten Kriterien zur eindeutigen Detektion und Lokalisierung von stationären Strömungsablösungen anhand von physikalisch interpretierbaren Merkmalen, und erfolgt in den nachfolgenden Schritten:

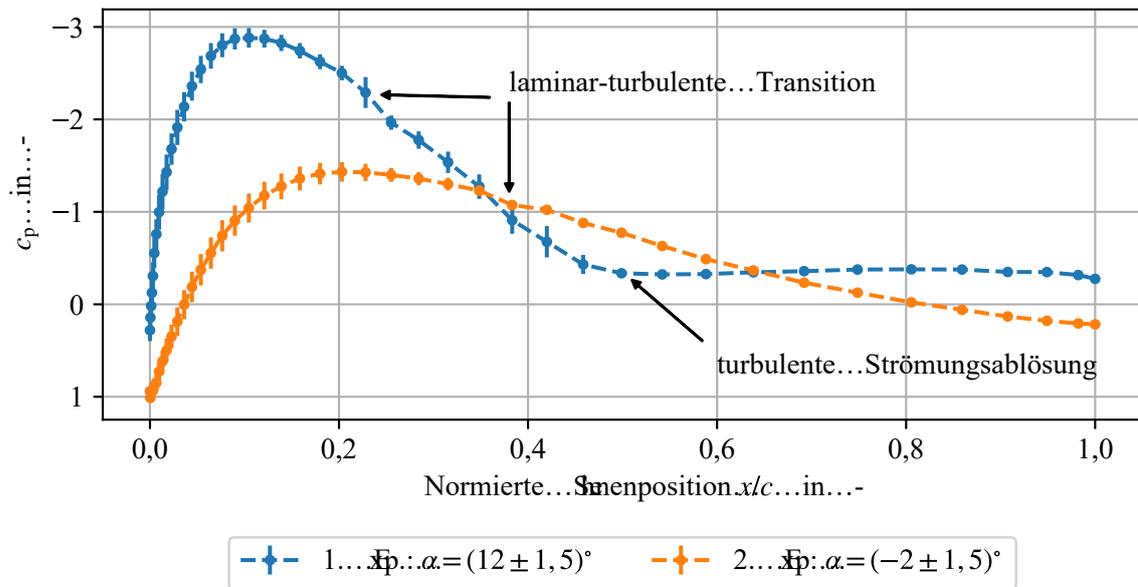


Abb. 4.2: Verteilung der experimentell ermittelten dimensionslosen Druckbeiwerte c_p für die Saugseite des DU 00-W2-401-Profiles bei $Re_c = 2 \cdot 10^6$ und $\alpha = [-2 \pm 1,5^\circ, 12 \pm 1,5^\circ]$.

- (1) Auswertung bei einem konstanten Anstellwinkel in Testfall 1.
- (2) Auswertung für zusätzlich zeitlich veränderliche Anstellwinkel in Testfall 2.

Um die Verbesserung bei der Detektierbarkeit von Strömungsablösungen durch den UIC-Ansatz zu bewerten, werden der UIC-Ansatz und der klassische IRT-Signalverarbeitungsansatz der Auswertung zeitlich gemittelter Thermogramme verglichen.

1. Testfall In Abb. 4.3 sind die Ergebnisse der Bildverarbeitung mit dem klassischen Ansatz (links) und dem UIC-Ansatz (rechts) für den ersten Testfall gegenübergestellt. Abb. 4.3a und Abb. 4.3c zeigen die Ergebnisbilder für das erste Experiment mit $\alpha = 12^\circ$. Für die angestrebte Auswertung der Sensitivität der Signalverarbeitungsansätze hinsichtlich strömungsabhängiger Merkmale sind in Abb. 4.3b und Abb. 4.3d die im Bereich von $y/Y = 0,4$ bis $y/Y = 0,6$ quer zur Strömungsrichtung gemittelten Auswertegrößen über die normierte Sehnenposition für beide Experimente aufgetragen. Beide Darstellungen enthalten die zugehörigen 3σ -Konfidenzintervalle.

Zunächst wird die Identifizierbarkeit von Strömungsbereichen mit dem klassischen IRT-Ansatz betrachtet. Der Temperaturverlauf über die normierte Sehnenposition in Abb. 4.3b zeigt für beide Experimente einen nicht-monotonen Signalverlauf zwischen verschiedenen Strömungsbereichen und ermöglicht somit eine Unterscheidung der Strömungsbereiche. Der Temperaturverlauf wird jedoch maßgeblich durch Quereinflüsse beeinflusst. Infolgedessen werden die Temperaturgradienten zwischen den verschiedenen Strömungsbereichen sowie die Ausbildung strömungsabhängiger Merkmale innerhalb der einzelnen Strömungsbereiche reduziert. So weisen die Signalverläufe beider Experimente ab der normierten Sehnenposition von $x/c = 0,8$ eine hohe Ähnlichkeit auf, obwohl die Strömung lediglich in Exp. 1 abgelöst ist. Folglich wird die Hypothese bestätigt,

dass der klassische IRT-Ansatz nicht geeignet ist, eine eindeutige Detektion der turbulenten Strömungsablösung bei Messungen mit geringem Signal-Rausch-Verhältnis zu realisieren.

Im Gegensatz dazu entsprechen die Ergebnisse der Auswertung mit dem UIC-Ansatz dem erwarteten qualitativen Verlauf des Wärmeübergangskoeffizienten und ermöglichen die in Tab. 4.1 zusammengefasste Lokalisierung der Strömungsbereiche. Die Positionspositionen sowie die Position des Ablösebeginns stimmen mit den Ergebnissen der Druckmessungen überein. Im

Tab. 4.1: Mit dem UIC-Ansatz erfolgte Lokalisierung der unterschiedlichen Strömungsbereiche im ersten Testfall in Exp. 1 mit $\alpha = 12^\circ$ und Exp. 2 mit $\alpha = -2^\circ$.

Strömungsbereiche	räumliche Ausdehnung in x/c	
	Exp. 1	Exp. 2
laminar	[0 – 0,22]	[0 – 0,36]
laminar-turbulente Transition	[0,22 – 0,26]	[0,36 – 0,44]
turbulent	[0,26 – 0,52]	[0,44 – 1]
Ablösebereich	[0,52 – 0,6]	[–]
abgelöst	[0,6 – 1]	[–]

Detail ist in Abb. 4.3d in angelegten Strömungsbereichen eine kontinuierliche Abnahme von $\sigma(T_{s,UIC})$ über x/c in Folge der zunehmenden Grenzschichtdicke zu erkennen, während $\sigma(T_{s,UIC})$ im abgelösten Strömungsbereich aufgrund von anwachsenden Wirbelstrukturen zunimmt. Im Transitionsbereich und im Ablösebereich liegen aufgrund des reduzierten Einflusses von lateraler Wärmeleitung hohe räumliche Gradienten vor. Die laminar-turbulente Transition ist anhand eines sprunghaften Anstiegs von $\sigma(T_{s,UIC})$ in Folge der erhöhten turbulenten Durchmischung eindeutig erkennbar. Im Bereich der Ablösung erfolgt hingegen die charakteristische Abnahme des Wärmeübergangskoeffizienten, und somit der Auswertegröße $\sigma(T_{s,UIC})$. Die Ergebnisse zeigen, dass die Auswertung des thermischen Antwortverhaltens auf fluktuierende Anströmtemperaturen mit dem UIC-Ansatz eine merkmalsbasierte und somit eindeutige Identifikation und Lokalisierung der Strömungszustände in der Grenzschicht ermöglicht.

2. Testfall Im zweiten Testfall setzen sich die instationären Anströmbedingungen aus fluktuierenden Anströmtemperaturen und zeitlich veränderlichen Anstellwinkeln zusammen. Das Ergebnis der Bildverarbeitung mit dem UIC-Ansatz ist in Abb. 4.4 dargestellt. Analog zu Abb. 4.3 ist in der oberen Bildzeile das Ergebnisbild, und in der unteren Bildzeile der berechnete Verlauf der räumlich gemittelten Auswertegröße $\sigma(T_{s,UIC})$ über x/c abgebildet. Da bereits im ersten Testfall die deutlich verbesserte Identifizierbarkeit von Strömungsbereichen durch die Anwendung des UIC-Ansatzes im Vergleich zur klassischen Auswertung nachgewiesen wurde, wird an dieser Stelle auf ein Vergleich der beiden Signalverarbeitungsansätze verzichtet.

Bei der Auswertung des thermischen Antwortverhaltens auf die instationären Anströmbedingungen im 2. Testfall werden, zusätzlich zu den im 1. Testfall identifizierten Merkmalen innerhalb der einzelnen Strömungsbereiche, im Bereich der Transition ein globales und im Bereich der Ablösung ein lokales Maximum erwartet. Die Maxima resultieren aus der räumlichen Verschiebung der Strömungsbereiche bei veränderlichen Anstellwinkeln. Tatsächlich sind in Abb. 4.4a und Abb. 4.4b Signalmaxima im Transitionsbereich bei $x/c = [0,22 – 0,28]$ und im Ablösebereich

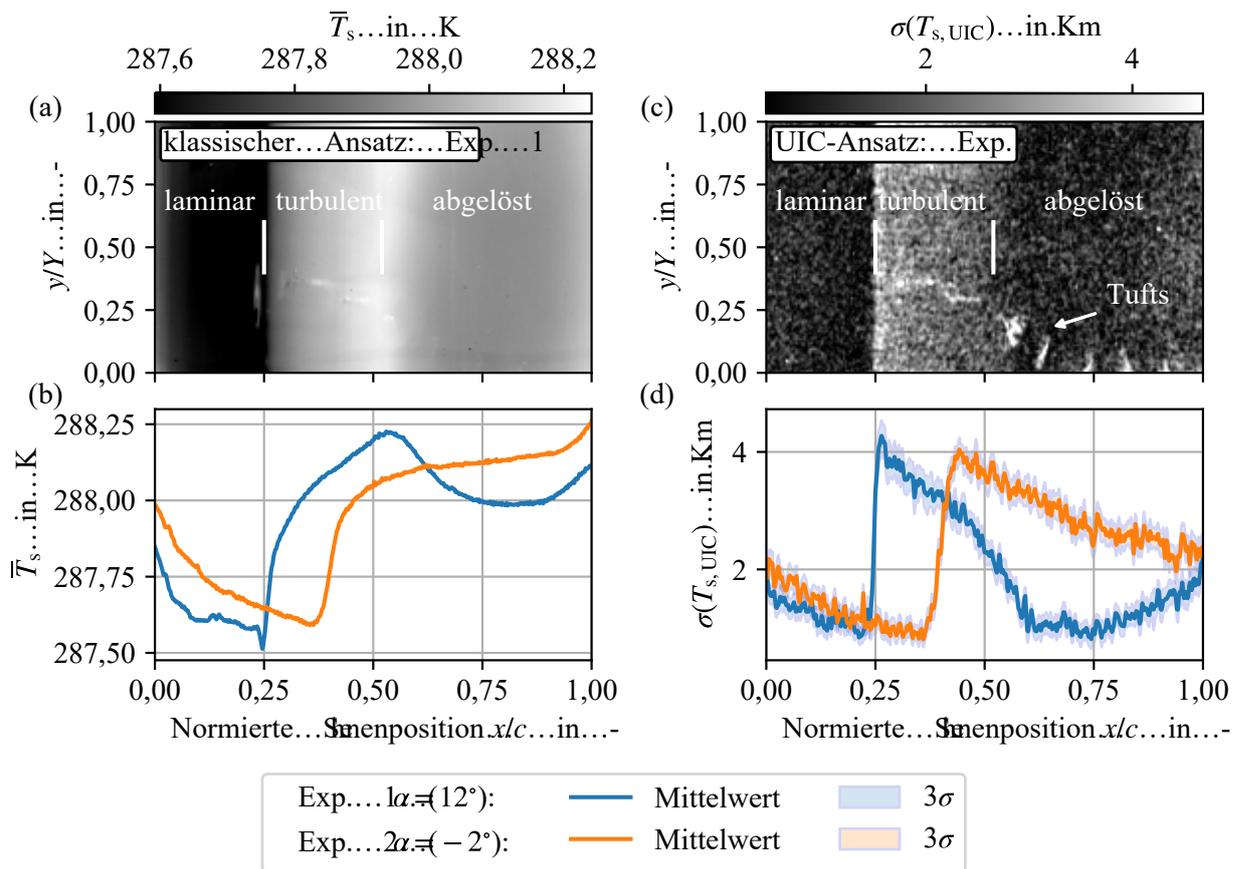


Abb. 4.3: Auswertung und Verifizierung des UIC-Ansatz (c,d) anhand eines Vergleichs mit dem klassischen IRT Ansatz (a,b) für ein Experiment mit (Exp. 1) und ohne (Exp. 2) turbulente Strömungsablösung im ersten Testfall. Obere Bildzeile: Verarbeitete Thermogramme für das erste Experiment. Untere Bildzeile: Vergleich beider Experimente für die über den Spannweitenbereich von $y/Y = 0,4$ bis $y/Y = 0,6$ gemittelten und über die Sehnenposition aufgetragenen Auswertegrößen. Parameter des Windkanaluntersuchung: $Re_c = 2 \cdot 10^6$, $\alpha = 12^\circ$ (Exp. 1) und $\alpha = -2^\circ$ (Exp. 2).

bei $x/c = [0,52 - 0,7]$ erkennbar. Somit ermöglicht die Anwendung des UIC-Ansatzes die Unterscheidung der unterschiedlichen Strömungsbereiche sowie die Analyse der räumlichen Verschiebung bei instationären Anströmbedingungen. Darüber hinaus weist der Signalverlauf von $\sigma(T_{s,UIC})$ in Abb. 4.4b, analog zu Abb. 4.3d für den ersten Testfall, eine Abnahme in angelegten Strömungsbereichen sowie eine Zunahme im abgelösten Strömungsbereich auf. Somit können alle definierten strömungsspezifischen Merkmale des thermischen Antwortverhaltens für WEAtypische instationäre Anströmbedingungen detektiert werden. Im Ergebnis wird die Eignung des UIC-Ansatzes zur eindeutigen Detektion und Lokalisierung von stationären Strömungsablösungen anhand von physikalisch interpretierbaren Merkmalen verifiziert.

4.1.3 PCA – Detektion stationärer Strömungsablösungen mit maximalen Kontrast

Auf der initialen Detektion von Strömungsablösung mittels des UIC-Ansatzes basierend, soll nun geprüft werden inwieweit die Anwendung einer PCA eine verbesserte Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche anhand des Bildkontrasts ermöglicht. Zunächst wird die Detektierbarkeit

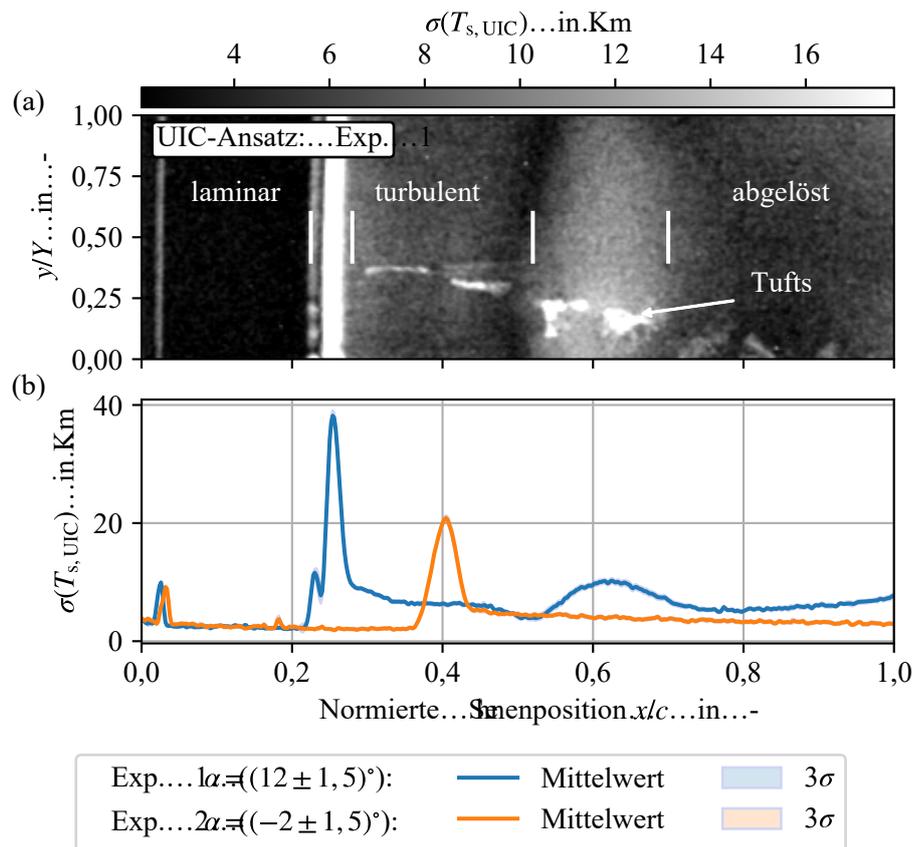


Abb. 4.4: Auswertung und Verifizierung des UIC-Ansatz für den zweiten Testfall. Obere Bildzeile: Verarbeitetes Thermogramm für das erste Experiment. Untere Bildzeile: Vergleich beider Experimente für die über den Spannweitenbereich von $y/Y = 0,4$ bis $y/Y = 0,6$ gemittelten und über die Sehnenposition aufgetragenen Auswertegröße. Der Transitionsbereich ist in beiden Experimenten anhand des lokalen Maximums erkennbar. In Exp. 1 ist der Ablösebereich durch ein lokales Maximum von $x/c = 0,52$ bis $x/c = 0,7$ sichtbar. Parameter des Windkanaluntersuchung: $Re_c = 2 \cdot 10^6$, $\alpha = (12 \pm 1,5)^\circ$ (Exp. 1) und $\alpha = (-2 \pm 1,5)^\circ$ (Exp. 2).

der mit dem UIC-Ansatz für den zweiten Testfall identifizierten Bildmerkmale bei der Auswertung der einzelnen PCs analysiert. Anschließend wird die Unterscheidbarkeit der unterschiedlichen Strömungsbereiche anhand des CNR quantifiziert. Hierbei wird die Auswertung der PCs mit dem UIC-Ansatz und dem klassischen Ansatz verglichen.

In Abb. 4.5 sind die Ergebnisbilder der ersten drei PCs (a-c) sowie des UIC-Ansatzes (d) und des klassischen Ansatzes (e) dargestellt. Weiterhin sind die Auswertefenster für die Berechnung des CNR als blaue Rechtecke eingezeichnet, die resultierenden CNRs zwischen den Strömungsbereichen sind in Tab. 4.2 angegeben. Die Auswertung beschränkt sich auf die ersten drei PCs da diese bereits 70% der Datenvarianz abbilden. In den PCs existieren in Strömungsrichtung Intensitätsgradienten, welche mit der räumlichen Verteilung der strömungsabhängigen Bildmerkmale (rote Linien) übereinstimmen. Die räumliche Verschiebung der Strömungsbereiche wird durch räumliche Intensitätsgradienten im Bereich der Transition und der Ablösung in allen dargestellten PCs abgebildet. Zudem ist insbesondere in der ersten PC ein deutlicher Bildkontrast zwischen den Strömungsbereichen erkennbar.

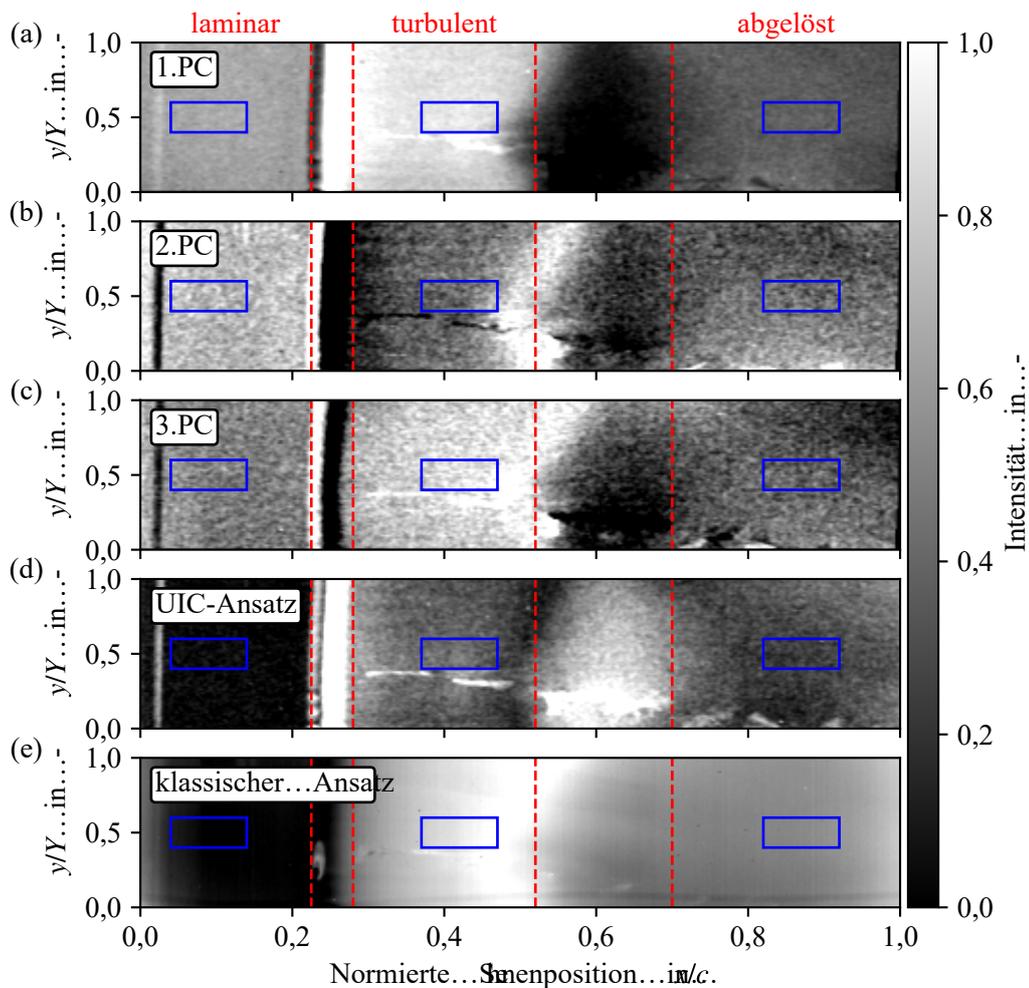


Abb. 4.5: Vergleich der Ergebnisbilder der ersten drei PCs sowie des UIC und des klassischen Signalverarbeitungsansatzes. Die dargestellten PCs weisen räumliche Intensitätsgradienten zwischen den eingezeichneten Strömungsbereichen auf. Die Auswertefenster zur Quantifizierung der Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche anhand des CNR sind als blaue Rechtecke eingezeichnet.

Für die Unterscheidung des laminaren und des turbulenten Strömungsbereiches wird mit dem klassischen Auswerteanatz das höchste CNR erreicht. Das Ergebnis bestätigt die erwartete hohe Empfindlichkeit des klassischen thermografischen Messansatzes für die Detektion der laminar-turbulenten Transition. Für die angestrebte Unterscheidung angelegter und abgelöster Strömungsbereiche wird das CNR zwischen dem turbulenten und dem abgelösten Strömungsbereich betrachtet. Hierbei weist die erste PC ein im Vergleich zum klassischen Ansatz um 100 % verbessertes CNR auf. Der UIC-Ansatz führt hingegen zu einem um 65,1 % reduzierten Kontrast. Ein wesentlicher Grund für das reduzierte CNR des UIC-Ansatzes ist, dass das Kleinsignalverhalten der Oberflächentemperaturantwort auf instationäre Anströmbedingungen ausgewertet wird und eine kleine Temperaturamplitude ein kleines Signal-Rausch-Verhältnis und damit einen kleinen CNR zur Folge hat.

Im Ergebnis der Windkanaluntersuchungen wird die Eignung der Signalverarbeitungsansätze zur eindeutigen Detektion und Lokalisierung stationärer Strömungsablösung verifiziert. Der

Tab. 4.2: Vergleich der berechneten CNRs zwischen dem laminar-turbulenten und dem turbulent-abgelösten Strömungsbereich für die ersten drei PCs, dem UIC Ansatz und dem klassischen IRT Auswerteanatz. Mit dem klassischen IRT Ansatz wird das höchste CNR zur Unterscheidung laminar-turbulenter Bereiche erreicht, während die erste PC die höchste Unterscheidbarkeit turbulent-abgelöster Bereiche ermöglicht.

Strömungsbereiche	CNR in -				
	1.PC	2.PC	3.PC	UIC-Ansatz	klassischer Ansatz
laminar-turbulent	4,51	1	2,58	4,31	10,87
turbulent-abgelöst	10,12	0,14	3,44	1,77	5,06

UIC-Ansatz ermöglicht eine initiale Detektion von Strömungsablösungen anhand physikalisch eindeutig interpretierbarer Bildmerkmale. Die Bildmerkmale sind bei der Anwendung einer PCA reproduzierbar und führen bei der Auswertung der PCs zu einem im Vergleich zum klassischen Ansatz um 100 % verbessertes CNR zwischen angelegten und abgelösten Strömungsbereichen.

4.2 Detektion und Lokalisierung stationärer Strömungsablösungen an realen WEA

Unter Anwendung des im Windkanal verifizierten Messansatzes soll nun geklärt werden inwieweit eine eindeutige Detektion und Lokalisierung von stationärer Strömungsablösung an einer realen WEA erreicht werden kann. Dafür wird zunächst das Auftreten und die Position stationärer Strömungsablösung mit Hilfe der Strömungsvisualisierung mit Tufts validiert. Bei der thermografischen Bildauswertung wird zunächst die Detektierbarkeit von Strömungsablösung sowie die Lokalisierbarkeit der Ablöseposition anhand physikalisch interpretierbarer Bildmerkmale mit dem UIC-Ansatz geprüft. Anschließend wird die erreichbare Unterscheidbarkeit angelegter und abgelöster Strömungsbereiche bei der Anwendung einer PCA quantifiziert.

4.2.1 Referenzmessung

Abb. 4.6 zeigt eine exemplarische Aufnahme der Tufts-basierten Strömungsvisualisierung. Die markierten Ablösepositionen (durchgezogene Linien) werden anhand einer verschwindenden oder negativen Ausrichtungskomponente der Tufts in Richtung der Sehne bestimmt. Die dargestellten Ablösepositionen zeigen die mittleren Ablösepositionen während der Messdauer. Ebenfalls eingezeichnet sind die zur Vorderkante verschobenen Ablösepositionen während einer Böe (gestichelte Linien), die entsprechende Abb. C.1 befindet sich im Anhang.

In Abb. 4.6 ist erkennbar, dass Strömungsablösung in Nabennähe bereits etwa in der Mitte der Sehne auftritt. In radialer Richtung verschiebt sich die Ablöseposition in Richtung der Hinterkante, weil die Profildicke abnimmt und die Strömungsgeschwindigkeit zunimmt. Zum Beispiel verschiebt sich die Ablöseposition von ca. $x/c = 0,4$ bei dem Rotorradius $r = 7$ m zu ca. $x/c = 0,68$ bei $r = 9$ m. Da das Auftreten von Böen mit einer Zunahme des Anstellwinkels einhergeht, verschiebt sich die Ablöseposition während jener Zeitbereiche zur Vorderkante. Somit wird das Auftreten

und das erwartete dynamische Verhalten der Ablöseposition bei instationären Anströmbedingungen mit Hilfe der Tufts-basierten Strömungsvisualisierung validiert.

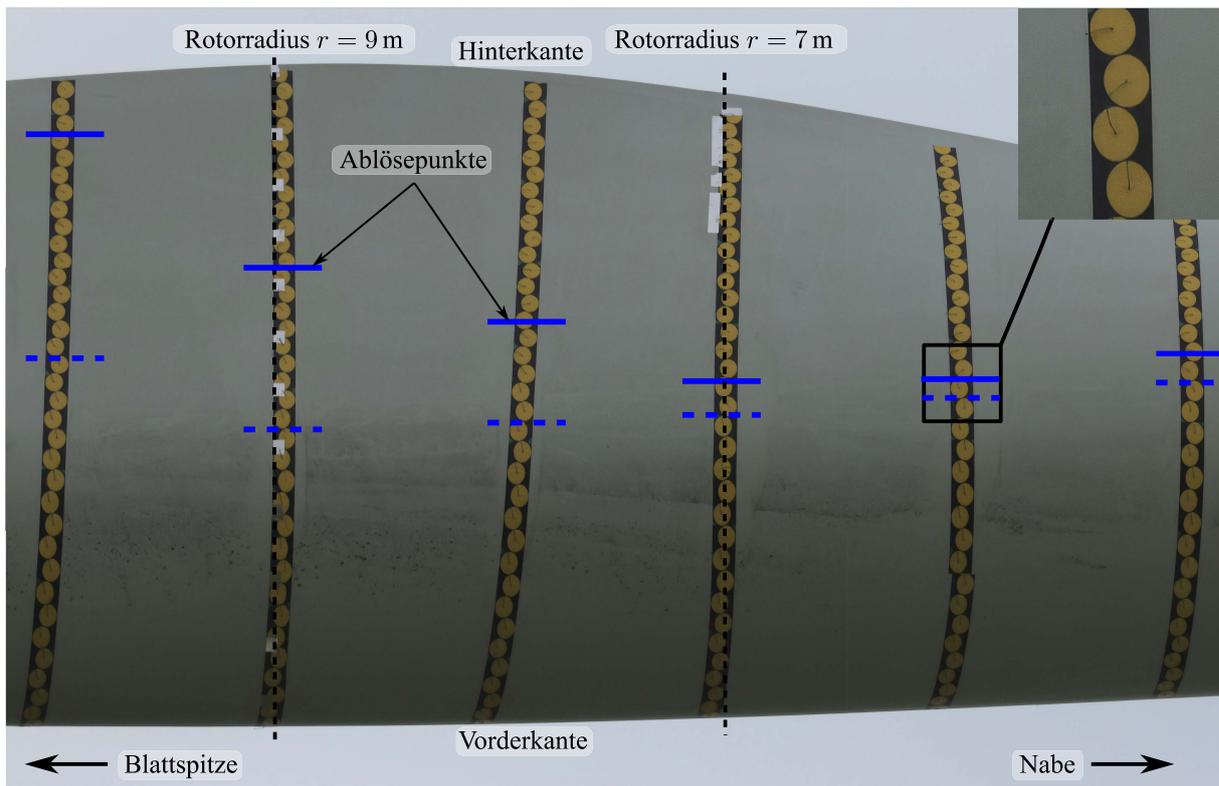


Abb. 4.6: Validierung der Ablöseposition für das Bildfeld der IR-Kamera unter Anwendung von Tufts-basierter Strömungsvisualisierung. Die durchgezogenen Linien über die Klebestreifen zeigen die Ablösepositionen bei der dargestellten Aufnahme, welche der mittleren Ablöseposition während der Messdauer entspricht. Die gestrichelten Linien zeigt die vordere Ablöseposition, welche in Abhängigkeit der instantanen Strömungsbedingungen auftreten kann. Siehe Abb. C.1 zur Darstellung der entsprechenden Aufnahme.

4.2.2 UIC-Ansatz

Bei der Anwendung des UIC-Ansatzes wird das Ziel verfolgt erstmals eine thermografische Detektion und Lokalisierung stationärer Strömungsablösung an einer nicht-skalierten WEA mittels physikalisch eindeutig interpretierbarer Bildmerkmale zu realisieren. Analog zu der Auswertung der Windkanalexperimente in Abschnitt 4.1.2 wird das Ergebnis des UIC-Ansatzes mit dem der klassischen Auswertung zeitlich gemittelter Thermogramme verglichen. Die Ergebnisse der IRT Signalverarbeitung der Freifeldmessung mit dem UIC-Ansatz (oben) und dem klassischen Ansatz (unten) sind in Abb. 4.7 dargestellt. Abb. 4.7a und Abb. 4.7c zeigen die Ergebnisbilder. Darüber hinaus zeigen Abb. 4.7b und Abb. 4.7d die Signalverläufe der Auswertegrößen $\sigma(T_{s,UIC})$, \bar{T}_s mit den jeweiligen 3σ -Konfidenzintervallen über die normierte Sehnenposition an dem Rotorradius $r = 9$ m. Hierbei ist zu beachten, dass Quereinflüsse wie Querströmungen oder die sichtbare Rotorblattverschmutzung nicht betrachtet werden, weil der Auswertebereich or-

thogonal zur Vorderkante verläuft und der Verschmutzungsgrad ab ca. 40 % der Überströmlänge sehr gering und näherungsweise isotrop ist.

Als erstes wird die Identifizierbarkeit des abgelösten Strömungsbereichs mit dem UIC-Ansatz geprüft. In Abb. 4.7a ist der Beginn des abgelösten Strömungsbereichs anhand von Minima der Auswertegröße $\sigma(T_{s,UIC})$ über den gesamten Bildausschnitt lokalisierbar (rote Linie). Die Lokalisierung des abgelösten Strömungsbereichs weist eine gute Übereinstimmung mit dem Ergebnis der Tufts-Strömungsvisualisierung in Abb. 4.6 (durchgezogene blaue Linie) auf. Zusätzlich entspricht der Verlauf der Auswertegröße $\sigma(T_{s,UIC})$ in Abb. 4.7b den aus der Theorie abgeleiteten strömungsspezifischen Merkmalen des thermischen Antwortverhaltens für WEA-typische instationäre Anströmbedingungen, bzw. den Merkmalen des thermischen Antwortverhaltens bei den Windkanalexperimenten mit Strömungsablösung, siehe Abb. 4.4d. Der Transitions- und Ablösebereich ist anhand von Maxima von $\sigma(T_{s,UIC})$, induziert durch die räumliche Dynamik der Transitions- und Ablöseposition, erkennbar. Im Vergleich zu den Windkanalexperimenten ist bei der Auswertung mit dem UIC-Ansatz kein turbulenter Strömungsbereich sichtbar. Der Grund für die mangelnde Sichtbarkeit eines turbulenten Strömungsbereichs ist die große räumliche Verschiebung der Strömungsbereiche als Folge signifikanter Änderungen der Anströmbedingungen während der Messung. Innerhalb des abgelösten Strömungsbereiches ab $x/c = 0,66$ nimmt $\sigma(T_{s,UIC})$ aufgrund von anwachsenden Wirbelstrukturen zu. Das 3σ -Konfidenzintervall mit einer mittleren Breite von 1,6 mK belegt weiterhin, dass die genannten Merkmale zur Erkennung der unterschiedlichen Strömungsbereiche nicht auf Unsicherheiten zurückzuführen sind. Damit ist die Eignung des UIC-Ansatzes zur eindeutigen Detektion stationärer Strömungsablösung an einer in Betrieb befindlichen WEA nachgewiesen. Zudem ermöglicht der UIC-Ansatz die Identifizierung der verschiedenen Strömungsbereiche sowie die Bewertung ihrer räumlichen Dynamik. Die räumliche Ausdehnung der verschiedenen Strömungsbereiche, welche mit dem UIC-Ansatz bei dem Rotorradius $r = 9$ m bestimmt wurden, sind in Tab. 4.3 aufgeführt.

Tab. 4.3: Mit dem UIC-Ansatz bestimmte räumliche Ausdehnung der Strömungsbereiche für den Rotorradius $r = 9$ m.

Strömungsbereiche	räumliche Ausdehnung in x/c
laminar	[0–0,17]
lam.-turb. Transition	[0,17–0,46]
turbulent	-
Ablöseposition	[0,46–0,66]
abgelöst	[0,66–1]

Schließlich werden die Ergebnisse des UIC-Ansatzes mit den Ergebnissen des klassischen IRT-Ansatzes verglichen. In Abb. 4.4c ist der Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung anhand des Bildkontrasts sichtbar, ein abgelöster Strömungsbereich ist jedoch nicht eindeutig erkennbar. In Abb. 4.4d ist der Bereich der Transition von laminarer zu turbulenter Strömung durch eine Abnahme der Temperatur \bar{T}_s sichtbar, welche durch die erhöhte konvektive Kühlung bei turbulenter Überströmung verursacht wird. Nach der Methode von Dollinger et al. [25], stellt die Stelle mit dem maximalen Temperaturgradienten $d(\bar{T}_s)/d(xc^{-1})$ bei ca. $x/c = 0,38$ die zeitlich

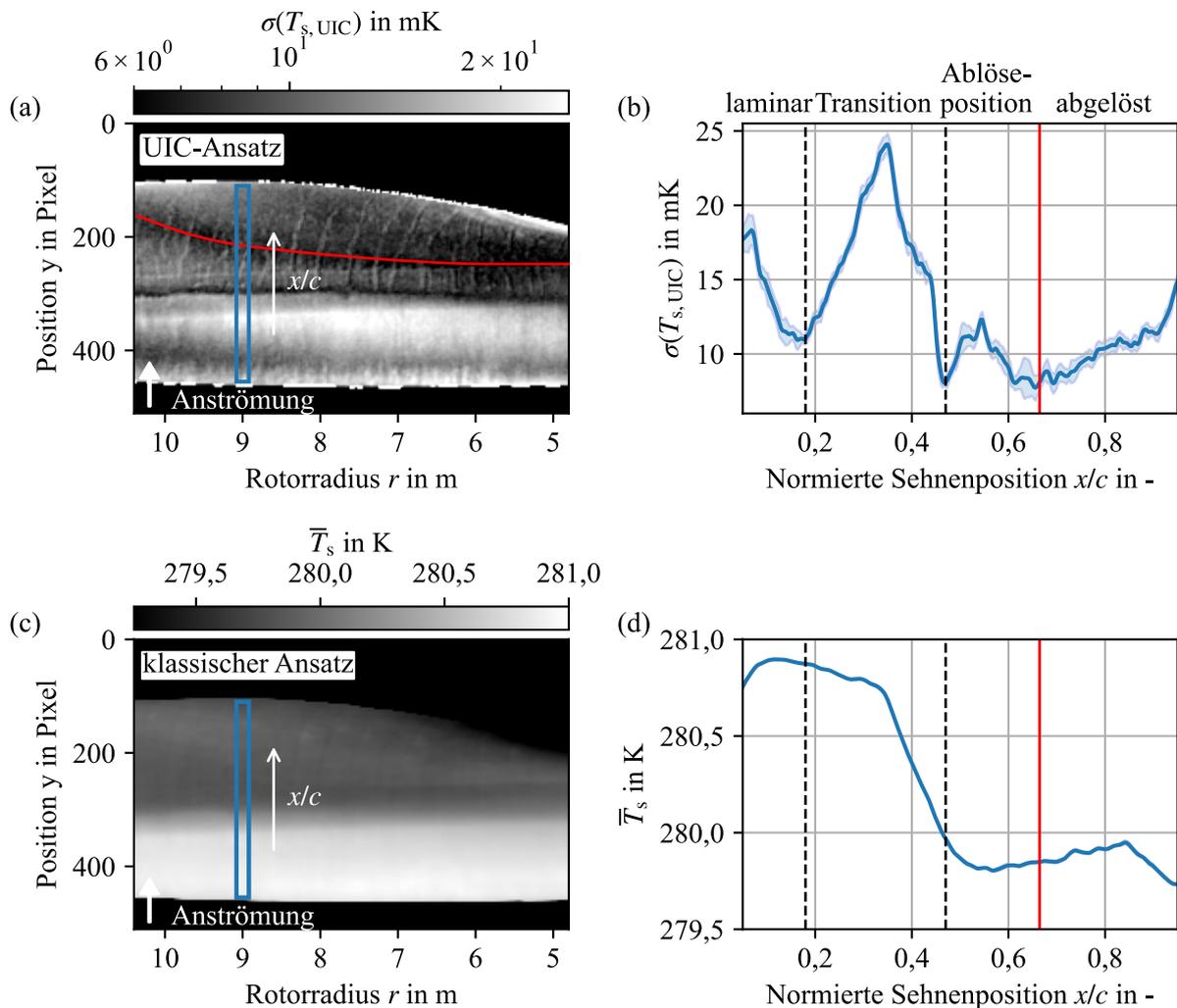


Abb. 4.7: Verarbeitete Thermogramme (a,c) und Signalverläufe mit eingezeichneten 3σ -Konfidenzintervall (b,d) am Rotorradius $r = 9$ m. Obere Reihe: Turbulente Strömungsablösung wird mit dem UIC-Ansatz anhand des Bildkontrasts (a) und der Identifikation charakteristischer Ablösemerkmale im Signalverlauf (c) detektiert. Das lokale Maximum bei $x/c = [0,46 - 0,66]$ zeigt den Bereich der Ablöseposition, während der ansteigende Signalverlauf ab $x/c = 0,66$ den abgelösten Strömungsbereich anzeigt. Untere Reihe: Der klassische Signalverarbeitungsansatz ermöglicht die Unterscheidung zwischen den zeitlich gemittelten laminaren und turbulenten Strömungsbereichen. Die Grenzen der unterschiedlichen Strömungsbereiche sowie der abgelöste Bereich sind nicht deutlich erkennbar. Die Breite des Konfidenzintervalls beträgt weniger als 9 mK, und ist daher nicht erkennbar.

gemittelte Position der laminar-turbulenten Transition dar. Das lokale Temperaturmaximum bei $x/c = 0,83$ deutet auf turbulente Strömungsablösung hin, da der mittlere Wärmeübergangskoeffizient innerhalb der abgelösten Strömungsbereiche zunimmt. Aufgrund der Empfindlichkeit des klassischen IRT-Ansatzes hinsichtlich strömungsunabhängiger Quereinflüsse wird jedoch keine eindeutige Detektion von Strömungsablösung erreicht. Zudem reduzieren die räumliche Verschiebung der Transitions- und Ablöseposition sowie die zeitliche Mittelung der Thermogramme die Temperaturgradienten zwischen den verschiedenen Strömungsbereichen.

Im Ergebnis sind die Auswertungen des UIC- und des klassischen IRT-Ansatzes in Bezug auf die Identifizierung von Strömungsregionen konsistent. Das Ziel einer eindeutigen Detektion und Lokalisierung abgelöster Strömungsbereiche mit IRT wird durch die Anwendung des UIC-Ansatzes erreicht.

4.2.3 PCA

Durch die Anwendung einer PCA wird eine verbesserte Unterscheidbarkeit angelegter und abgelöster Strömungsbereiche angestrebt. In Abb. 4.8 sind die normierten Intensitätsverteilungen der ersten drei PCs, sowie zum Vergleich die verarbeiteten Ergebnisbilder des UIC-Ansatzes sowie des klassischen IRT-Ansatzes dargestellt. Zunächst wird geprüft, ob die mit dem klassischen IRT-Ansatz und dem UIC-Ansatz anhand physikalischen Vorwissens identifizierten strömungsabhängigen Bildmerkmale in den PCs erkennbar sind. Die Unterscheidbarkeit der erkennbaren Bildmerkmale wird anhand des CNR der eingezeichneten Auswertefenster (blaue Rechtecke) quantifiziert. In Tab. 4.4 sind die berechneten CNRs und die Differenzwerte der über die Auswertefenster gemittelten Intensitäten $dI_{a,b}$ zusammengefasst.

Tab. 4.4: Vergleich der berechneten CNRs sowie der Intensitätsdifferenz $dI_{a,b}$ zwischen dem im zeitlichen Mittel laminar-turbulenten und dem turbulent-abgelösten Strömungsbereich für die ersten drei PCs, dem UIC Ansatz und dem klassischen IRT Auswerteansatz bei der Messung an einer realen WEA. In Übereinstimmung zu dem Ergebnis der Windkanalmessung wird mit dem klassischen IRT Ansatz das höchste CNR zur Unterscheidung laminar-turbulenter Bereiche erreicht, während die Auswertung der ersten PC zu einer verbesserten Unterscheidbarkeit turbulent-abgelöster Bereiche führt.

Ansatz	laminar-turbulent		turbulent-abgelöst	
	CNR in -	$dI_{a,b}$ in -	CNR in -	$dI_{a,b}$ in -
1. PC	10,17	0,62	3,98	0,26
2. PC	0,71	0,1	0,21	0,03
3. PC	1,74	0,25	2,46	0,4
UIC-Ansatz	1,26	0,13	0,93	0,09
klassischer Ansatz	53,1	0,59	0,26	0,01

Die anhand der PCs klar erkennbaren Bildmerkmale sind die zeitlich gemittelte laminar-turbulente Transition (in Abb. 4.8e markiert), die Ablöseposition (Bereich zwischen roten Linien) und der abgelöste Strömungsbereich (durchgezogene rote Linie). Die zeitlich gemittelte Transitionsposition ist in an allen drei PCs anhand von Intensitätsgradienten in Strömungsrichtung bei etwa 40 % der Überströmlänge als dominierendes Bildmerkmal erkennbar. Zwar ist die laminar-turbulente Intensitätsdifferenz in der ersten PC am höchsten, allerdings führt die hohe Varianz

der Intensitäten zu einem im Vergleich zum klassischen Ansatz um 80 % reduzierten CNR. Somit wird das Ergebnis der Windkanalmessung bestätigt, wonach die Anwendung der PCA bei den untersuchten Messbedingungen zu keiner verbesserten Unterscheidbarkeit zwischen im zeitlichen Mittel laminaren und turbulenten Strömungsbereichen führt.

Im für das Auftreten von Strömungsablösung relevanten Bereich in der Nähe der Hinterkante liegt in der ersten und der dritten PC ein sprunghafter Anstieg der Bildintensität in Strömungsrichtung vor. Im Ergebnis resultieren jeweils ein flächenhafter Bildbereich mit erhöhter bzw. reduzierter Intensität. Da die räumliche Ausdehnung der Bildbereiche mit dem anhand des UIC-Ansatzes identifizierten bzw. mittels der Tufts validierten abgelösten Strömungsbereichs sowie dem Bereich der Ablöseposition übereinstimmen, werden die genannten Bildbereiche als Ablösebereich bzw. abgelöst identifiziert. In beiden genannten PCs ist die turbulent-abgelöste Intensitätsdifferenz im Vergleich zum klassischen Ansatz um ein vielfaches erhöht. Mit dem CNR wird die verbesserte Unterscheidbarkeit im Mittel turbulent-abgelöster Bereiche um 1430 % in der ersten PC und 846 % in der dritten PC quantifiziert. Somit wird die Eignung der Anwendung einer PCA für eine Steigerung der Unterscheidbarkeit angelegter und abgelöster Strömungsbereiche an realen WEA nachgewiesen.

4.3 Validierung der geometrischen Zuordnung

Zur Lokalisierung der Ablöseposition auf der 3D-Geometrie der Rotorblattoberfläche, ist eine geometrische Zuordnung der 2D-Bilddaten auf die 3D-Geometrie des Rotorblatts erforderlich. Hierfür wird der geometrische Zuordnungsansatz von Dollinger et al. [26] mit Hilfe von Positionsmarkern auf dem untersuchten Rotorblatt für die radiale Position $r = 9\text{ m}$ verifiziert und hinsichtlich der verbleibenden Positionsabweichungen bei der vorgestellten Freifeldmessung quantifiziert.

Abb. 4.9 zeigt den Vergleich der absoluten Sehnenpositionsabweichungen zwischen den im Bild ermittelten Markerpositionen für Auswertungen mit und ohne geometrische Zuordnung in den Einheiten mm und Prozent der Sehnenlänge (%). Die zugeordneten Positionen weisen im Vergleich zu den Positionen ohne geometrische Zuweisung geringere Abweichungen von den Referenzmarkierungen auf der Rotorblattoberfläche auf. Im Mittel beträgt die Abweichung nach der geometrischen Zuordnung nur 39 mm, während die Abweichung ohne geometrische Zuordnung im Mittel 205 mm beträgt. Die maximale Abweichungen tritt an der Sehnenposition mit der größten Rotorblattstärke bei $x/c = 0,25$ auf. Hier ermöglicht die geometrische Zuordnung eine Reduktion der Abweichung zwischen den im Bild ermittelten Markerpositionen und der wahren Position der Marker auf der Rotorblattoberfläche von 321 mm (10,7 %c) auf 69 mm (2,3 %c). Damit wird sowohl die Eignung der geometrischen Zuordnung zur Reduktion systematischer Abweichungen bei der Zuordnung von Bildpunkten zur Profilgeometrie an Windenergieanlagen nachgewiesen als auch die maximale verbleibende Abweichung nach der geometrischen Zuordnung für die gegebene Messanordnung auf 69 mm (2,3 %c) quantifiziert. Die verbleibende Abweichung resultiert aus Unsicherheiten hinsichtlich der geometrischen Anordnung zwischen dem Rotorblatt und dem Messsystem. Demnach lässt sich die Güte der geometrischen Zuord-

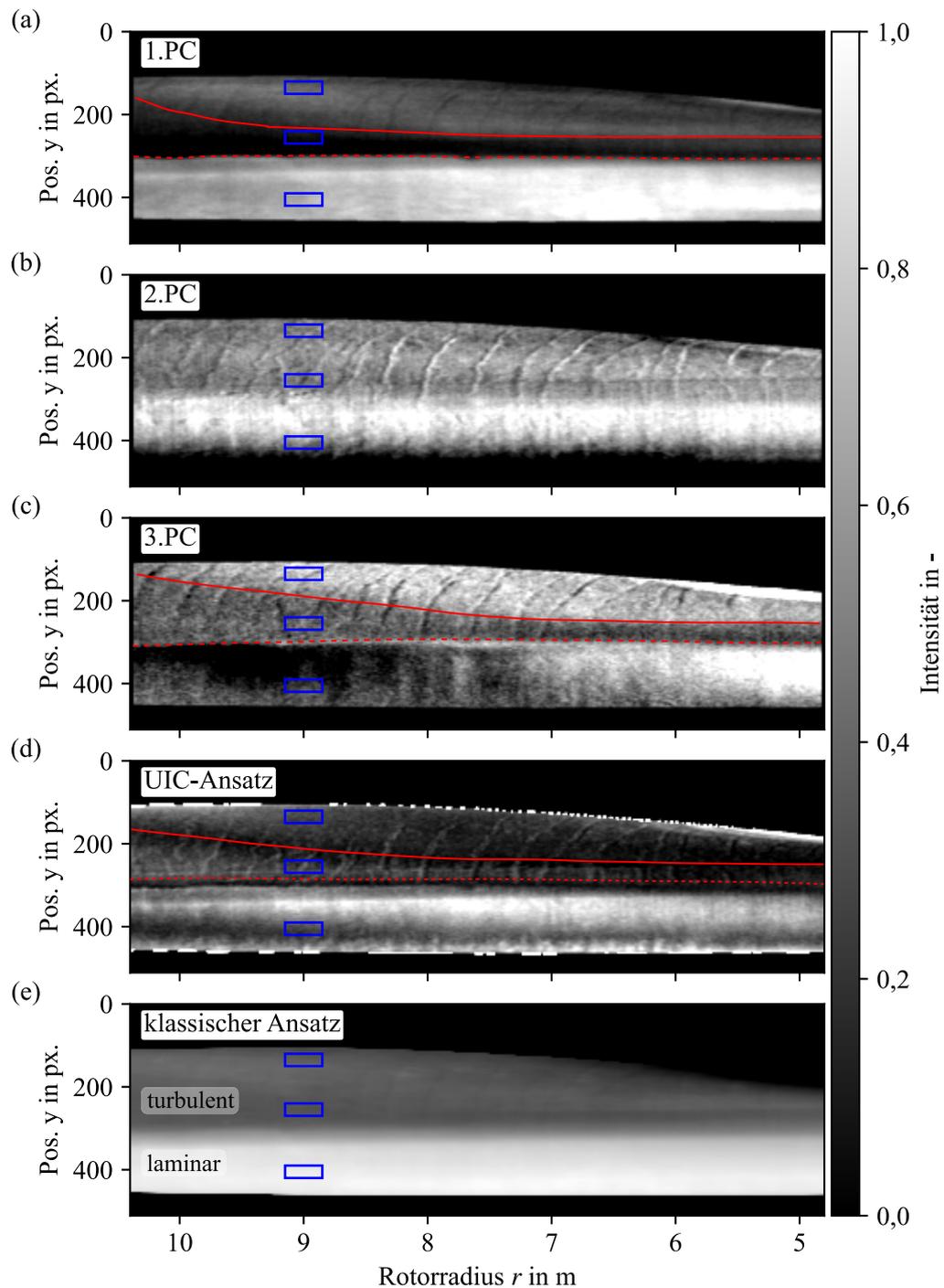


Abb. 4.8: Vergleich der Unterscheidbarkeit der unterschiedlichen Strömungsbereiche bei der Anwendung der verschiedenen Signalverarbeitungsansätze bei der Freifeldmessung zur Erfassung stationärer Strömungsablösung. Die eingezeichneten blauen Rechtecke zeigen die Auswertefenster zur Berechnung des CNR zwischen den Strömungsbereichen. In der ersten und dritten PC wird ein CNR von 3,98 und 2,46 zwischen dem turbulenten und abgelösten Strömungsbereich erreicht und somit eine deutliche Detektierbarkeit von Strömungsablösung realisiert.

nung durch eine verbesserte Erfassung der geometrischen Anordnung zukünftig noch weiter verbessern.

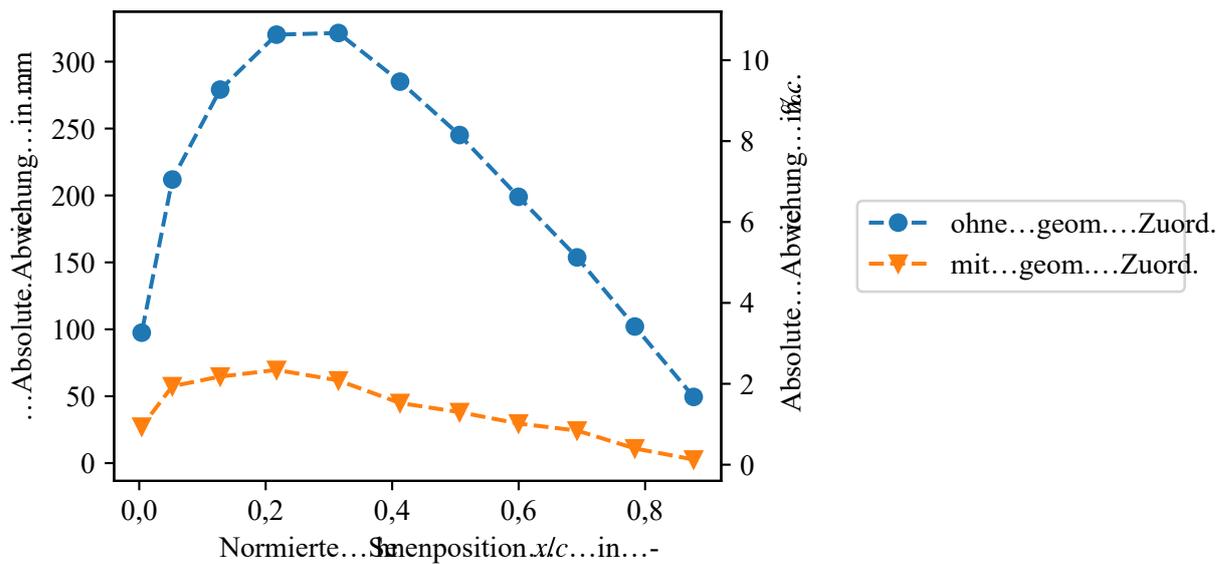


Abb. 4.9: Verifizierung der geometrischen Zuordnung. Vergleich der absoluten Abweichungen zwischen den Referenzmarkerpositionen und den Markerpositionen im Bild für die Auswertung mit und ohne geometrische Zuordnung. Bei der vorgestellten Freifeldmessung beträgt die maximale Abweichung nach der geometrischen Zuordnung 2,3 %.

Abschließend wird die in Abb. 4.7b ermittelte Ablöseposition von 66% c am Rotorradius von 9 m der Geometrie der Rotorblattoberfläche zugeordnet. Abb. 4.10 zeigt die Rotorblattgeometrie sowie den Vergleich zwischen der im Bild bestimmten Ablöseposition und der unter Anwendung des Zuordnungsalgorithmus korrigierten Ablöseposition. Im Ergebnis wird nach der geometrischen Zuordnung eine Ablöseposition von 61% c für den Rotorradius von 9 m bestimmt.

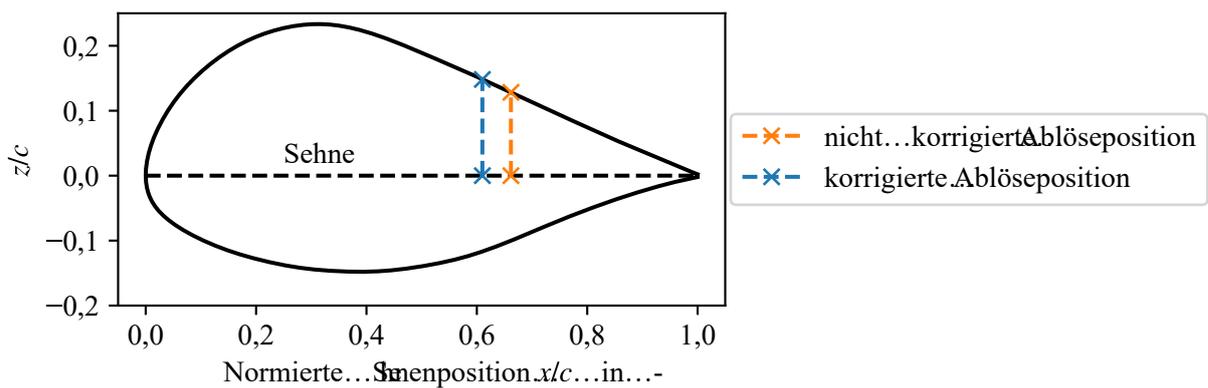


Abb. 4.10: Vergleich der im Bild bestimmten Ablöseposition und der korrigierten Ablöseposition unter Verwendung des geometrischen Zuordnungsalgorithmus für die Rotorblattgeometrie bei einem Rotorradius von 9 m.

5 Instationäre Strömungsablösung

Im Nachfolgenden Kapitel wird das Potential von IRT zur Detektion und Lokalisierung instationär auftretender Strömungsablösung sowie zur Erfassung zeitlich veränderlicher Transitionspositionen bei WEA-Rotorblättern untersucht. Konkret wird in Abschnitt 5.1 bestimmt ob und mit welcher spatio-temporalen Auflösung das Auftreten instationärer Strömungsablösung sowie dynamische Transitionspositionen bei einem sprunghaften Anstieg der Windgeschwindigkeit während einer Böe thermografisch erfassbar sind. Hierfür wird die thermische Antwortzeit bei einer sprunghaften Änderung der Anströmung in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden absorbierten solaren Strahlungsleistung mit Hilfe einer numerischen Simulation abgeschätzt. Anschließend wird in Abschnitt 5.2 die In-Prozess-Fähigkeit des in Abschnitt 2.3.2 konzipierten Signalverarbeitungsansatz zur Detektion und Lokalisierung instationärer Strömungsablösungen bei Freifeldexperimenten geprüft. Dabei werden insbesondere die spatio-temporalen Auflösungsgrenzen des Messansatzes in Abhängigkeit der Messbedingungen an einer realen WEA geklärt.

5.1 Abschätzung der thermischen Antwortzeit

Im Fall einer sprunghaften Strömungsänderung erfährt das Rotorblatt eine instantane Änderung der thermischen Randbedingungen. Bei einem thermisch idealen Rotorblattmaterial mit einer thermischen Zeitkonstante von näherungsweise null würde die sprunghafte Strömungsänderung zu einer instantanen Änderung der Oberflächentemperatur führen. Aufgrund der Fähigkeit des Materials, Wärmeenergie zu speichern weist die Sprungantwort der Oberflächentemperatur hingegen ein zeitlich verzögertes Antwortverhalten auf. Um die zeitlichen Auflösungsgrenzen der IR thermografischen Strömungsvisualisierung beim Auftreten instationärer Strömungsablösung abzuschätzen, soll die thermische Antwortzeit t_{CNR} der Oberfläche bis zum Erreichen eines CNR von eins zwischen Bereichen mit angelegter und abgelöster Strömung bei der Auswertung von Differenzbildern für variable solare Strahlungsleistungen bestimmt werden. Die ermittelten thermischen Antwortzeiten werden mit der minimalen Abtastrate bei Freifeldmessungen verglichen. Das Abtastintervall beträgt $t_s = 3,3$ s und entspricht der Periodendauer einer Rotorumdrehung der in dieser Arbeit vermessenen WEA bei Nennleistung. Im Ergebnis wird das Potential des DIT-Ansatzes zur Lokalisierung instationärer Strömungsablösung mit der messsystemseitig (eine Aufnahme pro Umdrehung) maximalen zeitlichen und räumlichen Auflösung geklärt. Darauf aufbauend wird das Potential einer Erweiterung des Messsystems bezüglich einer kontinuierlichen Nachverfolgung des Rotorblattes zur Steigerung der zeitlichen Auflösung abgeschätzt.

Grundsätzlich gilt für das überströmte Rotorblatt $Bi > 1$ (vgl. Abschnitt 2.2.1.2), d. h. der Wärmeleitwiderstand im Material ist wesentlich größer als der Wärmeübergangswiderstand zum umgebenden Medium. Somit ist die transiente Temperaturänderung im Rotorblatt orts- und zeitabhängig und kann deshalb nicht durch einen „lumped thermal capacity“-Ansatz beschrieben werden [51]. Zur Berechnung von t_{cnr} wird das thermische Verhalten der Rotorblattoberfläche bei einer sprunghaften Strömungsänderung mit der Wärmeleitungsgleichung beschrieben und diese für eine vereinfachte 2D-Rotorblattgeometrie mittels einer Finite-Differenzen-Methode gelöst. Da die zur Lösung der Wärmeleitungsgleichung (Gl. 2.15) benötigten Parameter zum Teil nur grob abgeschätzt werden können, wird für die Parameter eine Ober- und Untergrenze abgeschätzt und nachfolgend die Grenzwerte für t_{cnr} bestimmt.

5.1.1 Thermische Modellierung

Als Bilanzraum der thermische Modellierung wird ein 2D-Rotorblattabschnitt gewählt. Hinsichtlich der Geometrie und des strukturellen Aufbaus werden folgende Annahmen getroffen:

- Auf Grundlage der geringen Krümmung der Flügelprofile im äußeren Rotorblattbereich, wird die Saugseite eines 2D-Profilschnitts durch eine ebene 2D-Platte approximiert, siehe Abb. 5.1.
- Da das oberflächennahe Rotorblattmaterial eine geringe Temperaturleitfähigkeit a aufweist und lediglich kurze Ausgleichszeiten betrachtet werden, treten Temperaturänderungen ausschließlich in ebenen Bereich auf. Darauf basierend beschränkt sich der Bilanzraum auf die obersten beiden Materialschichten und es wird die thermodynamische Vereinfachung eines halbbunendlichen Körpers getroffen. Den oberen Materialschichten realer Rotorblätter entsprechend ist die Platte zweischichtig aufgebaut. Die Platte besteht aus PU-basierten Lack und darunterliegend aus GFRK mit jeweils konstanten Schichtdicken.
- Die thermischen Materialparameter sind temperaturunabhängig und isotrop. Thermische Kontaktwiderstände zwischen den beiden Materialschichten werden nicht berücksichtigt.
- Im Bilanzraum existieren keine Wärmequellen oder Wärmesenken.

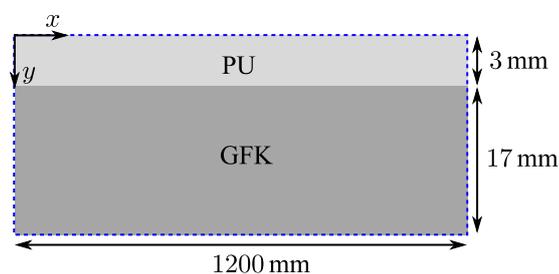


Abb. 5.1: Für die numerische Lösung der Wärmeleitungsgleichung werden die äußeren beiden Materialschichten der Saugseite des in Abb. 2.11 dargestellten Profilschnitts durch eine 2D-Platte approximiert. Gemäß der Sehnenlänge des Rotorblattes der in dieser Arbeit vermessenen WEA bei dem Rotorradius $r = 28,7$ m beträgt die Breite des Bilanzraums 1,2 m.

Für die getroffenen Annahmen vereinfacht sich die allgemeine Wärmeleitungsgleichung (Gl. 2.15) zu

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}. \quad (5.1)$$

Zur Bestimmung der Temperaturverteilung $T(x, y, t)$ anhand der Lösung von Gl. 5.1 müssen eine Anfangsbedingung und vier Randbedingungen spezifiziert werden. Die Anfangsbedingung lautet

$$T(x, y, t = 0) = T_{\text{stat}}, \quad (5.2)$$

und entspricht der Temperaturverteilung T_{stat} im quasistationären Zustand für die Strömungsbedingungen zu Beginn des Experiments. Es sei erwähnt, dass die getroffenen Geometrieannahmen zu einer Abweichung der initialen Temperaturverteilung im Vergleich zu einem realen Rotorblatt führen. Der linke und rechte Rand des Bilanzraums werden als adiabat betrachtet, es resultieren die folgenden Randbedingungen 2. Art:

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{x=0, y} = -k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{x=c, y} = 0. \quad (5.3)$$

Am überströmten oberen Rand setzt sich der Wärmestrom aus dem konvektiven Anteil und dem Anteil der absorbierten solaren Strahlungsleistung gemäß

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{x, y=0} = h_a(x, t) (T(x, y = 0, t) - T_{\text{ad}}) - \dot{q}_{s, \text{abs}}, \quad (5.4)$$

zusammen. Auf der Unterseite führt freie Konvektion zu einem Wärmestrom in die Umgebung und es gilt

$$k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{x, y=0} = h_i(x, t) (T(x, y = 0, t) - T_i). \quad (5.5)$$

Hierbei bezeichnet T_i die Temperatur im inneren des Rotorblattes und h_a, h_i den äußeren bzw. inneren Wärmeübergangskoeffizienten an der Ober- und Unterseite des Bilanzraums. Im Fall einer Änderung der Strömungsbedingungen ändert sich der äußere Wärmeübergangskoeffizient und somit die thermische Randbedingung an der Oberseite.

Aus der vereinfachten Wärmeleitungsgleichung (Gl. 5.1) sowie der Randbedingungen (Gl. 5.3 – Gl. 5.5) geht hervor, dass die Temperatur im Bilanzraum neben den Variablen x, y, t von den Parametern $a, k, h_a, h_i, \dot{q}_{s, \text{abs}}, T_{\text{ad}}, T_i$ abhängt und es gilt

$$T = f(x, y, t, a, k, h_a, h_i, \dot{q}_{s, \text{abs}}, T_{\text{ad}}, T_i). \quad (5.6)$$

Zur Lösung von Gl. 5.1 erfolgt im Weiteren die Identifikation der benannten Parameter.

5.1.2 Parameteridentifikation

Die zu definierenden Parameter unterteilen sich in Materialparameter, die Wärmeübergangskoeffizienten sowie Annahmen bezüglich der Umgebungstemperaturen und der absorbierten solaren Strahlungsleistung.

Thermische Materialparameter Als thermische Materialparameter für den PU-basierten Lack und GRFK werden die in Tab. 2.2 aufgeführten Werte verwendet. Die Materialparameter werden als gleichverteilt mit einer relative Abweichung der Grenzwerte von 5% angenommen. Bei einer schichtdickengewichteten Mittelung der Materialparameter, einer charakteristischen Länge von $L^* = 10$ mm sowie einer angenommenen maximalen Ausgleichszeit von $t = 30$ s ergibt sich die Fourier-Zahl $Fo = 0,069 \pm 0,006$. Da $Fo \ll 1$, übersteigt die thermische Speicherungsrate die thermische Transportrate um ein vielfaches. Nach Seidel [81] kann die thermische Diffusionslänge l_{diff} mit $l_{\text{diff}} \approx \sqrt{Fo} L^* \approx 2,6$ mm quantifiziert werden. Somit wird die Annahme bestätigt, wonach die Temperaturänderungen nur in der obersten Materialschicht auftreten.

Wärmeübergangskoeffizienten Eine sprunghafte Strömungsänderung wirkt sich auf den äußeren Wärmeübergangskoeffizienten h_a aus und führt zu einer Änderung der thermischen Randbedingung an der Rotorblattoberfläche. Für die Bestimmung der thermischen Antwortzeit ist h_a somit der kritische Parameter. Die Abschätzung des Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit der Sehnenposition erfolgt für ein überströmtes DU 96-W-180-Flügelprofil für Strömungsbedingungen mit und ohne Strömungsablösung unter Anwendung einer „Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)“-Strömungssimulationen mit der Software Ansys Fluent. Die wichtigsten Parameter der Strömungssimulation sind:

- (1) Geometrie: DU 96-W-180-Flügelprofil mit $c = 600$ mm in einem zweidimensionalen quadratischen Windkanal mit der Kantenlänge von $28c$ und einem halbkreisförmigen Einlass, siehe Abb. B.1.
- (2) Gitternetz: Das Gitternetz besteht aus ca. $5 \cdot 10^5$ primär dreieckigen Gitterelementen. Hinsichtlich der Größe der Gitterelemente teilt sich der Rechenraum in einen flügelprofilfernen Bereich und einen flügelprofilnahen Bereich. Im flügelprofilfernen Bereich beträgt die Kantenlänge der Gitterelemente 50 mm und im flügelprofilnahen Bereich 5 mm. Um Grenzschichtphänomene zu erfassen, reduziert sich die Kantenlänge der Gitterelemente bis auf 0,04 mm am Rand des Flügelprofils, siehe Abb. B.1.
- (3) Turbulenzmodell: Gemäß der Empfehlung der Ansys-Dokumentation wird zur Erfassung von Strömungsablösung das von Ansys entwickelte „Generalized $k-\omega$ “-Turbulenzmodell verwendet [31]. Zur Abbildung der laminar-turbulenten Transition wird zusätzlich das „Gamma-Re Transitions“-Modell verwendet.
- (4) Randbedingungen: Als Anströmgeschwindigkeit wird 78 ms^{-1} ($Re_c = 2,5 \cdot 10^6$) und als Anstellwinkel 4° , für die Simulation ohne Ablösung, sowie 18° , für die Simulation mit Strömungsablösung, gewählt. Weiterhin gilt an allen Oberflächen die Haftbedingung. In

Abb. B.2 sind die berechneten Geschwindigkeitsfelder für beide Strömungsbedingungen dargestellt. Als thermische Randbedingung wird eine feste Temperaturdifferenz von 5 K zwischen dem Flügelprofil und der Strömung vorgegeben. Der äußere Wärmeübergangskoeffizient wird mit $h_a = \dot{q}_k / \Delta T$ bestimmt. Hierbei bezeichnet ΔT die vorgegebene Temperaturdifferenz zwischen dem Flügelprofil und der Strömung, die konvektive Wärmestromdichte \dot{q}_k wird hingegen durch den CFD-Code berechnet.

Es sei an dieser Stelle explizit erwähnt, dass das verwendete Simulationsmodell nur eine erste Näherung bezüglich des Verlaufs des äußeren Wärmeübergangskoeffizienten ermöglicht. Ein akkurate Abbildung der komplexen Strömungsstrukturen in abgelösten Strömungsbereichen erfordert die Anwendung Turbulenzskalen auflösender Methoden wie Detached-Eddy-Simulationen oder Large-Eddy-Simulation. Aufgrund der Komplexität der genannten Methoden wurden diese im Rahmen dieser Arbeit nicht verfolgt. Stattdessen wird die grundsätzliche Plausibilität der berechneten Wärmeübergangskoeffizienten mit Angaben aus der Literatur sowie empirischen Berechnungsvorschriften geprüft.

In Abb. 5.2 ist der Verlauf von h_a über die normierte Sehnenposition für die Anstellwinkel $\alpha = 4^\circ$ und $\alpha = 18^\circ$ aufgetragen. Für $h_a(\alpha = 4^\circ)$ ist die laminar-turbulente Transition bei $x/c = 0,25$ anhand des sprunghaften Anstiegs zu erkennen. Für $h_a(\alpha = 18^\circ)$ verschiebt sich die Transitionsposition zur Vorderkante. Der Ablösebeginn ist anhand des Minimums von h_a bei $x/c = 0,75$ sichtbar. Bei beiden Anstellwinkeln stimmen die qualitativen Verläufe von h_a mit den in Abschnitt 2.2.1.1 aus Theorie und Experimenten abgeleiteten erwarteten Verläufen überein. Die quantitativen Kriterien zur Überprüfung der Plausibilität des Wertebereichs der berechneten h_a -Verläufe sind in Tab. 5.1 zusammengetragen. Anhand der geringen Abweichung zwischen den simulierten Werten von h_a und den aufgeführten Referenzwerten wird die Plausibilität des simulierten Wertebereichs bestätigt.

Tab. 5.1: Quantitativer Plausibilitätsnachweis des Wertebereichs der simulativ bestimmten h_a -Verläufe. Als Kriterien werden die simulierten mittleren Wärmeübergangskoeffizienten des laminaren und turbulenten Bereichs mit den von Gnielinski [46] entwickelten Berechnungsvorschriften zur Ermittlung der mittleren Wärmeübergangskoeffizienten überströmter Einzelkörper verglichen. Die für die räumliche Mittelung gewählten normierten Sehnenbereiche sind in Klammern angegeben. Zudem wird der berechnete prozentuale Abfall des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen dem Ablösebeginn $h_{a,AB}$ und dem Ablösepunkt $h_{a,AP}$ mit den experimentellen Daten von Douglas et al. [55] gegenübergestellt.

Plausibilitätskriterium	Referenzwert	Simulation ($\alpha = 4^\circ$)	Simulation ($\alpha = 18^\circ$)
$\bar{h}_{a,lam}$ in $W m^{-2} K^{-1}$	35,4	40,1 ($x/c = [0 - 0,25]$)	-
$\bar{h}_{a,turb}$ in $W m^{-2} K^{-1}$	74,4	83 ($x/c = [0,32 - 1]$)	88,1 ($x/c = [0,32 - 0,75]$)
$\left(\frac{h_{a,AB} - h_{a,AP}}{h_{a,AB}} \right) \cdot 100$ in %	30,7	-	30,1

Bei der Berechnung des thermischen Antwortverhaltens auf die veränderlichen Strömungsbedingungen wird die thermische Antwortzeit t_{cnr} maßgeblich durch die Änderung von h_a im Transitionsbereich für $\alpha = 4^\circ$ sowie im Ablösebereich bei $\alpha = 18^\circ$ festgelegt. Da die berechneten Werte nur eine erste Näherung darstellen, wird für die Änderung von h_a in den genannten Bereichen eine maximale relative Abweichung von 10 % angenommen. Die resultierenden Ober-

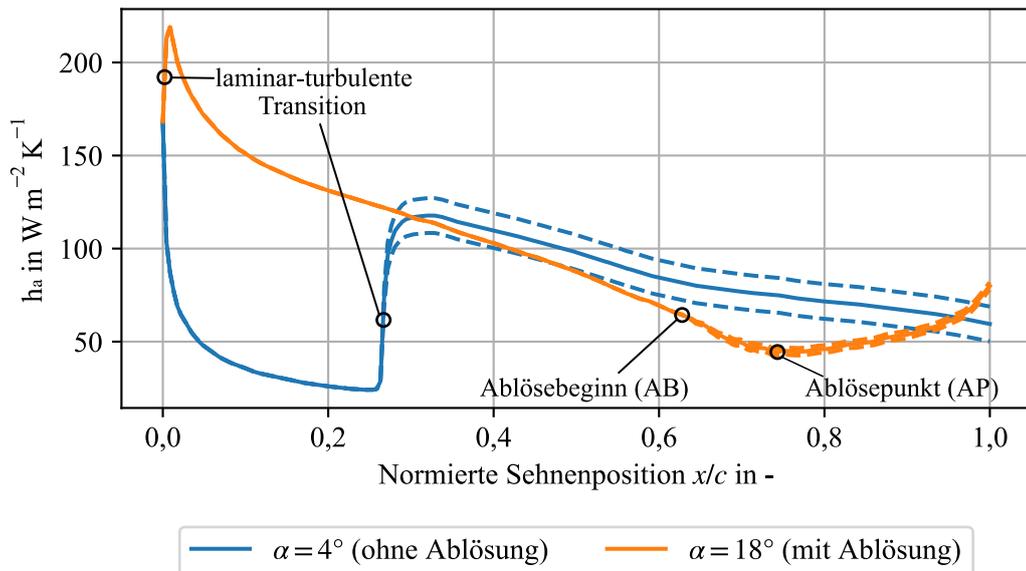


Abb. 5.2: Unter Anwendung einer RANS-Simulation berechnete Verläufe des äußeren Wärmeübergangskoeffizienten bei der Umströmung eines DU 96-W-180-Flügelprofils für Strömungsbedingungen mit ($\alpha = 4^\circ$) und ohne Strömungsablösung ($\alpha = 18^\circ$). Die gestrichelten Linien zeigen die angenommenen oberen und unteren Grenzwerte für h_a welche zur Berechnung von t_{cnr} verwendet werden.

und Untergrenzen der berechneten Verläufe von h_a sind in Abb. 5.2 als gestrichelte Linien eingezeichnet. Für die Berechnung der Anfangstemperaturverteilung zum Zeitpunkt $t = 0\text{ s}$ werden die Ober- und Untergrenzen von h_a für $\alpha = 4^\circ$ in Gl. 5.4 eingesetzt. Für $t > 0\text{ s}$ werden die Verläufe für $h_a(\alpha = 18^\circ)$ verwendet. Im inneren des Rotorblattes wird für h_i ein konstanter Wert von $10\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-1}$ angenommen. Im Ergebnis ist die, durch veränderte Strömungsbedingungen induzierte, sprunghafte Änderung des äußeren Wärmeübergangskoeffizienten sowie der innere Wärmeübergangskoeffizient definiert.

Umgebungstemperaturen und absorbierte solare Strahlungsleistung Für die Temperatur der Anströmung sowie die Temperatur im inneren des Rotorblattes wird $T_{\text{ad}} = T_i = 293,15\text{ K}$ gewählt. Die Temperatur der Anströmung wird als konstant angenommen, d. h. der Einfluss viskoser Erwärmung vernachlässigt. Um die Abhängigkeit der thermischen Antwortzeit von der absorbierten solaren Strahlungsleistung zu untersuchen wird $\dot{q}_{\text{s,abs}}$ alterniert. Der gewählte Wertebereich geht von 20 W m^{-2} bis 170 W m^{-2} und orientiert sich an den in Abschnitt 2.2.1.3 identifizierten Bereich realistischer $\dot{q}_{\text{s,abs}}$ -Werte. Somit sind alle in Gl. 5.6 benannten Parameter bestimmt.

5.1.3 Lösung der Wärmeleitungsgleichung zur Bestimmung der thermischen Antwortzeit t_{cnr}

Abschließend wird Gl. 5.1 unter Anwendung einer Finite-Elemente-Methode für die identifizierten Grenzwerte der Modellparameter gelöst. Die Lösungsgleichung an den Gitterpunkten sowie die Eigenschaften des Gitternetzes sind im Anhang (A2) zusammengefasst. Abb. 5.3 veranschaulicht die Bestimmung von t_{cnr} . Zur Bestimmung von t_{cnr} bei Strömungsablösung wird das tran-

siente thermische Antwortverhalten in Folge der sprunghaften Änderung des äußeren Wärmeübergangskoeffizienten an den Positionen $x/c = 0,63$ und $x/c = 0,75$ verglichen. Wie in Abb. 5.3 eingezeichnet, entspricht die thermische Antwortzeit t_{cnr} der Ausgleichszeit bis die Temperaturdifferenz der beiden Graphen der NETD entspricht. Analog dazu wird t_{cnr} für die Transition an den Positionen $x/c = 0,24$ und $x/c = 0,35$ bestimmt. Bei der Auswertung zeitlicher Differenzbildern wurde der Rauschpegel auf ca. 20 mK abgeschätzt (vgl. Abb. 5.7). Unter Berücksichtigung der Unsicherheitsfortpflanzung bei der räumlichen Differenzbildung zur Berechnung von t_{cnr} ergibt sich ein NETD von ca. 30 mK.

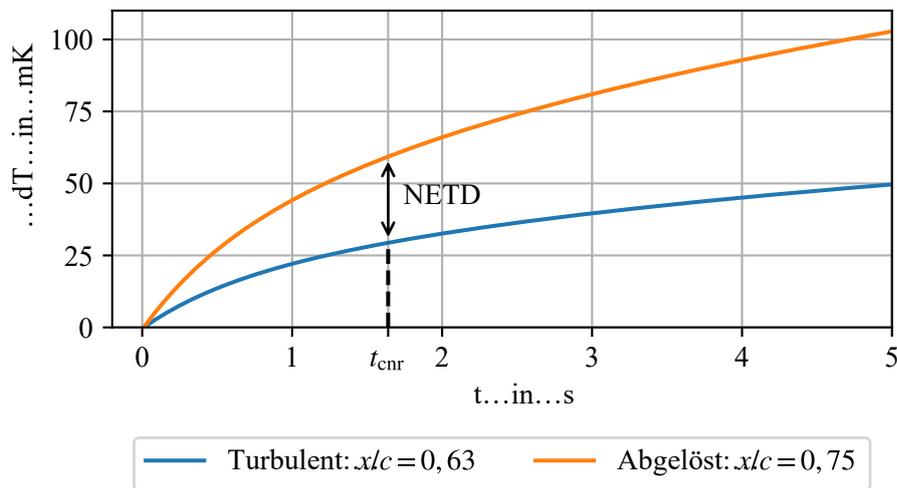


Abb. 5.3: Darstellung des berechneten thermischen Antwortverhaltens der Oberfläche bei einer sprunghaften Änderung des äußeren Wärmeübergangskoeffizienten für die Sehnenpositionen $x/c = 0,63$ und $x/c = 0,75$ zur Veranschaulichung der Bestimmung von t_{cnr} . Bei $x/c = 0,75$ tritt ab $t = 0$ s Strömungsablösung auf.

In Abb. 5.4a sind die berechneten Grenzwerte für t_{cnr} sowie die resultierenden Bereiche zwischen den Grenzwerten für die Ablösung und die Transition in Abhängigkeit der absorbierten solaren Strahlungsleistung aufgetragen sowie das Abtastintervall t_s als Referenz eingezeichnet. Das Abtastintervall beträgt $t_s = 3,3$ s und entspricht der Periodendauer einer Rotorumdrehung der in dieser Arbeit vermessenen WEA bei Nennleistung. Zum Vergleich sind in Abb. 5.4b die erreichbaren CNRs zwischen den laminar-turbulenten und den turbulent-abgelösten Positionen über $\dot{q}_{s,\text{abs}}$ für $t = t_s$ dargestellt. Es wird also gezeigt, welche CNR bei der Auswertung der vorgestellten Messungen mit einer Aufnahme pro Umdrehung erreichbar sind. Die thermische Antwortzeit t_{cnr} nimmt sowohl bei der Transition als auch bei der Ablösung mit steigenden $\dot{q}_{s,\text{abs}}$ näherungsweise exponentiell ab, siehe Abb. 5.4a. Im Gegensatz dazu nimmt das CNR mit steigenden $\dot{q}_{s,\text{abs}}$ zu, siehe Abb. 5.4b. Die Abnahme von t_{cnr} und Zunahme des CNR sind erwartungsgemäß, da eine erhöhte absorbierte Strahlungsleistung zu einer erhöhten Temperaturdifferenz zwischen der Rotorblattoberfläche und dem Fluid und somit zu einer erhöhten Triebkraft für den konvektiven Wärmetransport führen. Ebenfalls erkennbar, t_{cnr} ist bei der Ablösung etwa zwei Größenordnungen höher als bei der Transition, wohingegen beim CNR ein entgegengesetztes Verhalten vorliegt.

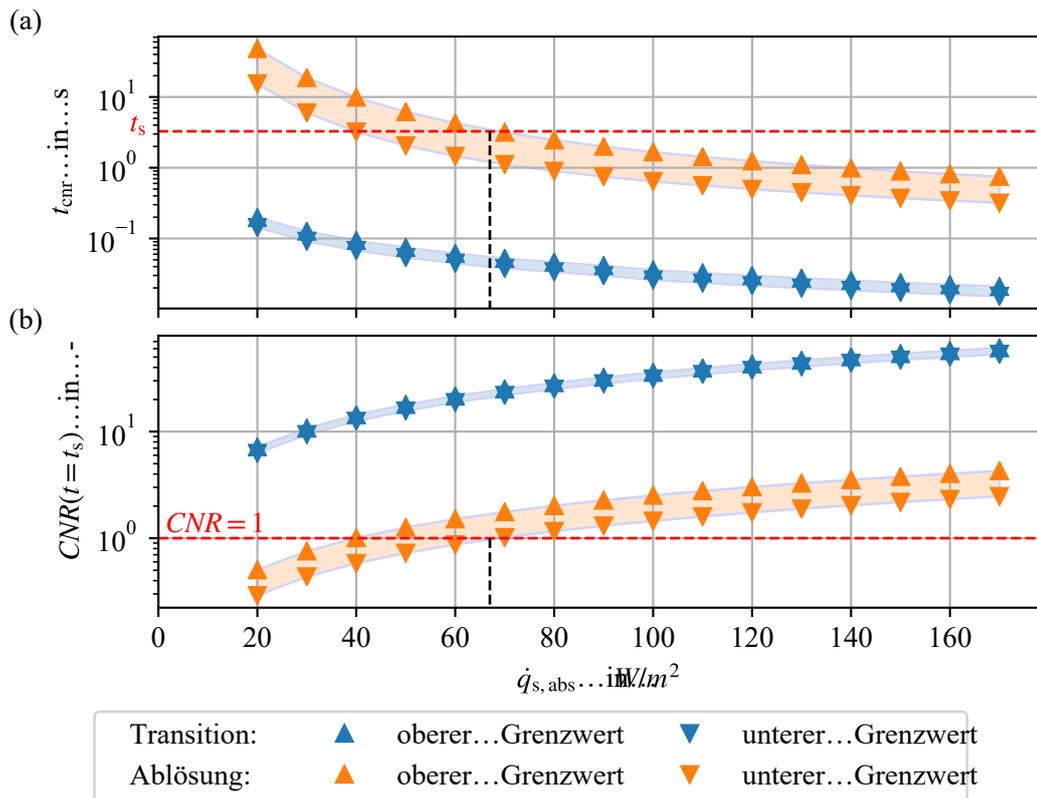


Abb. 5.4: (a) Numerisch berechnete thermische Antwortzeit t_{cnr} bis instationäre Strömungsablösung oder dynamische Transitionspositionen in Abhängigkeit der absorbierten solaren Strahlungsleistung $\dot{q}_{s,abs}$ mit einem $CNR = 1$ thermografisch erfassbar sind. Die rot eingezeichnete Linie zeigt das messsystemseitig vorgegebene Abtastintervall an. Ab $\dot{q}_{s,abs} > 67 W m^{-2}$ ist instationäre Strömungsablösung mit der messsystemseitig maximalen zeitlichen und räumlichen Auflösung erkennbar. (b) Komplementär zu (a) sind die resultierenden CNRs nach einer Antwortzeit von $t = t_s$ über $\dot{q}_{s,abs}$ aufgetragen.

Die Erfassung instationärer Strömungsablösung mit der messsystemseitig maximalen zeitlichen und räumlichen Auflösung erfordert $t_{cnr} < t_s$. Die Auswertung des Verlaufs des t_{cnr} im Fall von Strömungsablösung in Abb. 5.4a zeigt einerseits, dass eine Lokalisierung der instationären Ablöseposition mit der maximalen zeitlichen und räumlichen Auflösung theoretisch ab $\dot{q}_{s,abs} > 67 W m^{-2}$ realisiert werden kann. Andererseits wird bei typischen Messbedingungen mit geringeren $\dot{q}_{s,abs}$ eine Minderung der Rauschleistung durch eine zeitliche oder räumliche Mittelung benötigt, um maximale Auflösungen in Zeit oder Raum zu erreichen. Weiterhin wird anhand von Abb. 5.4b deutlich, dass auch bei idealen Strahlungsbedingungen nur ein geringes CNR zur Detektion und Lokalisierung instationärer Strömungsablösung zur Verfügung steht. Im Vergleich dazu ist eine Erfassung der dynamischen Transitionsposition unabhängig der Strahlungsbedingungen mit der messsystemseitig maximalen zeitlichen und räumlichen Auflösung bei einem akzeptablen CNR von > 7 möglich. Im Ergebnis sind veränderliche Transitionspositionen mit einer deutlich höheren zeitlichen Auflösung erfassbar als das Auftreten von Strömungsablösungen bzw. veränderlicher Ablösepositionen. Bei einem messsystemseitig festgelegten Abtastintervall sind dynamische Transitionsbereiche aufgrund eines höheren CNRs im Vergleich zu abgelösten Bereichen besser erkennbar.

Die Ergebnisse belegen, dass insbesondere für die zeitlich hochaufgelöste Erfassung dynamischer Transitionspositionen ein großes Potential in der Erweiterung des Messsystems hinsichtlich einer kontinuierlichen Nachverfolgung des Rotorblattes besteht. Bei einer kontinuierlichen Nachverfolgung des Rotorblattes bestände zusätzlich die Möglichkeit einer zeitlichen Mittelung beim downsampling, der mit der kameraseitig maximale Aufnahmezeit von 400 Hz aufgenommenen Thermogramme, wodurch sich die NETD reduzieren und somit die zeitlichen Auflösungsgrößen bei der Erfassung dynamischer Ablösephänomene steigern ließe.

5.2 Detektion und Lokalisierung instationärer Strömungsablösung an realen WEA

Im Weiteren wird das Potential des konzipierten zweistufigen Signalverarbeitungsansatzes für eine IRT-basierte Detektion und Lokalisierung instationärer Strömungsablösung an einer realen WEA untersucht. In Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden absorbierten solaren Strahlungsleistung $\dot{q}_{s,abs}$ wird zwischen einem Experiment mit geringer solarer Erwärmung (Exp. 1, $\dot{q}_{s,abs} \approx 20 \text{ W m}^{-2}$) und einem Experiment mit erhöhter solarer Erwärmung (Exp. 2, $\dot{q}_{s,abs} \approx 70 \text{ W m}^{-2}$) unterschieden. Im ersten Schritt der IRT-basierten Auswertung wird die grobe Identifizierbarkeit des Auftretens instationärer Strömungsablösung mit Hilfe des σ DIT-Ansatzes evaluiert und mittels Referenzmessdaten verifiziert. Anschließend wird für die unterschiedlichen Messbedingungen beider Experimente geklärt, inwieweit eine Kombination des DIT-Ansatzes mit der Anwendung einer PCA zu einer spatio-temporal aufgelösten Detektion und Lokalisierung instationärer Strömungsablösung führt.

5.2.1 Referenzmessung

Zunächst ist es das Ziel, die grundsätzliche Erscheinung, den Zeitpunkt und die Position instationärer Strömungsablösung für das erste Experiment mit Tufts als Referenzmethode zu verifizieren. Im zweiten Experiment ohne Tufts wird die Plausibilität des Auftretens instationärer Strömungsablösung anhand der Analyse der Anlagendrehzahl über die Messzeit geprüft.

Abb. 5.5 stellt für beide Experimente die Drehzahl über die ausgewertete Messzeit mit konstanter Ausrichtung der Rotorebene dar. Für Drehzahlen $< 18,3 \text{ min}^{-1}$ wird die WEA im Teillastbetrieb betrieben und es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Drehzahl und der Windgeschwindigkeit. So zeigt der steile Anstieg der Drehzahl bei $t = 130 \text{ s}$ im ersten Experiment bzw. bei $t = 175 \text{ s}$ im zweiten Experiment einen sprunghaften Anstieg der Windgeschwindigkeit an. Da ein sprunghafter Anstieg der Windgeschwindigkeit zu einem Anstieg des Anstellwinkels führt, ist der dargestellte Anstieg der Drehzahl in beiden Fällen ein Indikator für das Auftreten instationärer Strömungsablösung.

Die Ergebnisse der Tufts-basierten Strömungsvisualisierung im ersten Experiment in Abb. 5.6 verifizieren das Auftreten von Strömungsablösung für die Zeitpunkte um $t = 130 \text{ s}$. Die markierten Ablösepositionen (durchgezogene Linien) sind anhand einer verschwindenden vektoriellen Ausrichtung in Richtung der Sehne erkennbar und bestätigen die Existenz eines ausge-

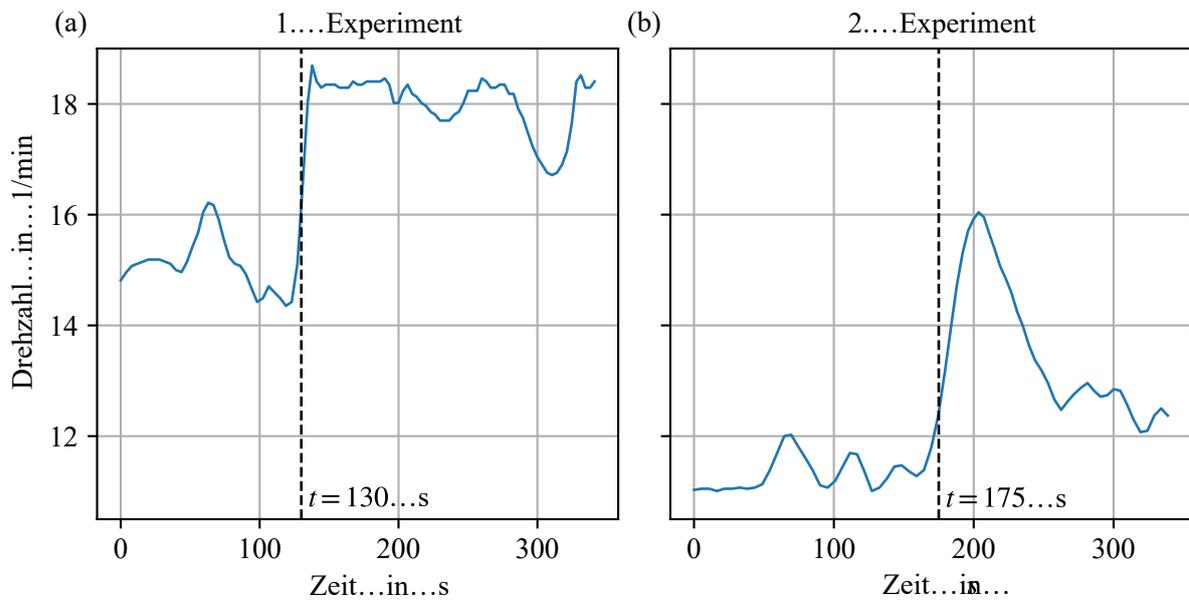


Abb. 5.5: Optisch gemessene Drehzahl der WEA für beide Experiment über einen zeitlichen Messbereich mit konstanter Ausrichtung der Rotorebene. Der sprunghafte Anstieg der Drehzahl bei $t = 130$ s im ersten Experiment bzw. bei $t = 175$ s im zweiten Experiment sind ein Indikator für das Auftreten einer Böe bzw. für ein potentiellen Zeitpunkt mit instationärer Strömungsablösung.

dehnten abgelösten Bereiches. So wird die Ablöseposition für den Zeitpunkt $t = 131$ s bereits bei $x/c = 0,66$ lokalisiert. Somit wird die Hypothese bestätigt, wonach Strömungsablösung während des sprunghaften Anstiegs der Drehzahl bei $t = 130$ s auftritt. Im Vergleich dazu wird bei zunehmend stationären Strömungsbedingungen, wie bei $t = 241$ s, keine bzw. keine signifikante Strömungsablösung nachgewiesen. Das die Strömung bei näherungsweise stationären Strömungsbedingungen angelegt bleibt entspricht der Erwartung bezüglich der aerodynamischen Auslegung der Rotorblätter im äußeren Rotorblattbereich. Im Ergebnis der Tufts-basierten Strömungsvisualisierung im ersten Experiment wird die Existenz, der Zeitpunkt und die Sehnenposition des Auftretens instationärer Strömungsablösung verifiziert. Die Analyse des Drehzahlverhaltens während des zweiten Experiments legt das Auftreten von Strömungsablösung für die Zeitpunkte um $t = 175$ s im zweiten Experiment nahe.

5.2.2 σ DIT-Ansatz – Thermografische Detektion von Zeitpunkten mit instationärer Strömungsablösung

Der σ DIT-Ansatz wertet die räumliche Standardabweichung zeitlicher Differenzbilder aus und zielt auf eine Identifizierung von Zeitpunkten mit instationären Anströmbedingungen anhand von Maxima der Auswertegröße $\sigma(\Delta T_s)$. Die Ergebnisse der Auswertung der Freifeldmessungen mit dem σ DIT-Ansatz sind in Abb. 5.7 dargestellt. Abb. 5.7a und Abb. 5.7b stellen den Verlauf der Auswertegröße $\sigma(\Delta T_s)$ über die Messzeit für die beiden durchgeführten Experimente für jeweils ein Rotorblatt gegenüber. Es sei explizit erwähnt, dass sich die nachfolgende Auswertung auf jeweils ein ausgewähltes Rotorblatt beschränkt, sich die Ergebnisse für die beiden übrigen Rotorblätter jedoch reproduzieren lassen. Die Breite der eingezeichneten Konfidenzintervalle ent-

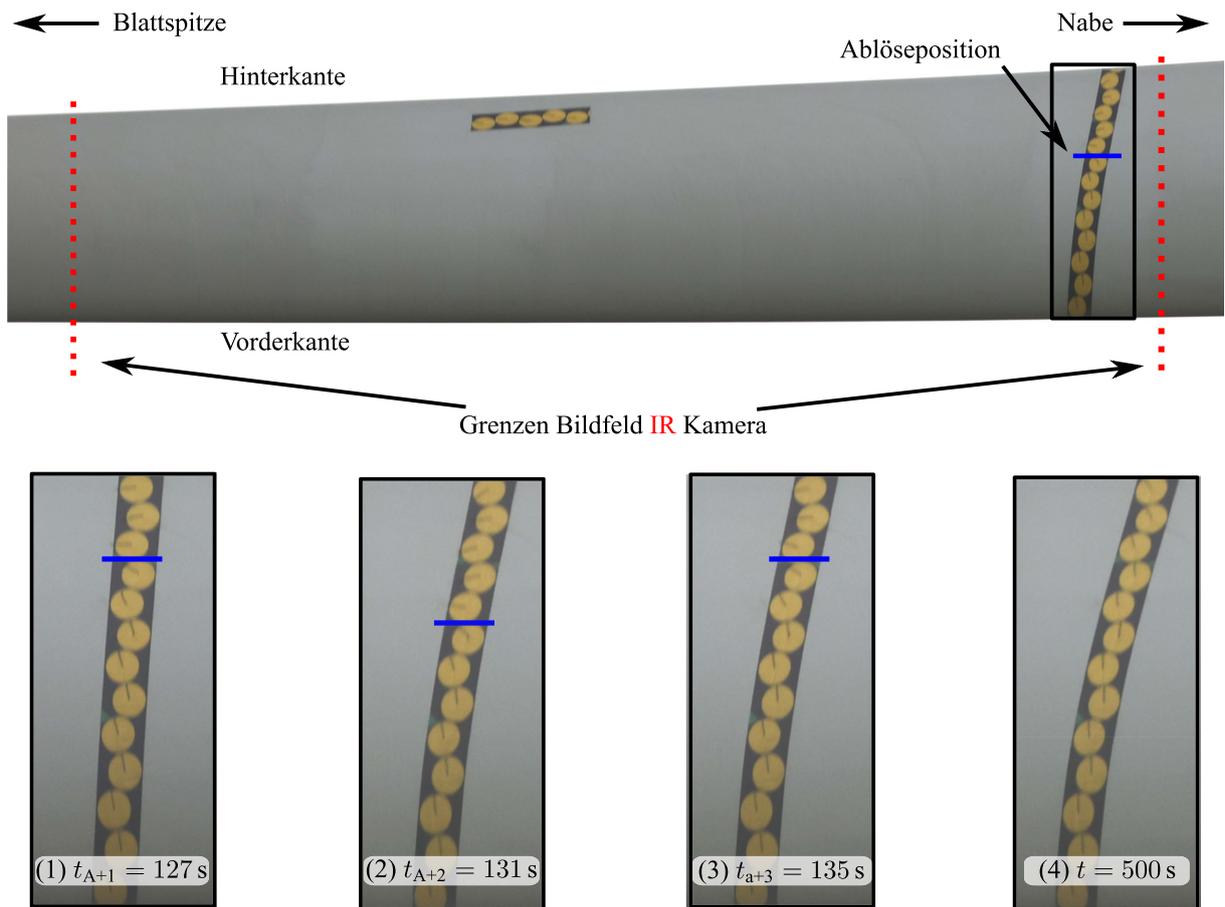


Abb. 5.6: Verifizierung des Auftretens, des Zeitpunkts und der Position instationärer Strömungsablösung im ersten Experiment für das Bildfeld der IR-Kamera unter Anwendung Tufts-basierter Strömungsvisualisierung als Referenzmessmethode. Die blauen durchgezogenen Linien quer über die mit Tufts bestückten Klebestreifen zeigen das Auftreten und die Position von Strömungsablösung zu verschiedenen Zeitpunkten. Die Ablöseposition wird anhand einer verschwindenden Ausrichtungskomponente der Tufts in Sehnenrichtung lokalisiert.

spricht der zweifachen empirischen Standardabweichung, welche für die von Ausreißern bereinigten Messdaten bestimmt wurde. Um Ausreißer zu detektieren, wurde ein Ausreißertest nach Grubbs mit einem Signifikanzniveau von 0,05 durchgeführt.

Betrachtet man den Verlauf von $\sigma(\Delta T_s)$ für das erste Experiment in Abb. 5.7a, so ist ein deutliches Signalmaximum bei $t = 130\text{s}$ und ansonsten Signalrauschen erkennbar. Der Zeitpunkt des detektierten Maximums von $\sigma(\Delta T_s)$ stimmt mit dem, anhand der Tufts-Messung, verifizierten Zeitpunkt mit Strömungsablösung überein. Darüber hinaus entspricht der Rauschpegel von $\sigma(\Delta T_s) = 18\text{mK}$ in etwa dem Kamerarauschen für die gegebenen Messbedingungen und das Konfidenzintervall zeigt, dass das charakteristische Signalmaximum nicht durch die zufällige Messunsicherheit verursacht wird. Somit wird die gewünschte Eignung des σDIT -Ansatzes für eine IRT-basierte Identifikation von Zeitschritten mit potenziellen instationären Strömungsablösungen anhand des ersten Experiments nachgewiesen.

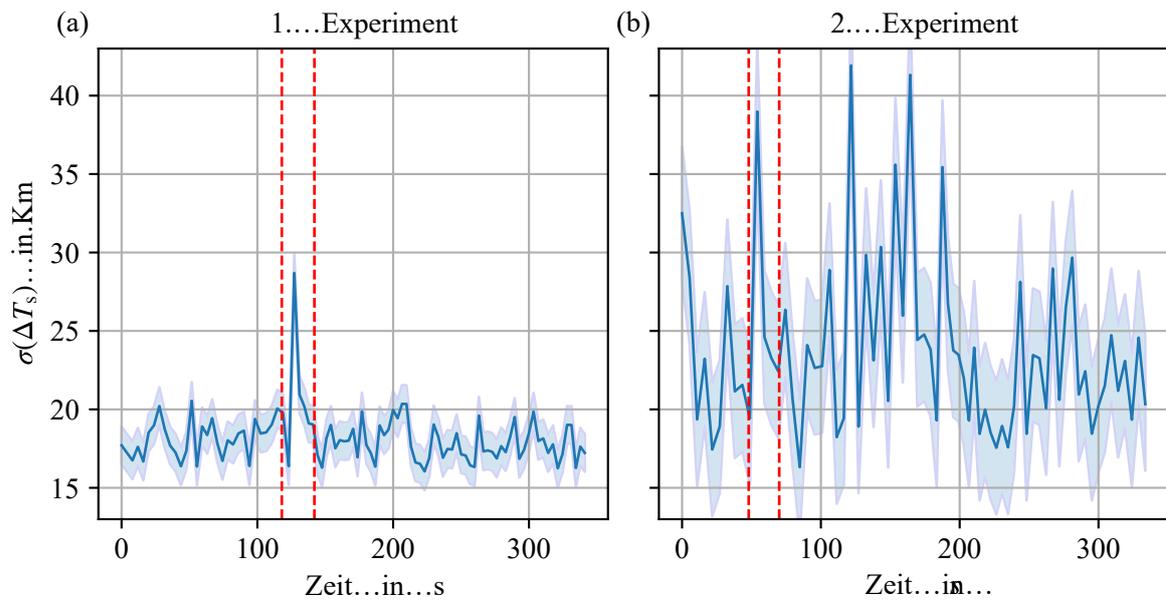


Abb. 5.7: Die räumliche Standardabweichung von Differenzbildern $\sigma(\Delta T_s)$ (σ DIT-Ansatz) über die Zeit für ausgewählte Rotorblätter bei beiden Experimenten (a,b). Die roten gestrichelten Linien zeigen die identifizierten Zeitbereiche mit instationären Anströmbedingungen, welche für die zeitaufgelöste Detektion und Lokalisierung instationärer Strömungsablösung im zweiten Signalverarbeitungsschritt ausgewertet werden.

Im zweiten Experiment führen die erhöhten solaren Strahlungseinträge zu einer reduzierten thermischen Antwortzeit und somit zu einer verbesserten Empfindlichkeit des σ DIT-Ansatzes. Infolgedessen nehmen die räumlichen Temperaturgradienten der berechneten Differenzbilder bei instationären Anströmbedingungen zu, weshalb $\sigma(\Delta T_s)$ in Abb. 5.7b deutlich höherer Werte als in Abb. 5.7a aufweist. Der Vergleich der drei höchsten Signalmaxima in Abb. 5.7b bei $t = [53, 120, 165]$ s und dem Drehzahlverlauf in Abb. 5.5b zeigt, dass die detektierten $\sigma(\Delta T_s)$ -Maxima in zeitlicher Übereinstimmung mit Drehzahländerungen sind und somit bereits kleine Drehzahländerungen abgebildet werden. Unter Berücksichtigung des in Abschnitt 5.1 nachgewiesenen hohen zeitlichen Auflösungsvermögen von IRT hinsichtlich dynamischer Transitionspositionen und dem Vorwissen bezüglich der hohen Empfindlichkeit der Transitionsposition gegenüber veränderlicher Anströmbedingungen führt die hohe Anzahl über dem Rauschpegel der Kamera liegender Signalmaxima zu dem Nachweis, dass mit dem σ DIT-Ansatz bereits kleine Änderungen der Anströmbedingungen detektierbar sind.

Für den zweiten Schritt der Signalverarbeitung wird im ersten Experiment der Zeitbereich um $t = 130$ s mit verifizierter Strömungsablösung ausgewertet. Im zweiten Experiment wird der Zeitbereich um $t = 53$ s gewählt. Der genannte Zeitbereich weist im Vergleich zu dem Zeitbereich mit dem markanten Anstieg der Drehzahl ab $t = 165$ s den Vorteil auf, dass da der $\sigma(\Delta T_s)$ -Verlauf in Abb. 5.7b vor dem Beginn des Auswertefensters reduzierte Werte aufweist. Aus der reduzierten thermischen Dynamik wird gefolgert, dass sich das Rotorblatt zu Beginn der Auswertung näherungsweise in einem thermischen Gleichgewichtszustand befindet. Durch die somit näherungsweise bekannte Anfangsbedingung wird die Auswertung des thermodynamischen Antwortverhaltens der Rotorblattoberfläche mit dem DIT-Ansatz erleichtert. Im Weiteren wird die Realisier-

barkeit einer spatio-temporal aufgelösten Detektion und Lokalisierung instationärer Strömungsablösung für die definierten Zeitbereiche untersucht.

5.2.3 DIT-Ansatz und PCA – Spatio-temporal aufgelöste Detektion und Lokalisierung instationärer Strömungsablösung

Abb. 5.8 zeigt vier Thermogramme, unterteilt in die beiden Experimente und dem Aufnahmezeitpunkt während des jeweiligen Experiments. Die Thermogramme in der linken Spalte wurden im ersten Experiment, also bei einer geringen absorbierten Strahlungsleistung von $\dot{q}_{s,abs} \approx 20 \text{ W m}^{-2}$, zu den Zeitpunkten t_A (a.1) und t_{max} (a.2) aufgenommen. Analog dazu sind in der rechten Spalte die Thermogramme, welche im zweiten Experiment mit $\dot{q}_{s,abs} \approx 70 \text{ W m}^{-2}$ zu den Zeitpunkten t_A (b.1) und t_{max} (b.2) aufgenommen wurden dargestellt. Gemäß der Definition der Zeitpunkte t_A und t_{max} in Abb. 2.20, bezeichnet t_A den Zeitpunkt unmittelbar vor dem Beginn einer Anstellwinkeländerung in Folge des Einsetzens einer Böe während t_{max} den Zeitpunkt vor der Abnahme des Anstellwinkels beim abklingen einer Böe oder durch Regeleingriffe der WEA beschreibt. Es ist zu beachten, dass die genannten Zeitpunkte bei der durchgeführten Freifeldmessungen nur grob, anhand der Auswertung der dynamischen Transitionsposition in Differenzbildern, mit der messsystemseitig limitierten zeitlichen Auflösung abgeschätzt werden können.

Im Vergleich zu der vorgestellten Freifeldmessung im Rotorblattwurzelbereich in Abschnitt 4.2 bewirken die erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten im äußeren Rotorblattbereich, dass bereits geringe Oberflächenkontaminationen sich keilförmig ausbreitende turbulente Strömungsstrukturen im Bereich der Vorderkante induzieren [95]. In der Folge verbleiben nur kleine Bereiche laminar, welche überdies einen reduzierten Kontrast gegenüber turbulenten Bereichen aufweisen. In Abb. 5.8a.1 und Abb. 5.8b.1 werden die in der Nähe der Vorderkante befindlicher keilförmigen Bereiche mit erhöhter Temperatur als laminar identifiziert. Im ersten Experiment beträgt die Temperaturdifferenz zwischen den eingezeichneten Auswertebereichen mit laminarer und turbulenter Strömung 0,4 K während die erhöhte absorbierte Strahlungsleistung im zweiten Experiment zu einer Temperaturdifferenz von 1,2 K führt. Der Anstieg des Anstellwinkels zwischen t_A und t_{max} bewirkt eine Verschiebung der Transitionsposition zur Vorderkante, wodurch die markierten laminaren Bereiche turbulent werden und stärker konvektiv gekühlt werden. Folglich nimmt die Oberflächentemperatur ab, und die zuvor hellen Bereiche an der Vorderkante sind in Abb. 5.8a.2 und Abb. 5.8b.2 zum Zeitpunkt t_{max} dunkler dargestellt. Aufgrund der thermischen Trägheit des Rotorblattes ist die Oberflächentemperatur in den initial laminaren Bereichen jedoch noch höher als in den umgebenden initial turbulenten Strömungsbereichen. Zudem ist im Bereich der Hinterkante keine eindeutige Detektion abgelöster Strömungsbereiche möglich.

Um eine eindeutige Detektion von instationärer Strömungsablösung anhand physikalisch interpretierbarer Merkmale sowie eine spatio-temporal aufgelöste Lokalisierung der verschiedenen Strömungsbereiche zu realisieren, erfolgt im Weiteren eine separate Auswertung beider Experimente mit einer Anwendung des DIT-Ansatzes und einer PCA. Geordnet nach dem Experiment, dem Auswerteansatz und dem Auswertzeitraum sind die resultierenden Ergebnisse für

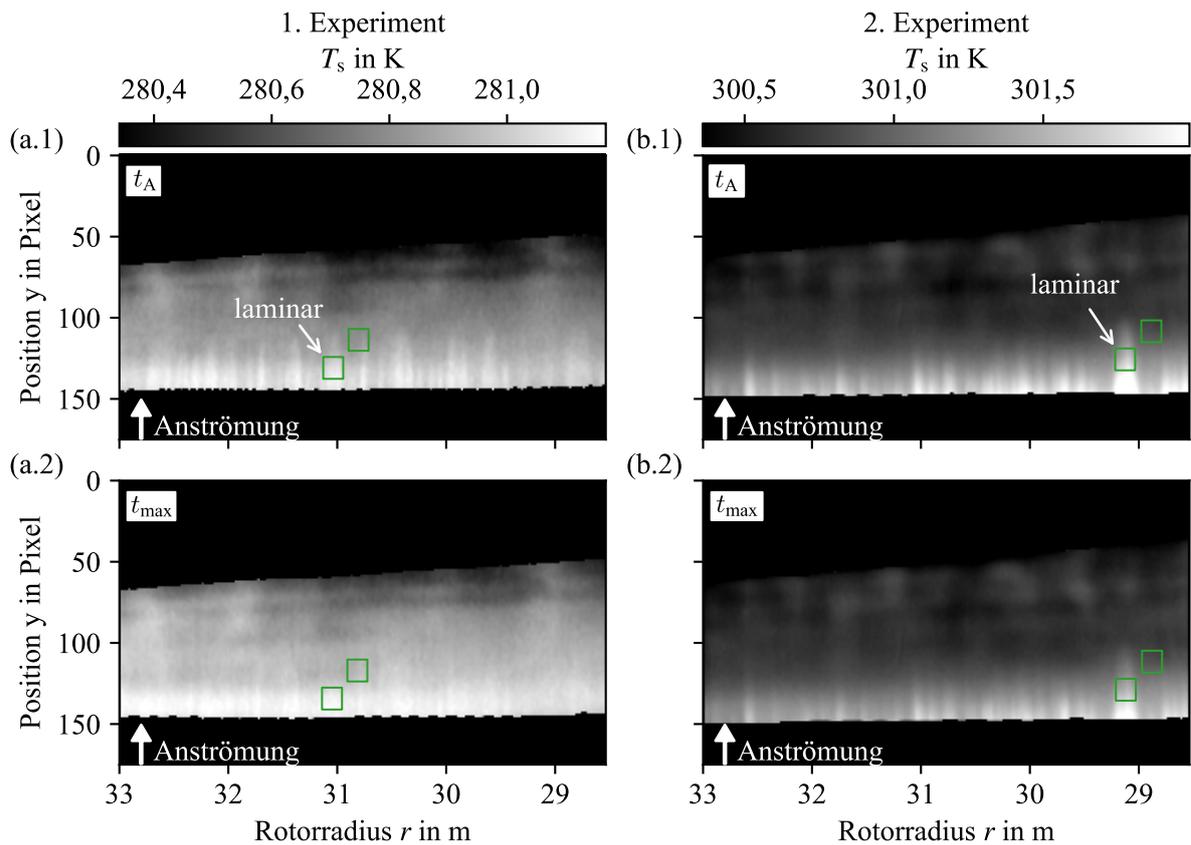


Abb. 5.8: Vergleich einzelner Thermogramme vom Aufnahmezeitpunkt vor einer Böe (obere Bildzeile) und dem Zeitpunkt während einer Böe (untere Bildzeile) für beide Experimente. Laminare Strömungsbereiche sind in beiden Experimenten anhand von hellen, keilförmigen Mustern erkennbar. Anhand der Bildkontraste der einzelnen Thermogramme ist keine eindeutige Detektion des Auftretens von Strömungsablösung sowie der Verschiebung der Transitionspositionen möglich.

die Kriterien der grundsätzlichen zeitlichen und räumlich aufgelösten Detektion von instationären Strömungsablösungen, der Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche, quantifiziert durch das CNR, sowie die zufällige Unsicherheit bei der modellbasierten Lokalisierung der Ablöseposition in Tab. 5.2 zusammengefasst.

5.2.3.1 1. Experiment (geringe absorbierte solare Strahlungsleistung)

Trotz der geringen absorbierten solaren Strahlungsleistung von ca. 20 W m^{-2} im ersten Experiment wird gemäß der numerischen Untersuchung in Abschnitt 5.1 eine maximale spatio-temporalen Auflösung bei der Erfassung der laminar-turbulenten Transitionsposition mit dem DIT-Ansatz erwartet. Zur Detektion und Lokalisierung instationärer Strömungsablösung wird hingegen eine zeitliche oder räumliche Mittelung benötigt. Deshalb wird geprüft inwieweit die spatio-temporale Auflösung durch die kombinierte Auswertung mit dem DIT-Ansatz und einer PCA maximiert werden kann.

Tab. 5.2: Ergebnisübersicht der erreichten spatio-temporal aufgelösten Detektion instationärer Strömungsablösung sowie den Kriterien der Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche und die zufällige Unsicherheit bei der modellbasierten Lokalisierung der Ablöseposition. Die Ergebnisse werden durch die in Abschnitt 3.3.3 eingeführten Kennzahlen CNR und u_{AP} quantifiziert. Die für einen radialen Rotorblattabschnitt bestimmte Messunsicherheit der Ablöseposition wird in der Einheit px angegeben und zur Sehnenlänge bei $r = 29$ m ins Verhältnis gesetzt (Einheit %c). Die Übersicht ist in die unterschiedlichen Experimente, Auswertansätze und Auswertzeiträume bzw. ausgewertete PC unterteilt.

Exp.	Ansatz	Differenzzeit/PC	zeitl./räuml. Stall Detektion	CNR in -		u_{AP} in px (%c)
				lam.-turb.	turb.-abg.	
Exp. 1	DIT	$t_{max} - t_A$	x/x	4,2	-	-
		$t_{A+1} - t_A$	x/x	2,2	-	-
		$t_{A+2} - t_{A+1}$	✓/x	1,5	-	-
		$t_{A+3} - t_{A+2}$	✓/x	0,1	-	-
	PCA	1.PC	x/x	2,6	-	-
		2.PC	x/✓	-	1,4	4,7 (4,3)
Exp. 2	DIT	$t_{max} - t_A$	x/✓	5,3	1,9	2,5 (2,3)
		$t_{A+1} - t_A$	✓/✓	4,8	1,2	6,5 (5,9)
		$t_{A+2} - t_{A+1}$	✓/x	2,9	-	-
	PCA	2.PC	x/✓	7,8	2,8	2,3 (2,1)

DIT-Ansatz

Die Ergebnisse der Auswertung mit dem DIT-Ansatz für die verifizierte Dauer des Auftretens instationärer Strömungsablösung im ersten Experiment sind in Abb. 5.9 dargestellt. Zur eindeutigen Detektion instationärer Strömungsablösung wird in der oberen Bildreihe das Differenzbild zwischen den Zeitpunkten t_A und t_{max} analysiert. Während Abb. 5.9a.1 (links) das Differenzbild zeigt, ist in Abb. 5.9a.2 (rechts) der gemittelte Verlauf der normierten Auswertgröße über die normierte Sehnenposition dargestellt. Dabei wird jede Bildspalte normiert und die Mittelwertbildung in radialer Richtung durchgeführt, wobei der markierte Bereich mit dem optischen Artefakt ausgeschlossen wird. Analog zur oberen Bildreihe werden in den Bildreihen b – d die sequentiellen Differenzbilder zwischen t_A und t_{max} analysiert. Ziel der Auswertung der sequentiellen Differenzbilder ist die zeitlich aufgelöste Lokalisierung der Ablöseposition.

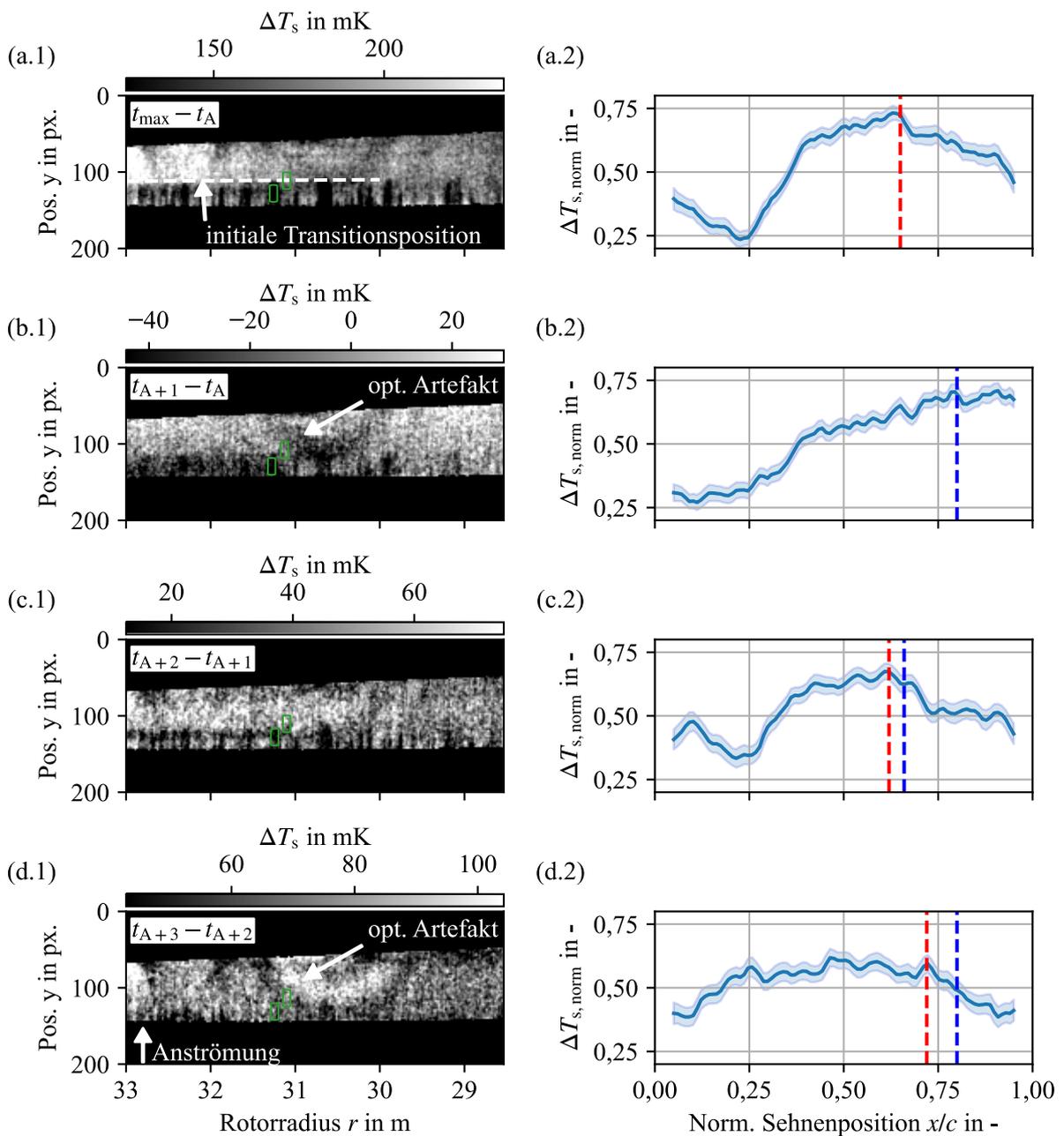


Abb. 5.9: Auswertung der IRT-Bildserie des ersten Experiments mit dem DIT-Ansatz für einen Zeitbereich mit instationärer Strömungsablösung. Links: Verarbeitete Differenzbilder für verschiedene Zeitdifferenzen. Rechts: Quer zur Strömungsrichtung gemittelter Verlauf der spaltenweise normierten Auswertegröße mit eingezeichneten empirisch bestimmten 3σ -Konfidenzintervall. Strömungsablösung wird anhand des Maxima und anschließend abfallenden Verlaufs der Auswertegröße in a.2, c.2 und d.2 bei $x/c = 0,65$, $x/c = 0,62$ und $x/c = 0,72$ detektiert und räumlich gemittelt lokalisiert (rote Linien). Blaue Linien: Mit Hilfe der Tufts gemessene Ablöseposition. In der linken Bildspalte sind zusätzlich die Auswertebereiche für die Berechnung des CNR zwischen initial laminar-turbulenten Bereichen eingezeichnet (grüne Rechtecke).

Zunächst wird in den Abb. 5.9a.1 und Abb. 5.9a.2 die Detektierbarkeit der unterschiedlichen Strömungsbereiche anhand von physikalisch interpretierbaren thermischen Merkmalen untersucht. Dominante Bildmerkmale in Abb. 5.9a.1 sind die dunklen, an der Vorderkante begin-

nenden, Keilformationen der initial laminaren und zum Zeitpunkt t_{\max} turbulenten Bereiche. Das CNR zwischen den eingezeichneten Auswertebereichen beträgt 4,2. Somit wird die thermografische Detektierbarkeit der Verschiebung der laminar-turbulenten Transitionsposition zur Vorderkante nachgewiesen. Weiterhin sind die Erwärmung des Rotorblattes über den gesamten Bildbereich sowie der radiale Temperaturgradient auffallende Bildmerkmale. Der zeitliche und radiale Temperaturanstieg deuten auf einen signifikanten Einfluss der viskosen Erwärmung der Strömung hin. Zum Vergleich, bei einem Anstieg der Anströmgeschwindigkeit um $10,2 \text{ m s}^{-1}$ bei $r = 29 \text{ m}$ bzw. $11,3 \text{ m s}^{-1}$ bei $r = 33 \text{ m}$ sowie der Annahme eines Recovery-Faktors von 0,89 ergibt sich mit Gl. 2.22 für die dargestellten Messbedingungen eine Erwärmung der Anströmtemperatur um ca. 0,45 K bzw. ca. 0,56 K. Unter Berücksichtigung der geringen absorbierten Strahlungsleistung folgt, dass ein dominanter Einfluss der viskosen Erwärmung auf das thermische Antwortverhalten im ersten Experiment plausibel ist. Demzufolge wird gemäß Abschnitt 2.3.2.2 eine Abnahme des zeitlichen Temperaturgradienten ab der Ablöseposition erwartet. In Abb. 5.9a.1 sind in der Nähe der Hinterkante zwar Bereiche mit minimalen ΔT_s -Werten sichtbar, allerdings ist ein ausgedehnter Bereich mit Strömungsablösung aufgrund des geringen SNR bei den Messbedingungen im ersten Experiment anhand des Bildkontrasts nicht erkennbar. In Abb. 5.9a.2 verbessert die räumliche Mittelung über 350 Pixel das SNR um den Faktor 19. Im Ergebnis der räumlichen Mittelung wird eine merkmalsbasierte Detektion von Strömungsablösung anhand der deutlichen Abnahme von ΔT_s in Abb. 5.9a.2 bei $x/c = 0,65$ realisiert.

Abschließend wird die zeitlich aufgelöste Lokalisierbarkeit der Transitions- und Ablöseposition anhand der Auswertung sequentieller Differenzbilder in den Abb. 5.9b.1 – Abb. 5.9d.2 geprüft. Direkt nach dem anhand der Tufts-Messung identifizierten Zeitpunkt des Einsetzens von Strömungsablösung wird mit IRT weder in Abb. 5.9b.1, durch die Auswertung des Bildkontrasts, noch durch die Auswertung des Signalverlaufs in Abb. 5.9b.2 eine klare Unterscheidung zwischen dem turbulenten und dem abgelösten Strömungsbereich erreicht. Im Vergleich dazu ist der Transitionsbereich mit einem CNR von 2,2 erkennbar. Demnach wird die räumliche Verschiebung der laminar-turbulenten Transitionsposition mit dem DIT-Ansatz, trotz des geringen $\dot{q}_{s,abs}$, mit der maximalen spatio-temporalen Auflösung erfasst.

Zu den nachfolgenden Zeitpunkten wird die räumlich gemittelten Ablöseposition anhand der deutlichen Abnahme von ΔT_s in Abb. 5.9c.2 bei $x/c = 0,62$ und in Abb. 5.9d.2 bei $x/c = 0,72$ detektiert. Die thermografisch ermittelten Ablösepositionen (rote Linien) liegen etwas vor den mit Hilfe der Tufts bestimmten Ablösepositionen (blaue Linien). Da die Tufts turbulenzinduzierend wirken und somit Strömungsablösung verzögern, ist die mit IRT gemessene frühere Ablösungsposition plausibel. Im Ergebnis ermöglicht der DIT-Ansatz die Bestimmung einer räumlich gemittelten Ablöseposition während einer Böe mit der messsystemseitig maximalen zeitlichen Auflösung.

PCA

Die Auswertung mit Hilfe der PCA umfasst 20 aufeinanderfolgende Bilder im Zeitbereich des Auf- und Abklingens instationären Strömungsablösung (von $t_A = 123 \text{ s}$ bis $t_E = 188 \text{ s}$). Die Hypo-

these ist, dass die PCA die zuvor identifizierten zeitvariablen Strömungsinformationen in Form von unkorrelierten Hauptkomponenten extrahiert und somit die Lokalisierung der Ablöseposition mit der maximaler Bildauflösung ermöglicht.

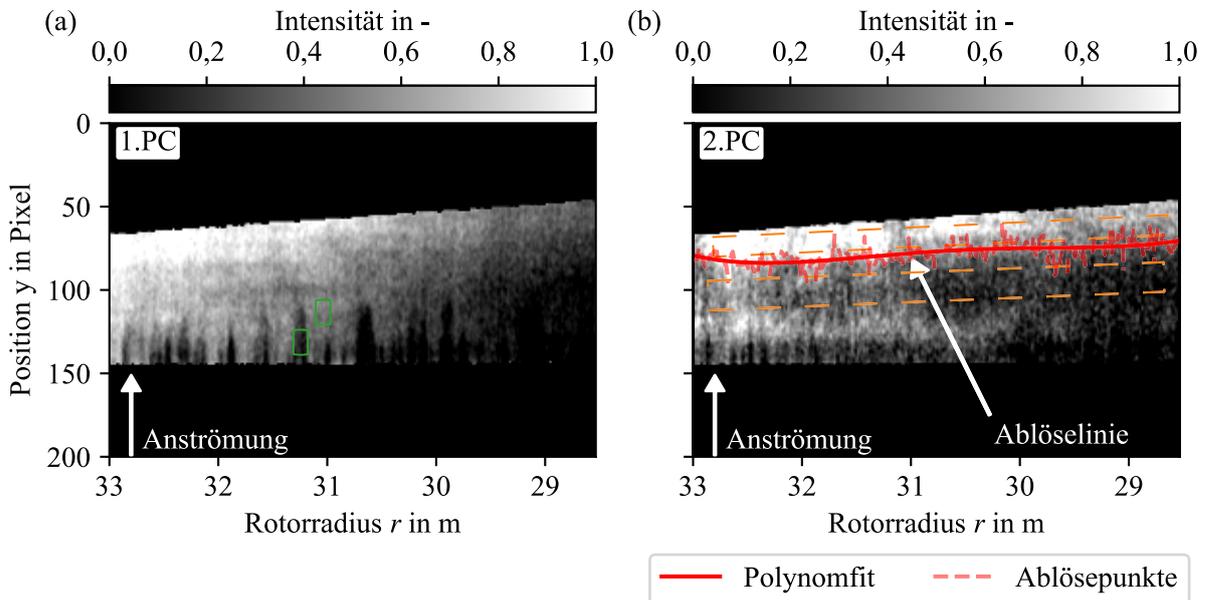


Abb. 5.10: Auswertung von 20 aufeinanderfolgenden thermografischen Bildern mittels einer PCA. Die IRT Bildserien wurde während des Auftretens instationärer Strömungsablösung über eine Zeitdauer von 65 s aufgenommen. Die PCA ermöglicht eine Extraktion zeitlich veränderlicher Strömungsinformationen. Die markierte Ablöselinie (Polynomfit) ist anhand des Bildkontrastes über die gesamte radiale Breite des Sichtfeldes und somit der maximalen Bildauflösung erkennbar. Die Auswertebereiche für die Berechnung des CNR zwischen laminar-turbulenten (grüne Rechtecke) und angelegt-abgelösten (orange gestrichelte Rechtecke) Bereichen sind ebenfalls eingezeichnet.

Abb. 5.10 zeigt die Ergebnisse der PCA-basierten Strömungsvisualisierung unter Darstellung der beiden ersten Hauptkomponenten. Die Auswertung beschränkt sich auf die beiden ersten Hauptkomponenten, da diese die relevanten Strömungsinformationen beinhalten und bereits 65 % der Datenvarianz erklären. Die erste Hauptkomponente in Abb. 5.10a und die zweite Hauptkomponente in Abb. 5.10b zeigen substantielle Unterschiede zueinander. Die dominierenden Merkmale der Intensitätsverteilung in der ersten Hauptkomponente sind die mit dem DIT-Ansatz identifizierten und erklärten Keile im Bereich der Vorderkante und ein starker systematischer Gradient in radialer Richtung.

Im Gegensatz dazu ist in der zweiten Hauptkomponente in Abb. 5.10b ein steiler Intensitätsanstieg über den gesamten Rotorradius nahe der Hinterkante in Strömungsrichtung sichtbar (siehe Polynomfit). In Übereinstimmung mit der merkmalsbasierten Lokalisierung der Ablöseposition mit dem DIT-Ansatz und der Tufts-Messung wird der resultierende Bereich mit erhöhter Intensität als abgelöst identifiziert. Die theoretische Lokalisierbarkeit der Ablöseposition mit der maximalen Bildauflösung wird anhand des CNR von 1,4 bestätigt. Die Unsicherheit der nachfolgend durchgeführten modellbasierten Lokalisierung der Ablöseposition beträgt $u_{AP} = 4,7$ px. Im Ergebnis ermöglicht die PCA eine Kontraststeigerung zwischen dem angelegten und dem ab-

gelösten Strömungsbereich, wodurch eine Lokalisierung der zeitlich gemittelten Ablöseposition über das gesamte Bildfeld erreicht wird. Gemessen an der Sehnenlänge bei $r = 29$ m beträgt die relative Unsicherheit der modellbasierten Lokalisierung der Ablöseposition 4,3 %.

5.2.3.2 2. Experiment (erhöhte absorbierte solare Strahlungsleistung)

Bei der Auswertung des zweiten Experiments wird geprüft, ob die im ersten Experiment realisierte thermografische Detektion und Lokalisierung instationärer Strömungsablösung reproduzierbar ist. Außerdem wird geklärt, inwieweit die erhöhte absorbierte solare Strahlungsleistung $\dot{q}_{s,abs}$ zu einer Verbesserung der spatio-temporalen Auflösung bei der Lokalisierung der Ablöseposition führt. Da $\dot{q}_{s,abs} > 67 \text{ W m}^{-2}$, wird gemäß der numerischen Untersuchung in Abschnitt 5.1, eine thermografische Lokalisierbarkeit der Ablöseposition mit der messsystemseitig maximalen spatio-temporalen Auflösung bei der Anwendung des DIT-Ansatzes erwartet.

DIT-Ansatz

Die graphische Ergebnisdarstellung der Auswertung des zweiten Experiments mit dem DIT-Ansatz in Abb. 5.11 orientiert sich an der Auswertung des ersten Experiments in Abb. 5.9. In der oberen Bildzeile ist auf der linken Seite das Differenzbild zwischen den Zeitpunkten t_A und t_{max} (Abb. 5.11a.1) und auf der rechten Seite der gemittelte Verlauf der spaltenweise normierten Auswertegröße über die normierte Sehnenposition (Abb. 5.11a.2) dargestellt. Die gleiche Ergebnisdarstellung erfolgt in den Abb. 5.11b.1 – Abb. 5.11c.2 für die sequentiellen Differenzbilder beim Einsetzen der Böe. Nicht eingezeichnet sind die zur Berechnung des CNR definierten Auswertebereiche, siehe Abb. C.2 für die Festlegung der Auswertebereiche.

Die räumliche Verschiebung der Transitionsposition sowie das Auftreten von Strömungsablösung sind anhand des Bildkontrasts in Abb. 5.11a.1 sowie mit den in Abschnitt 3.3.3 definierten thermischen Merkmalen im Verlauf der Auswertegröße in Abb. 5.11a.2 eindeutig detektierbar. Konkret sind die folgenden Merkmale zur eindeutigen Identifikation der verschiedenen Strömungsbereiche erkennbar:

- **Laminar-turbulente Transition:** Die in Abb. 5.8a.2 als initial laminar identifizierte Bereiche sind in Abb. 5.11a.1 als dunkle keilförmige Muster mit negativen ΔT_s erkennbar. Die initial laminaren Bereiche sind in turbulente Bereiche übergegangen und wurden in der Folge stärker konvektiv gekühlt. Für die in Abb. C.2 definierten Auswertebereiche beträgt das CNR 5,3. Demnach ist eine räumliche Verschiebung der Transitionsposition zur Vorderkante detektierbar.
- **Instationäre Strömungsablösung:** In Strömungsrichtung ist in Abb. 5.11a.1 ab ca. 60 % der Sehnenlänge über den gesamten radialen Bereich ein deutlicher Anstieg und nachfolgender Abfall von ΔT_s erkennbar (siehe Polynomfit). Das in Abb. 5.11a.1 und Abb. 5.11a.2 gekennzeichnete Maximum markiert die zeitlich gemittelte Ablöseposition und resultiert aus der Abnahme der konvektiven Kühlung im Ablösebereich bzw. dem Anstieg der konvektiven Kühlung nach der Ablöseposition. Die räumlich aufgelöste Unterscheidbarkeit der

Strömungsbereiche wird mit dem CNR von 1,9 nachgewiesen. Die Unsicherheit der modellbasierten Lokalisierung der Ablöseposition beträgt 2,5 px (2,3 %c). Im Ergebnis wird anhand der Auswertung des transienten Antwortverhaltens zwischen t_A und t_{max} instationäre Strömungsablösung detektiert und die zeitlich gemittelte Ablöseposition über das gesamte Bildfeld mit einer Unsicherheit von 2,5 px bestimmt.

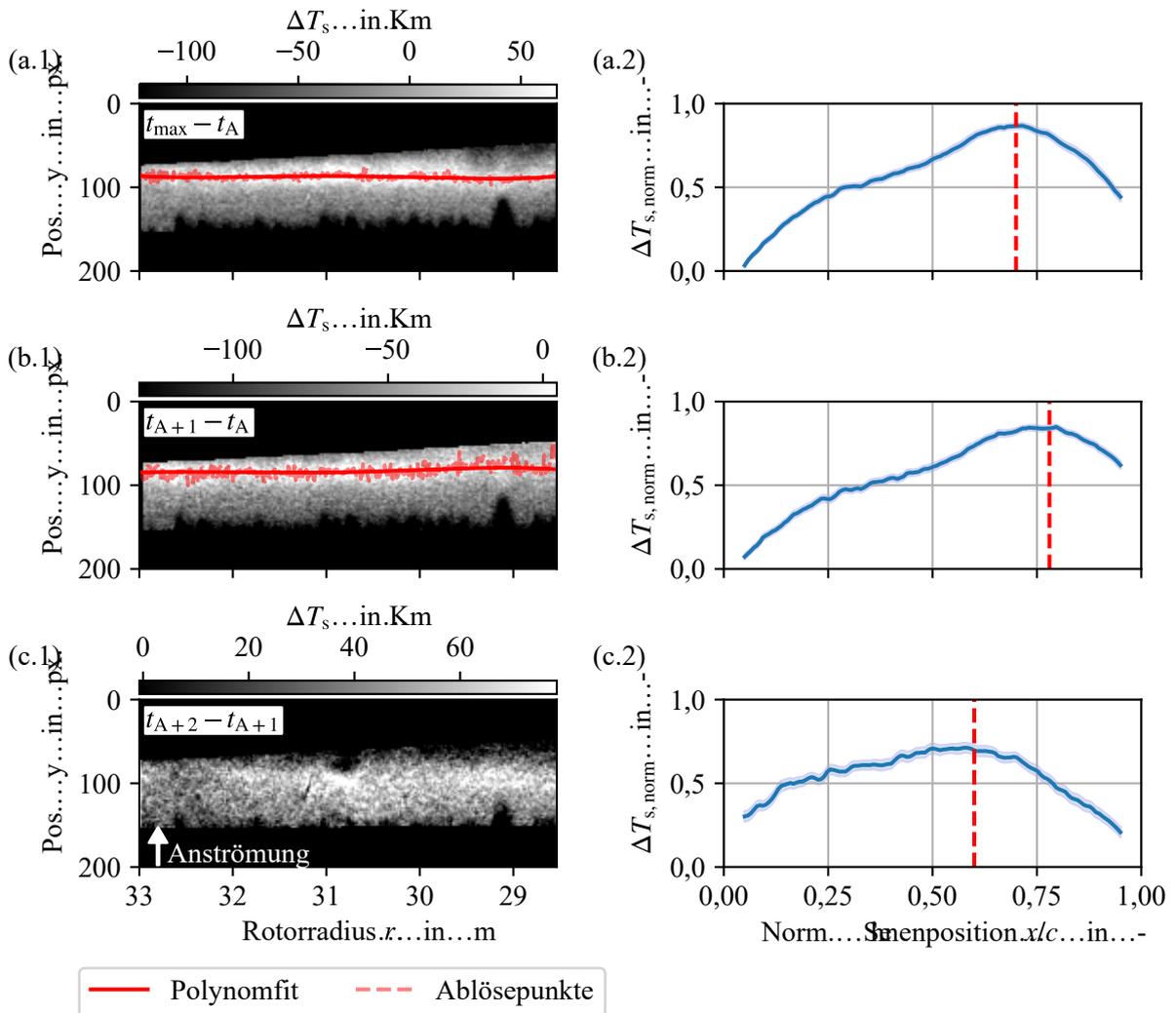


Abb. 5.11: Auswertung der IRT-Bildserie des zweiten Experiments mit dem DIT-Ansatz für einen Zeitbereich mit instationärer Strömungsablösung. Links: Verarbeitete Differenzbilder für verschiedene Zeitdifferenzen. Rechts: Quer zur Strömungsrichtung gemittelter Verlauf der spaltenweise normierten Auswertegröße mit eingezeichneten empirisch bestimmten 3σ -Konfidenzintervall. In den Abbildungen a.2, b.2 und c.2 wird der Ablösepunkt anhand des Maxima und anschließend abfallenden Verlaufs der Auswertegröße detektiert und lokalisiert (rote Linien). In den Differenzbildern a.1 und b.1 werden angelegt-abgelöste Bereiche mit einem CNR von 1,9 bzw. 1,2 unterschieden und eine Lokalisierung der Ablöseposition mit einer Unsicherheit von $u_{AP} = 2,5$ px bzw. $u_{AP} = 6,5$ px.

Die Bewertung des spatio-temporalen Auflösungsvermögen bei der Lokalisierung der dynamischen Transitions- und Ablöseposition erfolgt anhand der sequentiellen Differenzbilder Abb. 5.11b.1 – Abb. 5.11c.2. Gemäß der Abschätzung der thermischen Antwortzeit in Ab-

schnitt 5.1 wird erwartet, dass veränderliche Transitionspositionen mit der maximalen spatio-temporalen Auflösung lokalisierbar sind. Tatsächlich ist die veränderliche Transitionsposition im ersten sequentiellen Differenzbild (Abb. 5.11b.1) deutlich erkennbar. Das CNR zwischen angelegt–abgelösten Bereichen beträgt 4,8 und ist somit > 1 . Sofern die Böe tatsächlich zwischen den Zeitpunkten t_A und t_{A+1} einsetzt folgt, dass die Verschiebung der laminar-turbulenten Transition mit der messsystemseitig maximalen zeitlichen Auflösung räumlich aufgelöst lokalisierbar ist. Hinsichtlich der angestrebten Lokalisierung der Ablöseposition ist in Abb. 5.11b.1 in Strömungsrichtung ein Intensitätssprung im Bereich der eingezeichneten roten Linie erkennbar. In Übereinstimmung mit der zuvor bestimmten zeitlich gemittelten Ablöseposition, wird die eingezeichnete Linie als Ablöselinie identifiziert. Das CNR zwischen den angelegt–abgelösten Bereichen beträgt 1,2 und liegt somit im abgeschätzten Bereich für $\dot{q}_{s,abs} = 70 \text{ W m}^{-2}$ in Abb. 5.4. Demnach wird beim Einsetzen von Strömungsablösung im zweiten Experiment eine Unterscheidung angelegter-abgelöster Strömungsbereiche mit der maximalen zeitlichen und radialen Auflösung erreicht. Die zufällige Unsicherheit bei der Lokalisierung der Ablöseposition in Strömungsrichtung beträgt $u_{AP} = 6,5 \text{ px}$ (5,9 %c). Im zweiten Zeitschritt bei t_{A+2} ist anhand der Lage des Signalmaximums in der räumlich gemittelten Darstellung eine Verschiebung der Ablöseposition in Richtung der Vorderkante bis zu $x/c = 0,62$ erkennbar. Für die räumlich aufgelöste Unterscheidung der Strömungsbereiche steht in Abb. 5.11a.3, im Vergleich zu Abb. 5.11a.2, aufgrund des abklingenden thermischen Antwortverhaltens ein deutlich reduzierter Bildkontrast zur Verfügung. Im Ergebnis kann der Ablösebereich nur mit Vorwissen identifiziert werden. Mit dem Ablösepunkt in Zusammenhang stehende positive Werte der Auswertegröße sind primär im Bereich von $r = 28,7 \text{ m}$ bis $r = 31,5 \text{ m}$ sichtbar. Darauf basierend wird gefolgert, dass sich die Ablöseposition insbesondere im benannten Rotorradiusbereich und somit räumlich ungleichmäßig verschiebt.

PCA

Die PCA-basierte Auswertung des zweiten Experiments umfasst 14 aufeinanderfolgende Bilder für den ungefähren Zeitbereich des detektierten Böenereignis. Abb. 5.12 zeigt die Intensitätsverteilung der zweiten PC. Die mit dem DIT-Ansatz identifizierten Strömungsinformationen sind in der zweiten PC enthalten, weshalb sich die Ergebnisdarstellung auf die zweite PC beschränkt. In Übereinstimmung mit der physikalisch interpretierbaren Auswertung des transienten thermischen Antwortverhalten in Abb. 5.11a.1 sind bei der Auswertung der zweiten PC in Abb. 5.12 die folgenden Merkmale detektier- und quantifizierbar:

- Laminar-turbulente Transitionsbereiche werden als helle keilförmige Muster abgebildet und sind mit einem CNR von 7,8 von den umgebenden dauerhaft turbulent überströmten Bereichen unterscheidbar. Im Vergleich zur Auswertung mit dem DIT-Ansatz in Abb. 5.11a.1 führt die PCA zu einer Steigerung des CNR um 47 %, bzw. um 200 % im Vergleich zur PCA-basierten Auswertung im ersten Experiment.
- Der instationär abgelöste Strömungsbereich ist über den gesamten Bildbereich anhand einer sprunghaften Intensitätsabnahme in Strömungsrichtung sichtbar. Im Vergleich zur zeit-

lich gemittelten Auswertung mit dem DIT-Ansatz ist die Ablöselinie deutlich zur Vorderkante verschoben. Die Verschiebung der eingezeichneten Linie wird dadurch erklärt, dass bei der Approximation des Intensitätsverlaufs mit der Verteilungsfunktion der Normalverteilung im zweiten Experiment die Position beginnender Strömungsablösung und nicht die Ablöseposition lokalisiert wird. Das CNR zwischen dem abgelösten und dem turbulent-angelegten Referenzbereich beträgt 2,8. Somit wird die theoretische Lokalisierbarkeit der Ablöseposition mit der maximalen Bildauflösung bestätigt. Die Unsicherheit der modellbasierten Lokalisierung der Ablöseposition beträgt $u_{AP} = 2,5 \text{ px}$. Im Vergleich zu der transienten Auswertung mit dem DIT-Ansatz (Abb. 5.11a.1) wird durch die Anwendung der PCA eine Steigerung des CNR um 47% und eine Reduktion der Messunsicherheit bei der Lokalisierung der Ablöseposition um 8% erreicht. Nimmt man die PCA-basierte Auswertung im ersten Experiment als Referenz, so wird in Folge der erhöhten $\dot{q}_{s,abs}$ eine Verbesserung der beiden Kennzahlen CNR und u_{AP} um 100% und 51% erreicht.

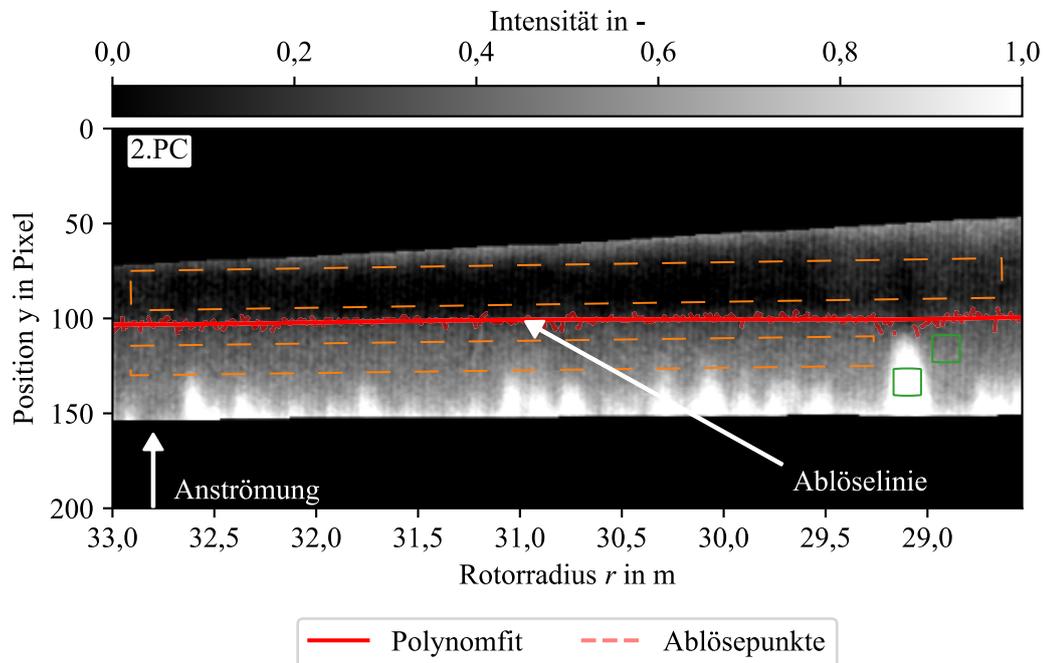


Abb. 5.12: Darstellung der zweiten PC bei der Auswertung von 14 aufeinanderfolgenden thermografischen Bildern mittels einer PCA im zweiten Experiment. Die räumliche Intensitätsverteilung ermöglicht eine Unterscheidung initial laminar-turbulenter Bereiche (grüne Rechtecke) und angelegt-abgelöster (orange gestrichelte Rechtecke) Bereiche. Die eingezeichneten räumlich aufgelösten Positionen beginnender Strömungsablösung werden mit einer Unsicherheit von $u_{AP} = 2,5 \text{ px}$ lokalisiert.

Im Ergebnis der Auswertung des zweiten Experiments wird die im ersten Experiment erstmalig realisierte Detektion und Lokalisierung instationärer Strömungsablösung mit Hilfe von IRT reproduziert. Darüber hinaus wird nachgewiesen, dass die erhöhte absorbierte Strahlungsleistung zu einer im Vergleich zum ersten Experiment verbesserten Detektier- und Lokalisierbarkeit instationärer Strömungsablösung führt. Konkret wird:

- (i) die Breite der 3σ -Konfidenzintervalle in der räumlich gemittelten Auswertung des DIT-Ansatzes im Mittel um 41 % reduziert,
- (ii) mit dem DIT-Ansatz eine eindeutige Lokalisierung der Ablöseposition mit der maximalen spatio-temporalen Auflösung realisiert,
- (iii) bei der PCA-basierten Auswertung eine Steigerung des CNR zwischen angelegt-abgelösten Bereichen um 100 % bzw. eine Minderung der Messunsicherheit bei der Lokalisierung der Ablöseposition um 51 % erreicht.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde die Detektier- und Lokalisierbarkeit von Strömungsablösungen an realen, nicht-skalierten WEA mit Infrarot-Thermografie (IRT) untersucht. Im Vergleich zu konventionellen Strömungsmesstechniken wie DGV oder PIV, ist IRT an in Betrieb befindlichen WEA einsetzbar. Außerdem bietet IRT als bildgebendes Messverfahren eine hohe räumliche Auflösung ohne die Strömung invasiv zu beeinflussen. Für die thermografisch einfach zu detektierende laminar-turbulente Transition ist IRT an WEA bereits ein etabliertes Verfahren. Eine offene Forschungsfrage war bisher hingegen, inwieweit IRT eine eindeutige Detektion und Lokalisierung von Strömungsablösungen an WEA ermöglicht. Das Ziel dieser Arbeit war es daher, die Messfähigkeiten eines auf IRT basierenden Messsystems zur nicht-invasiven Detektion und räumlich hochaufgelösten Lokalisierung von Strömungsablösungen zu charakterisieren und auf die In-Prozess-Messung an einer nicht-skalierten WEA zu übertragen. Hinsichtlich der Strömungsablösungsmechanismen wurde zwischen stationär auftretender Strömungsablösung im Blattwurzelbereich und instationär auftretender Strömungsablösung im äußeren Rotorblattbereich unterschieden.

6.1 Ausgangslage der Arbeit

Auf dem Forschungsgebiet der thermografischen Strömungsvisualisierung wurden bisher primär in Windkanaluntersuchungen unterschiedliche Ansätze zur Erfassung der laminar-turbulenten Transition, laminarer Ablöseblasen sowie turbulenter Strömungsablösung bei definierten stationären oder instationären Anströmbedingungen erfolgreich eingesetzt. Den meisten Untersuchungen gemein ist die Optimierung des CNR zwischen verschiedenen Strömungsbereichen durch geringe Messabstände, eine aktive Erwärmung oder Kühlung sowie strukturelle Modifizierungen des Messobjektes. Bei Freifeldmessungen an WEA führen die großen Messabstände von $>100\text{ m}$ und die vergleichsweise geringe solare Erwärmung mit $<175\text{ W m}^{-2}$ zu geringen CNRs. Weiterhin wird das Messergebnis durch zahlreiche Quereinflüsse wie anisotrope Wärmeleitung, die anisotrope solare Erwärmung der Rotorblattoberfläche oder die instationären und in der Regel unbekannteren Anströmbedingungen beeinflusst. Trotz der genannten Limitierungen wurde die Eignung von IRT zur Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition an WEA anhand der Intensitätsverteilung einzelner Thermogramme bereits vielfach nachgewiesen. Die Untersuchungen im Windkanal bestätigen zwar das grundsätzlich Potential von IRT zur Detektion von Strömungsablösungen und bieten ein methodisches Fundament für die Konzeption weiterführender Auswertungsansätze, ermöglichen jedoch keine Aussage zur thermografischen Detektierbarkeit von Strömungsablösung oder der nachfolgenden Lokalisierbarkeit der Ablöse-

position an Rotorblättern von WEA. Bisher konnte somit keine thermografische Detektion von Strömungsablösung an WEA realisiert werden.

Ausgangspunkt für die Konzeption eines geeigneten Auswertansatz zur Detektion und Lokalisierung stationärer Strömungsablösung in dieser Arbeit war die von Dollinger et al. [24] vorgestellte Auswertung des dynamischen Verhaltens der Oberflächentemperatur anhand der zeitlichen Standardabweichung sowie Fourier Koeffizienten. Es wurde gezeigt, dass sich der Kontrast zwischen angelegten–abgelösten Strömungsbereichen über die Betrachtung zeitlicher Temperaturfluktuationen erhöhen lässt. Das Verständnis der Messkette blieb hingegen unvollständig, so dass keine eindeutige Detektion und Lokalisierung von Strömungsablösungen anhand physikalisch interpretierbarer thermischer Signaturen erreicht wurde. Auf Grundlage dessen wurde gefolgert, dass die Auswertung spatio-temporal fluktuierender thermischer Ablösesignaturen der am vielversprechendste Ansatz ist, um den Kontrast zwischen verschiedenen Strömungsbereichen zu erhöhen sowie eine Detektierbarkeit von stationären Strömungsablösungen an WEA anhand von eindeutigen thermischen Signaturen zu realisieren.

Zur zeitaufgelösten Detektion und Lokalisierung von instationärer Strömungsablösung lieferte der von Raffel et al. [69] vorgestellte differentielle thermografische Messansatz die methodische Grundlage. Hier war die Anwendbarkeit des differentiellen thermografischen Messansatzes bei Messungen an WEA zu klären. Darüber hinaus war unklar, inwieweit eine Kombination des differentiellen thermografischen Messansatzes mit einer zeitlich gemittelten Auswertung für eine Maximierung der spatio-temporalen Auflösung bei der Detektion und Lokalisierung von instationärer Strömungsablösung genutzt werden kann.

6.2 Wissenschaftlicher Fortschritt der Forschungsergebnisse

Um den Messansatz der thermografischen Strömungsvisualisierung zur Detektion und Lokalisierung von Strömungsablösungen an WEA zu befähigen, wurde die Messkette analysiert und nachfolgend geeignete Signalverarbeitungskonzepte erarbeitet. Die Analyse der Messkette begründet die Vorteile des grundsätzlichen Ansatzes der Auswertung spatio-temporaler Temperaturfluktuationen im Vergleich zur klassischen Auswertung zeitlich gemittelter Thermogramme mit dem reduzierten Einfluss systematischer Quereinflüsse auf das Messergebnis. Die Minderung von strömungsunabhängigen Einflüssen wie lateraler und anisotroper Wärmeleitung sowie nicht-isotroper Strahlungseigenschaften der Rotorblattoberfläche führt zu einer erhöhten Korrelation zwischen der Auswertgröße und den thermischen Ablösesignaturen. Darüber hinaus ermöglicht die Analyse der konvektiven Wärmeübertragungsmechanismen die Identifikation physikalisch interpretierbarer thermischer Ablösesignaturen bei der Auswertung des thermischen Antwortverhaltens auf instationäre Anströmbedingungen. Im Ergebnis vereinen die so konzipierten Signalverarbeitungsansätze (UIC-Ansatz und DIT-Ansatz) die Vorteile einer gesteigerten Empfindlichkeit bezüglich physikalisch interpretierbarer thermischer Merkmale zur eindeutigen Detektion und Lokalisierung von Strömungsablösungen bei einer reduzierten Empfindlichkeit hinsichtlich von Quereinflüssen.

Die Limitierung der konzipierten physikalisch interpretierbaren Signalverarbeitungsansätze besteht darin, dass die Auswertung des Kleinsignalverhaltens zu einem geringen CNR zwischen den verschiedenen Strömungsbereichen führt. Um neben der merkmalsbasierten Detektion und Lokalisierung von Strömungsablösungen einen maximalen Kontrast zwischen den Strömungsbereichen zu erreichen, wird zusätzlich das in der Bildverarbeitung etablierte Verfahren der PCA angewendet. Im Kontext des Forschungsfeldes der thermografischen Strömungsvisualisierung besteht der wissenschaftliche Fortschritt hierbei, neben dem Anwendungszweck der Detektion von Strömungsablösungen, in der komplementären Nutzung eines Black- und White-Box-Modells. Somit werden Auswertungsansätze zur Unterscheidung von Strömungsbereichen mit einem maximalen Kontrast bei gleichzeitiger physikalischer Interpretierbarkeit der Ergebnisse etabliert.

Die experimentelle Umsetzung der Untersuchungen umfasst die Validierung der Signalverarbeitungsansätze in Windkanaluntersuchungen sowie die Klärung der Übertragbarkeit der Messansätze auf die Bedingungen bei Freifeldmessungen. In den Windkanaluntersuchen wurde die Eignung des UIC-Ansatzes für eine eindeutige Detektion und Lokalisierung stationärer Strömungsablösung validiert. Der laminar-turbulente Transitionsbereich und der Bereich der Strömungsablösung sind anhand von Maxima der ausgewerteten Fluktuation der Oberflächentemperatur, induziert durch die räumliche Verschiebung der Strömungsbereiche, detektierbar. Der stationär abgelöste Strömungsbereich wird hingegen durch eine kontinuierliche Zunahme der Auswertegröße identifiziert. Mit dem Vorwissen der Ergebnisse des UIC-Ansatzes sind bei der Anwendung einer PCA die spatio-temporal variablen Grenzen der verschiedenen Strömungsbereiche anhand der Intensitätsverteilung in den einzelnen PCs mit einem erhöhten CNR detektierbar. So sind Bereiche mit angelegter und abgelöster Strömung mit einem im Vergleich zur klassischen Auswertung um 100 % gesteigerten CNR unterscheidbar. Bei der anschließenden Übertragung auf Feldmessungen ermöglichen die im Windkanal verifizierten thermischen Ablösesignaturen eine merkmalsbasierte Detektion und Lokalisierung stationärer Strömungsablösung über den gesamten Bildbereich. Mit der PCA lassen sich die Merkmale reproduzieren sowie CNRs von 3,98 und 2,46 zwischen angelegten und abgelösten Strömungsbereichen erreichen. Somit wurde erstmalig eine in-prozess-fähige, nicht-invasive und eindeutige Detektion und Lokalisierung stationärer Strömungsablösung im Blattwurzelbereich einer in Betrieb befindlichen WEA mittels IRT realisiert.

Die zeitlichen Auflösungsgrenzen der IR thermografischen Strömungsvisualisierung beim Auftreten von instationärer Strömungsablösung wurden mit Hilfe einer numerischen Simulation abgeschätzt. Während veränderliche Transitionspositionen bei idealen Messbedingungen nach einer thermischen Antwortzeit von (0,015 – 0,02) s mit einem CNR von eins erkennbar sind, beträgt die thermische Antwortzeit im Fall von instationären Ablösungen (0,32 – 0,75) s. Gemessen an zukünftig mit einem rotierenden Messsystem realisierbaren Abtastraten von <0,1 s folgt, dass die Trägheit des thermischen Antwortverhaltens die spatio-temporalen Auflösungsgrenzen bei der thermografischen Erfassung von instationären Strömungsablösungen limitiert. Basierend auf den Ergebnissen der experimentellen Anwendung des konzipierten zweistufigen Signalver-

arbeitungsansatzes bei Messungen mit unterschiedlicher solarer Erwärmung und einer messsystemseitig limitierten Abtastrate von ca. 3,3 s werden folgende Schlussfolgerungen gezogen:

- (1) Die Auswertung der räumlichen Standardabweichung von Differenzbildern (σ DIT-Ansatz) ermöglicht die Identifikation von Zeitpunkten mit stark wechselnden Anströmbedingungen, da wechselnde Anströmbedingungen zu einem räumlich unterschiedlichen Antwortverhalten der Oberflächentemperatur führen.
- (2) Ein kombinierter Bildauswertungsansatz, bestehend aus einer Analyse des transienten thermischen Antwortverhaltens (DIT-Ansatz) und der Anwendung einer PCA, führt auch bei Messbedingungen mit geringer solarer Erwärmung zu einer Detektion und Lokalisierung von Strömungsablösungen mit der maximalen zeitliche Auflösung als auch der maximalen räumlichen Auflösung. Bei der modellbasierten Lokalisierung der Ablöseposition wird eine Unsicherheit von 4,7 px erreicht.
- (3) Bei einer solaren Erwärmung mit $\dot{q}_{s,abs} \approx 70 \text{ W m}^{-2}$ ermöglicht der DIT-Ansatz eine physikalisch interpretierbare Detektion und Lokalisierung instationärer Strömungsablösung mit der messsystemseitig maximalen spatio-temporalen Auflösung. Dabei wird die Ablöseposition mit einer Unsicherheit von 6,5 px (5,9 % c) bei einer zeitlichen Auflösung von 5 s lokalisiert.
- (4) Die vorgestellten Ergebnisse zur thermografischen Erfassung instationärer Strömungsablösung sind reproduzierbar.

Somit wurde zum ersten Mal eine thermografische Detektion und Lokalisierung instationärer Strömungsablösungen an einer in Betrieb befindlichen WEA realisiert. Darüber hinaus wurden die von den Messbedingungen abhängigen spatio-temporalen Auflösungsgrenzen identifiziert und die Eignung des kombinierten Messansatzes zum Umgang mit diesen nachgewiesen.

6.3 Ausblick auf weiterführenden Forschungsbedarf

Die nachgewiesene Eignung von IRT für die Erfassung stationärer und instationärer Strömungsablösungen an in Betrieb befindlichen WEA zeigen das grundsätzliche Potential des Messansatzes und begründen die Notwendigkeit weiterführender Untersuchungen der bisher ungeklärten thermo- und fluiddynamischer Wirkmechanismen. Weiterhin motivieren die Ergebnisse eine stärkere Einbindung des Messansatzes in die Windenergieforschung bis hin zur Nutzbarmachung für industrielle Entwicklungsarbeiten. Im Ergebnis besteht die Chance und Herausforderung vielfältige weiterführende Forschungsansätze in unterschiedliche Technologiereifephasen zu integrieren.

Für die Konzipierung geeigneter Signalverarbeitungskonzepte wurden die Wirkmechanismen zwischen den Ablöse-Strömungsstrukturen und der thermografisch messbaren thermischen Signatur auf der Oberfläche im Wesentlichen auf Grundlage von experimentellen Arbeiten mit 2D-Strömungen und stationären Strömungsbedingungen abgeleitet. Die Einflüsse der an WEA

auftretenden 3D-Strömungseffekte und instationärer aerodynamischer Effekte auf die für den thermografischen Messansatz relevanten Wirkmechanismen wurden hingegen vernachlässigt und sind nach dem Kenntnisstand des Autors bisher unerforscht. Darüber hinaus wurde bei der Anwendung der Signalverarbeitungsansätze, welche auf der Auswertung spatio-temporaler Temperaturfluktuationen basieren, der systematische Einfluss der thermischen Wechselwirkung zwischen der Oberfläche des Rotorblattes und der inneren Struktur mit einem Verweis auf die kleinen Fourier-Zahlen vernachlässigt. Folglich besteht Forschungsbedarf bei der Klärung der strömungsmechanischen Wirkmechanismen während des Auftretens von Strömungsablösungen an WEA. Bei der Analyse der Wirkmechanismen sollte für reale Rotorblattmodelle der resultierende Einfluss der thermischen Wechselwirkung zwischen der Oberfläche des Rotorblattes und der inneren Struktur auf das thermografische Messergebnis abschließend geklärt werden. Mögliche Untersuchungsansätze für die gestellten Forschungsfragen sind Windkanalmessungen mit einem 3D-Rotorblattprofil, die Verwendung von PIV, Wärmefluss- und Heißfilmsensoren als Referenzmesstechniken in Kombination mit auf die Windkanalexperimente abgestimmten Large-Eddy-Simulationen.

In dieser Arbeit wurde die Eignung von IRT zur zeitaufgelösten Erfassung von instationären Strömungsablösungen nachgewiesen. Die Instationarität der auftretenden Strömungsablösung wurde jedoch nicht näher spezifiziert und somit keine Erfassung von Dynamic Stall realisiert. Für das Forschungsobjekt WEA ist jedoch insbesondere die Erfassung von Dynamic-Stall-Phänomenen von großem Interesse. Im Rahmen der vorgeschlagenen experimentellen und numerischen Grundlagenuntersuchungen mit kontrollierten Strömungs- und Messbedingungen sollte deshalb explizit die prinzipiellen Messfähigkeiten und Messbarkeitsgrenzen der thermografischen Strömungsvisualisierung von Dynamic-Stall-Phänomenen geklärt werden. So ist die thermische Zeitskala unterschiedlicher Ablöse-Strömungsstrukturen und die Frage inwieweit thermisch auflösbare Ablösemerkmale eine Maximierung der Messfähigkeiten bis hin zu einer Charakterisierung von Dynamic-Stall-Phänomenen ermöglichen zu untersuchen.

Um eine thermografische Erfassung von Dynamic-Stall-Phänomenen an in Betrieb befindlichen WEA zu realisieren bedarf es eine hohe Abtastrate zur zeitkontinuierlichen Auflösung der zeitlich veränderlichen Grenzschichtströmungszustände. Die Verwendung der Messergebnisse für weiterführende Forschungsaufgaben, wie die Validierung bisher semi-empirischer Dynamic-Stall-Modelle, erfordert darüber hinaus die Kenntnis der Ursache-Wirkung-Beziehung zwischen den aktuell weitgehend unbekanntem Anströmbedingungen und den erfassten Grenzschichtströmungseigenschaften. Bei den in dieser Arbeit vorgestellten Freifeldmessungen waren jedoch die geringe Abtastrate, aufgrund der Fixierung des Bildfeldes auf eine Rotorposition, und fehlende Kenntnisse bezüglich der Eigenschaften der Anströmung die wesentlichen messsystemseitigen Limitierungen. Demnach wird für die Anwendung des Messansatzes an WEA eine Erweiterung des Messsystems benötigt, um instationärer Strömungsphänomene wie Dynamic Stall zukünftig zeitlich auflösen und ein Verständnis der vorliegenden Wirkzusammenhänge realisieren zu können. In Form eines Prototypen eines mit der Anlage mitrotierenden Messsystemträgers sind diesbezügliche Vorarbeiten zur zeitkontinuierlichen Verfolgung eines Rotorblattabschnittes bereits erfolgt, siehe Abb. C.3. Im Sinne der in dieser Arbeit aufgezeigten zeitlichen Messbarkeitsgren-

zen bei der thermografischen Erfassung instationärer Strömungsablösungen besteht zusätzliches Forschungspotential in der Kombination von IRT mit zusätzlichen, hinsichtlich der zeitlichen Auflösung verbesserten, Messmitteln wie akustischen Messungen.

Ein entscheidender Faktor für die Nutzarmachung der Messfähigkeiten des thermografischen Messansatzes an WEA besteht schließlich darin, eine von Expertenwissen unabhängige Erfassung der messbaren Strömungsinformationen zu ermöglichen. Die in dieser Arbeit konzipierten Signalverarbeitungsansätze stellen eine vielversprechende Grundlage für eine automatisierte Detektion und Lokalisierung von Strömungsablösungen dar. Bis dato erfordert die Anwendung der Signalverarbeitungsansätze jedoch die manuelle Festlegung diverser Auswerteparameter. Darüber hinaus fehlt noch eine umfassende Untersuchung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse für verschiedene Messparameter. Hierbei besteht insbesondere die Forschungsaufgabe, die vorgestellten Signalverarbeitungsansätze hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit bei variablen Messparametern zu charakterisieren. Das daraus erlangte Wissen wäre wiederum ein vielversprechender Ausgangspunkt für die Klärung der Forschungsfrage, inwieweit ein durch die Messparameter parametrisiertes Modell zur automatisierten Detektion und Lokalisierung von Strömungsablösungen bei bekannten Messbedingungen realisierbar ist. Im Ergebnis ergibt sich das Potential, einer breiten Anwenderschaft Perspektiven bei der Nutzarmachung des vorgestellten thermografischen Messansatzes zu eröffnen.

Literaturverzeichnis

- [1] *VDI heat atlas*. VDI-Buch. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, 2. ed. edition, 2010. doi: 10.1007/978-3-540-77877-6.
- [2] I. H. Abbott and A. E. von Doenhoff. *Theory of wing sections: Incl. a summary of airfoil data*. Dover books on chemistry and earth sciences. Dover Publications, New York, unabr. and corr. republ. der ausg. new york 1949 edition, 1959.
- [3] H. Abdi and L. J. Williams. Principal component analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(4):433–459, 2010. doi: 10.1002/wics.101.
- [4] B. J. Abu-Ghannam and R. Shaw. Natural Transition of Boundary Layers - The Effects of Turbulence, Pressure Gradient, and Flow History. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 22(5):213–228, 1980.
- [5] E. Achenbach. Total and local heat transfer from a smooth circular cylinder in cross-flow at high reynolds number. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18(12):1387–1396, 1975. doi: 10.1016/0017-9310(75)90252-5.
- [6] Albert Betz. Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnützung des Windes durch Windmotoren. *Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen*, (26):307–309, 1920.
- [7] A. I. Alekseyuk. The Eckert–Weise effect and energy separation under the flow interference behind side-by-side cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, 915, 2021. doi: 10.1017/jfm.2021.128.
- [8] P. Alexa, J. Solař, F. Čmiel, P. Valíček, and M. Kadulová. Infrared thermographic measurement of the surface temperature and emissivity of glossy materials. *Journal of Building Physics*, 41(6):533–546, 2018. doi: 10.1177/1744259117731344.
- [9] T. Astarita and G. M. Carlomagno. *Infrared Thermography for Thermo-Fluid-Dynamics*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013. doi: 10.1007/978-3-642-29508-9.
- [10] H. D. Baehr and K. Stephan. *Wärme- und Stoffübertragung*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013. doi: 10.1007/978-3-642-36558-4.
- [11] F. Bernhard. *Handbuch der technischen temperaturmessung*. VDI-Buch. Springer Vieweg, Heidelberg, 2. auflage edition, 2014.

- [12] L. Boltzmann. Ableitung des Stefan'schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der electromagnetischen Lichttheorie. *Annalen der Physik*, 258(6):291–294, 1884. doi: 10.1002/andp.18842580616.
- [13] J. Bons. A Critical Assessment of Reynolds Analogy for Turbine Flows. *Journal of Heat Transfer*, 127(5):472–485, 2005. doi: 10.1115/1.1861919.
- [14] T. Bouwmans, S. Javed, H. Zhang, Z. Lin, and R. Otazo. On the Applications of Robust PCA in Image and Video Processing. *Proceedings of the IEEE*, 106(8):1427–1457, 2018. doi: 10.1109/JPROC.2018.2853589.
- [15] T. Brooks, D. Pope, and M. Marcolini. Airfoil self-noise and prediction. 1218, 1989.
- [16] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Erneuerbare Energien in Zahlen: Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2020.
- [17] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Bundesbericht Energieforschung 2022: Forschungsförderung für die Energiewende.
- [18] P. K. Chang. *Separation of Flow*. Elsevier Reference Monographs, s.l., 1. aufl. edition, 1970.
- [19] Charles P. Butterfield, David Simms, George N. Scott, and A. Craig Hansen. Dynamic stall on wind turbine blades. 1991.
- [20] G. P. Corten and H. F. Veldkamp. Insects can halve wind-turbine power. *Nature*, 412(6842): 41–42, 2001. doi: 10.1038/35083698.
- [21] L. de Luca, G. Guglieri, G. Cardone, and G. M. Carlomagno. Experimental analysis of surface flow on a delta wing by infrared thermography. *AIAA Journal*, 33(8):1510–1512, 1995. doi: 10.2514/3.12574.
- [22] P. Devinant, T. Laverne, and J. Hureau. Experimental study of wind-turbine airfoil aerodynamics in high turbulence. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(6): 689–707, 2002. doi: 10.1016/S0167-6105(02)00162-9.
- [23] C. Dollinger. *Thermografische Strömungsvisualisierung an Rotorblättern von Windenergieanlagen*. Forschungsberichte des Bremer Instituts für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft. Shaker Verlag, Aachen, 2018.
- [24] C. Dollinger, N. Balaesque, M. Sorg, and A. Fischer. IR thermographic visualization of flow separation in applications with low thermal contrast. *Infrared Physics & Technology*, 88: 254–264, 2018. doi: 10.1016/j.infrared.2017.12.001.
- [25] C. Dollinger, M. Sorg, N. Balaesque, and A. Fischer. Measurement uncertainty of IR thermographic flow visualization measurements for transition detection on wind turbines in operation. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 97:279–289, 2018. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2018.04.025.

- [26] C. Dollinger, N. Balaesque, N. Gaudern, D. Gleichauf, M. Sorg, and A. Fischer. IR thermographic flow visualization for the quantification of boundary layer flow disturbances due to the leading edge condition. *Renewable Energy*, 138:709–721, 2019. doi: 10.1016/j.renene.2019.01.116.
- [27] A. Einstein. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, 322(6):132–148, 1905. doi: 10.1002/andp.19053220607.
- [28] W. J. Emery and R. E. Thomson. *Data analysis methods in physical oceanography*. Elsevier, Kidlington, 2014.
- [29] G. D. Evangelidis and E. Z. Psarakis. Parametric image alignment using enhanced correlation coefficient maximization. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 30(10):1858–1865, 2008. doi: 10.1109/TPAMI.2008.113.
- [30] W. F. Holmgren, C. W. Hansen, and M. A. Mikofski. pvlib python: a python package for modeling solar energy systems. *Journal of Open Source Software*, 3(29):884, 2018. doi: 10.21105/joss.00884.
- [31] F.R. Menter and R. Sechner. Best Practice: RANS Turbulence Modeling in Ansys CFD. URL ansysinfo@ansys.com.
- [32] M. Gad-el Hak and D. M. Bushnell. Separation Control: Review. *Journal of Fluids Engineering*, 113(1):5–30, 1991. doi: 10.1115/1.2926497.
- [33] Y. Gao and G. Y. Tian. Emissivity correction using spectrum correlation of infrared and visible images. *Sensors and Actuators A: Physical*, 270:8–17, 2018. doi: 10.1016/j.sna.2017.12.027.
- [34] A. D. Gardner, C. C. Wolf, and M. Raffel. A new method of dynamic and static stall detection using infrared thermography. *Experiments in Fluids*, 57(9), 2016. doi: 10.1007/s00348-016-2235-4.
- [35] A. D. Gardner, A. R. Jones, K. Mulleners, J. W. Naughton, and M. J. Smith. Review of rotating wing dynamic stall: Experiments and flow control. *Progress in Aerospace Sciences*, 137:100887, 2023. doi: 10.1016/j.paerosci.2023.100887.
- [36] E. Gartenberg and A. S. Roberts. Airfoil transition and separation studies using an infrared imaging system. *Journal of Aircraft*, 28(4):225–230, 1991. doi: 10.2514/3.46016.
- [37] E. Gartenberg and A. S. Roberts. Twenty-five years of aerodynamic research with infrared imaging. *Journal of Aircraft*, 29(2):161–171, 1992. doi: 10.2514/3.46140.
- [38] R. Gasch and J. Twele. *Wind Power Plants*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012. doi: 10.1007/978-3-642-22938-1.

- [39] G. Gaussorgues. *Infrared Thermography*, volume 5 of *Microwave Technology Series*. Springer Netherlands, Dordrecht, 1994.
- [40] M. Ge, Le Fang, and Tian. Influence of Reynolds Number on Multi-Objective Aerodynamic Design of a Wind Turbine Blade. *PloS one*, 10(11):e0141848, 2015. doi: 10.1371/journal.pone.0141848.
- [41] M. S. Genç, İ. Karasu, and H. Hakan Açikel. An experimental study on aerodynamics of NACA2415 aerofoil at low Re numbers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 39:252–264, 2012. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2012.01.029.
- [42] G. Gerlach and H. Budzier. *Thermal infrared sensors: Theory, optimisation and practice*. Wiley, Hoboken, N.J., 2013.
- [43] H. Glauert. Airplane Propellers. In W. F. Durand, editor, *Aerodynamic Theory*, pages 169–360. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1935. doi: 10.1007/978-3-642-91487-4.
- [44] D. Gleichauf. Beiträge zur thermografischen Strömungsvisualisierung und Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition an Rotorblättern von Windenergieanlagen.
- [45] D. Gleichauf, F. Oehme, M. Sorg, and A. Fischer. Laminar-Turbulent Transition Localization in Thermographic Flow Visualization by Means of Principal Component Analysis. *Applied Sciences*, 11(12):5471, 2021. doi: 10.3390/app11125471.
- [46] V. Gnielinski. Berechnung mittlerer Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten an laminar und turbulent überströmten Einzelkörpern mit Hilfe einer einheitlichen Gleichung. *Forschung im Ingenieurwesen*, 41(5):145–153, 1975. doi: 10.1007/BF02560793.
- [47] A. V. Gorin. Turbulent Separated Flows: Near-Wall Behavior and Heat and Mass Transfer. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 1, 2008.
- [48] M. O. L. Hansen. *Aerodynamics of wind turbines*. Earthscan, London, reprinted. edition, 2010.
- [49] E. Hau, editor. *Windkraftanlagen*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2016. doi: 10.1007/978-3-662-53154-9.
- [50] J. H. Henninger. Solar absorptance and thermal emittance of some common spacecraft thermal-control coatings.
- [51] F. P. Incropera and D. P. DeWitt. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, Inc, New York City, New York, 4th edition edition, 1996.
- [52] Internetquelle. <https://www.syswe.de/windenergie-rotorblattinspektion/>, Letzte Aktualisierung: 22.02.2023.
- [53] I. T. Jolliffe and J. Cadima. Principal component analysis: a review and recent developments. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, 374(2065):20150202, 2016. doi: 10.1098/rsta.2015.0202.

- [54] J. G. Leishman. Challenges in modelling the unsteady aerodynamics of wind turbines. *Wind Energy*, 5(2-3):85–132, 2002. doi: 10.1002/we.62.
- [55] D. J. Lewis and R. L. Simpson. *An Experimental Investigation Of Heat Transfer in Three-Dimensional and Separating Turbulent Boundary Layers*. 1996.
- [56] X. Li, K. Yang, L. Zhang, J. Bai, and J. Xu. Large thickness airfoils with high lift in the operating range of angle of attack. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 6(3):033110, 2014. doi: 10.1063/1.4878846.
- [57] Z. Li, B. Wen, X. Dong, Z. Peng, Y. Qu, and W. Zhang. Aerodynamic and aeroelastic characteristics of flexible wind turbine blades under periodic unsteady inflows. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 197:104057, 2020. doi: 10.1016/j.jweia.2019.104057.
- [58] J. Martinez Suarez, P. Flaszynski, and P. Doerffer. Application of rod vortex generators for flow separation reduction on wind turbine rotor. *Wind Energy*, 21(11):1202–1215, 2018. doi: 10.1002/we.2224.
- [59] P. Medina, S. Schreck, J. Johansen, and L. Fingersh. Oil-flow visualization on a SWT-2.3-101 wind turbine. In *29th AIAA Applied Aerodynamics Conference*, Reston, Virginia, 2011. American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi: 10.2514/6.2011-3818.
- [60] M. Melius, R. B. Cal, and K. Mulleners. Dynamic stall of an experimental wind turbine blade. *Physics of Fluids*, 28(3):034103, 2016. doi: 10.1063/1.4942001.
- [61] W. Minkina and S. Dudzik. *Infrared thermography: Errors und uncertainties*. John Wiley and Sons, Chichester, 2009.
- [62] S. Montelpare and R. Ricci. A thermographic method to evaluate the local boundary layer separation phenomena on aerodynamic bodies operating at low Reynolds number. *International Journal of Thermal Sciences*, 43(3):315–329, 2004. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2003.07.006.
- [63] E. Ortyl, S. Kucharski, and T. Gotszalk. Refractive index modulation in the polyurethane films containing diazo sulfonamide chromophores. *Thin Solid Films*, 479(1-2):288–296, 2005. doi: 10.1016/j.tsf.2004.12.011.
- [64] A.-M. Parrey, D. Gleichauf, M. Sorg, and A. Fischer. Automated Detection of Premature Flow Transitions on Wind Turbine Blades Using Model-Based Algorithms. *Applied Sciences*, 11(18):8700, 2021. doi: 10.3390/app11188700.
- [65] F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, M. Blondel, P. Prettenhofer, R. Weiss, V. Dubourg, et al. Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of machine learning research*, 12(Oct):2825–2830, 2011.
- [66] R. Pereira, G. Schepers, and M. D. Pavel. Validation of the Beddoes-Leishman dynamic stall model for horizontal axis wind turbines using MEXICO data. *Wind Energy*, 16(2):207–219, 2013. doi: 10.1002/we.541.

- [67] M. Planck. Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum. *Annalen der Physik*, 309(3):553–563, 1901. doi: 10.1002/andp.19013090310.
- [68] L. Prandtl and O. K. Tietjens. *Applied Hydro- and Aeromechanics*. Dover Publications, 1957.
- [69] M. Raffel, C. B. Merz, T. Schwermer, and K. Richter. Differential infrared thermography for boundary layer transition detection on pitching rotor blade models. *Experiments in Fluids*, 56(2), 2015. doi: 10.1007/s00348-015-1905-y.
- [70] N. Rajic. Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures. *Composite Structures*, 58(4):521–528, 2002. doi: 10.1016/S0263-8223(02)00161-7.
- [71] T. Reichstein, A. P. Schaffarczyk, C. Dollinger, N. Balaesque, E. Schülein, C. Jauch, and A. Fischer. Investigation of Laminar–Turbulent Transition on a Rotating Wind-Turbine Blade of Multimegawatt Class with Thermography and Microphone Array. *Energies*, 12(11):2102, 2019. doi: 10.3390/en12112102.
- [72] K. Richter and E. Schülein. Boundary-layer transition measurements on hovering helicopter rotors by infrared thermography. *Experiments in Fluids*, 55(7), 2014. doi: 10.1007/s00348-014-1755-z.
- [73] I. Roehle and C. E. Willert. Extension of Doppler global velocimetry to periodic flows. *Measurement Science and Technology*, 12(4):420–431, 2001. doi: 10.1088/0957-0233/12/4/306.
- [74] A. Sareen, R. W. Deters, S. P. Henry, and M. S. Selig. Drag Reduction Using Riblet Film Applied to Airfoils for Wind Turbines. *Journal of Solar Energy Engineering*, 136(2), 2014. doi: 10.1115/1.4024982.
- [75] A. P. Schaffarczyk. *Windenergietechnik*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016.
- [76] A. P. Schaffarczyk, D. Schwab, and M. Breuer. Experimental detection of laminar-turbulent transition on a rotating wind turbine blade in the free atmosphere. *Wind Energy*, 20(2): 211–220, 2017. doi: 10.1002/we.2001.
- [77] H. Schlichting and K. Gersten. *Grenzschicht-Theorie: Mit 22 Tabellen*. Springer, Berlin and Heidelberg and New York, 10., überarb. aufl. edition, 2006.
- [78] E. Schmidt and E. Eckert. Über die Richtungsverteilung der Wärmestrahlung von Oberflächen. *Forschung im Ingenieurwesen*, 6(4):175–183, 1935. doi: 10.1007/BF02578830.
- [79] P. J. Schubel and R. J. Crossley. Wind Turbine Blade Design. *Energies*, 5(9):3425–3449, 2012. doi: 10.3390/en5093425.
- [80] N. Schuster. *Infrarotthermographie*. WILEY-VCH, Weinheim, 2., überarb. und erw. aufl. edition, 2004.

- [81] M. Seidel, editor. *Thermodynamik - Verstehen durch Üben*. De Gruyter, 2017. doi: 10.1515/9783110411294.
- [82] D. E. Shipley, M. S. Miller, M. C. Robinson, M. W. Luttges, and D. A. Simms. Techniques for the Determination of Local Dynamic Pressure and Angle of Attack on a Horizontal Axis Wind Turbine. 1995. doi: 10.2172/61151. URL <https://www.osti.gov/biblio/61151>.
- [83] B. Simon, A. Filius, C. Tropea, and S. Grundmann. IR thermography for dynamic detection of laminar-turbulent transition. *Experiments in Fluids*, 57(5), 2016. doi: 10.1007/s00348-016-2178-9.
- [84] R. L. Simpson. Review—A Review of Some Phenomena in Turbulent Flow Separation. *Journal of Fluids Engineering*, 103(4):520–533, 1981. doi: 10.1115/1.3241761.
- [85] R. L. Simpson. Turbulent Boundary-Layer Separation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 21(1):205–232, 1989. doi: 10.1146/annurev.fl.21.010189.001225.
- [86] J. Stefan. Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur. *Sitzungsber. Kaiserl. Akad. Wiss. Math. Naturwiss. Cl. II. Abth.*, 79(3):391–428, 1879.
- [87] D. Surek and S. Stempin. *Technische Strömungsmechanik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2014. doi: 10.1007/978-3-658-06062-6.
- [88] N. Swytink-Binnema and D. A. Johnson. Digital tuft analysis of stall on operational wind turbines. *Wind Energy*, 19(4):703–715, 2016. doi: 10.1002/we.1860.
- [89] I. Tani. Low-speed flows involving bubble separations. *Progress in Aerospace Sciences*, 5: 70–103, 1964. doi: 10.1016/0376-0421(64)90004-1.
- [90] V. Terekhov. Heat Transfer in Highly Turbulent Separated Flows: A Review. *Energies*, 14(4):1005, 2021. doi: 10.3390/en14041005.
- [91] W. A. Timmer and C. Bak. Aerodynamic characteristics of wind turbine blade airfoils. In *Advances in Wind Turbine Blade Design and Materials*, pages 109–149. Elsevier, 2013. doi: 10.1533/9780857097286.1.109.
- [92] W. A. Timmer and R. P. J. O. M. van Rooij. Summary of the Delft University Wind Turbine Dedicated Airfoils. *Journal of Solar Energy Engineering*, 125(4):488–496, 2003. doi: 10.1115/1.1626129.
- [93] W. A. Timmer and R. van Rooy. Thick airfoils for HAWTs. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 39(1-3):151–160, 1992. doi: 10.1016/0167-6105(92)90541-H.
- [94] H.-R. Tränkler and L. Reindl. *Sensortechnik*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014. doi: 10.1007/978-3-642-29942-1.
- [95] D. Traphan, I. Herráez, P. Meinschmidt, F. Schlüter, J. Peinke, and G. Gülker. Remote surface damage detection on rotor blades of operating wind turbines by means of infrared thermography. *Wind Energy Science*, 3(2):639–650, 2018. doi: 10.5194/wes-3-639-2018.

- [96] P.-Y. Tsai, T.-E. Chen, and Y.-L. Lee. Development and Characterization of Anticorrosion and Antifriction Properties for High Performance Polyurethane/Graphene Composite Coatings. *Coatings*, 8(7):250, 2018. doi: 10.3390/coatings8070250.
- [97] S. van der Walt, J. L. Schönberger, J. Nunez-Iglesias, F. Boulogne, J. D. Warner, N. Yager, E. Gouillart, and T. Yu. scikit-image: image processing in Python. *PeerJ*, 2:e453, 2014. doi: 10.7717/peerj.453.
- [98] G. A. M. van Kuik, J. Peinke, R. Nijssen, D. Lekou, J. Mann, J. N. Sørensen, C. Ferreira, J. W. van Wingerden, D. Schlipf, P. Gebraad, H. Polinder, A. Abrahamsen, G. J. W. van Bussel, J. D. Sørensen, P. Tavner, C. L. Bottasso, M. Muskulus, D. Matha, H. J. Lindeboom, S. Degraer, O. Kramer, S. Lehnhoff, M. Sonnenschein, P. E. Sørensen, R. W. Künneke, P. E. Morthorst, and K. Skytte. Long-term research challenges in wind energy – a research agenda by the European Academy of Wind Energy. *Wind Energy Science*, 1(1):1–39, 2016. doi: 10.5194/wes-1-1-2016.
- [99] P. Veers, K. Dykes, E. Lantz, S. Barth, C. L. Bottasso, O. Carlson, A. Clifton, J. Green, P. Green, H. Holttinen, D. Laird, V. Lehtomäki, J. K. Lundquist, J. Manwell, M. Marquis, C. Meneveau, P. Moriarty, X. Munduate, M. Muskulus, J. Naughton, L. Pao, J. Paquette, J. Peinke, A. Robertson, J. Sanz Rodrigo, A. M. Sempreviva, J. C. Smith, A. Tuohy, and R. Wisser. Grand challenges in the science of wind energy. *Science (New York, N.Y.)*, 366(6464), 2019. doi: 10.1126/science.aau2027.
- [100] S. Vey, H. M. Lang, C. N. Nayeri, C. O. Paschereit, and G. Pechlivanoglou. Extracting quantitative data from tuft flow visualizations on utility scale wind turbines. *Journal of Physics: Conference Series*, 524:012011, 2014. doi: 10.1088/1742-6596/524/1/012011.
- [101] M. Vollmer and K.-P. Möllmann. *Infrared thermal imaging: Fundamentals, research and applications*. Wiley, Weinheim, 2nd reprint edition, 2013.
- [102] C. Wang and Y. Gu. Research on infrared nondestructive detection of small wind turbine blades. *Results in Engineering*, 15:100570, 2022. doi: 10.1016/j.rineng.2022.100570.
- [103] Z. Wang, G. Tian, M. Meo, and F. Ciampa. Image processing based quantitative damage evaluation in composites with long pulse thermography. *NDT & E International*, 99:93–104, 2018. doi: 10.1016/j.ndteint.2018.07.004.
- [104] C. Weyrich. Einführung und Überblick. In W. Heywang, R. Müller, G. Winstel, and C. Weyrich, editors, *Optoelektronik II*, volume 11 of *Halbleiter-Elektronik*, pages 13–34. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1986. doi: 10.1007/978-3-642-82640-5.
- [105] W. Wien. Eine neue Beziehung der Strahlung schwarzer Körper zum zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie. In H.-G. Schöpf, editor, *Von Kirchhoff bis Planck*, pages 156–165. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1978. doi: 10.1007/978-3-663-13885-3.

- [106] W. P. Winfree, K. E. Cramer, J. N. Zalameda, P. A. Howell, and E. R. Burke. Principal component analysis of thermographic data. In S.-J. Hsieh and J. N. Zalameda, editors, *Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXVII*, SPIE Proceedings, page 94850S. SPIE, 2015. doi: 10.1117/12.2176285.
- [107] C. C. Wolf, A. D. Gardner, and M. Raffel. Infrared thermography for boundary layer transition measurements. *Measurement Science and Technology*, 31(11):112002, 2020. doi: 10.1088/1361-6501/aba070.
- [108] T. Worzewski, R. Krankenhagen, M. Doroshtnasir, M. Röllig, C. Maierhofer, and H. Steinfurth. Thermographic inspection of a wind turbine rotor blade segment utilizing natural conditions as excitation source, Part I: Solar excitation for detecting deep structures in GFRP. *Infrared Physics & Technology*, 76:756–766, 2016. doi: 10.1016/j.infrared.2016.04.011.
- [109] K. Xu and Y.-q. Hu. Fabrication of transparent Pu/ZrO₂ nanocomposite coatings with high refractive index. *Chinese Journal of Polymer Science*, 28(1):13–20, 2010. doi: 10.1007/s10118-010-8194-y.
- [110] Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11):1330–1334, 2000. doi: 10.1109/34.888718.

Eigene Veröffentlichungen

Zeitschriften (mit Peer-Review)

F. Oehme, J. Suhr, N. Balaesque, D. Gleichauf, M. Sorg, A. Fischer: Thermographic Stall Detection by Model-Inspired Evaluation of the Dynamic Temperature Behaviour. *Applied Sciences* 11(18):8442 (18. pp.), 2021.

F. Oehme, J. Suhr, N. Balaesque, D. Gleichauf, M. Sorg, A. Fischer: Thermographic detection of turbulent flow separation on rotor blades of wind turbines in operation. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* 226:105025 (12 pp.), 2022.

F. Oehme, D. Gleichauf, N. Balaesque, M. Sorg, A. Fischer: Thermographic detection and localisation of unsteady flow separation on rotor blades of wind turbines. *Frontiers in Energy Research* 10:1043065 (15 pp.), 2022.

D. Gleichauf, **F. Oehme**, M. Sorg, A. Fischer: Laminar-turbulent transition localization in thermographic flow visualization by means of principal component analysis. *Applied Sciences* 11(12):5471 (22 pp.), 2021.

D. Gleichauf, **F. Oehme**, A.-M. Parrey, M. Sorg, N. Balaesque, A. Fischer: On-site contactless visualization of the laminar-turbulent flow transition dynamics on wind turbines. *tm - Technisches Messen*, 2023.

Konferenzbeiträge

F. Oehme, M. Sorg, A. Fischer: Thermographic stall detection using model-based evaluations of the surface temperature response to oscillating fluid temperatures. *Sensor and Measurement Science International (SMSI 2021)*, E-conference, 3.-6.5.2021, No. D6.3, pp. 271-272.

F. Oehme, M. Sorg, A. Fischer: Instationäre thermografische Strömungsvisualisierung zur Detektion von Strömungsablösung an Windenergieanlagen. 28. GALA-Fachtagung "Experimentelle Strömungsmechanik", Bremen, 7.-9.9.2021, No. 49 (8 pp.).

D. Gleichauf, **F. Oehme**, M. Sorg, A. Fischer: Contrast enhancement in thermographic flow visualization by means of principal component analysis. *Wind Energy Science Conference (WESC 2021)*, E-conference, 25.-28.05.2021, Session: Condition & structural health monitoring (III).

F. Oehme, M. Sorg, A. Fischer: Detection and localization of flow separation on wind turbines by means of unsteady thermographic flow visualization. TORQUE 2022 - The Science of Making Torque from Wind, Delft, 1.-3.6.2022. Journal of Physics: Conference Series 2265:022101 (9 pp.).

F. Oehme, M. Sorg, A. Fischer: Thermografische Detektion von instationären Strömungsablösungen an Windenergieanlagen. 29. GALA-Fachtagung "Experimentelle Strömungsmechanik", Ilmenau, 6.-9.9.2022, No. 26 (10 pp.).

D. Feldmann, **F. Oehme**, L. von Germersheim, R. L. Parras, A. Fischer, M. Avila: Towards indirect assessment of surface anomalies on wind turbine rotor blades. 23. DGLR-Fachsymposium der STAB, Berlin, 9.-10.11.2022, No. S20.1.

A. von Freyberg, **F. Oehme**, A. Fischer: Thermographic flow visualization. DFMRS Windenergietagung 2023, Bremen, 23.3.2023.

Eingeladene Vorträge

F. Oehme, M. Sorg, A. Fischer: Thermografische Strömungsvisualisierung an Windenergieanlagen. InfraTec Thermografie Anwenderkonferenz, 01.07.2021.

Betreute studentische Arbeiten

Während der Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Universität Bremen wurden folgende studentische Arbeiten betreut:

- M. Singh:
Thermografische Strömungsvisualisierung an Windenergieanlagen auf Grundlage von Wärmedissipation innerhalb der Grenzschichtströmung.
Bachelorarbeit, Universität Bremen (2022)
- K. Mehrrens, D. Vrankar, N. Rüska, A. Pansegrau, C. Mekelburg, F. Meyer:
Geometrische Kalibrierung einer Thermografiekamera.
Bachelorprojekt, Universität Bremen (2021)

A Berechnung des gerichteten Emissionsgrades von Polyurethane

Die von Maxwell begründete Theorie der elektromagnetische Wellen ermöglicht die Berechnung des gerichteten spektralen Emissionsgrads einer Oberfläche bei Kenntnis der optischen Konstanten des Materials. Die Berechnungsvorschrift zur Bestimmung von ϵ_λ für elektrisch nichtleitende Materialien, wie der obersten Materialschicht von Rotorblättern aus Polyurethane, lautet [10]:

$$\epsilon_\lambda(n, \theta) = \frac{2a \cos(\theta)}{(a + \cos(\theta))^2} \left(1 + \frac{n^2}{(a \cos(\theta) + \sin^2(\theta))^2} \right), \quad (\text{A.1})$$

mit

$$a = \sqrt{n^2 - \sin^2(\theta)}. \quad (\text{A.2})$$

Nach der Maxwellschen Theorie ist ϵ_λ somit ausschließlich von der Brechzahl n und dem Abstrahlwinkel θ abhängig. Die Abhängigkeit von der Wellenlänge wird hingegen nicht berücksichtigt. Für Brechzahlen < 2 und Abstrahlwinkel $< 60^\circ$ ergeben sich unter Anwendung von Gl. A.1 gerichtete spektrale Emissionsgrade von $> 0,85$. Für Wellenlängenbereiche $> 2 \mu\text{m}$ zeigen experimentelle Untersuchungen eine gute Übereinstimmung mit Gl. A.1 [78]. Da in dieser Arbeit eine IR-Kamera mit einem im Wellenlängenbereich von $7,7 \mu\text{m}$ bis $10,2 \mu\text{m}$ empfindlichen Photonendetektor verwendet wird, ermöglicht Gl. A.1 eine grobe Abschätzung des gerichteten spektralen Emissionsgrads der untersuchten Rotorblätter.

B Berechnung der thermischen Antwortzeit

B.1 Berechnung des äußeren Wärmeübergangskoeffizienten

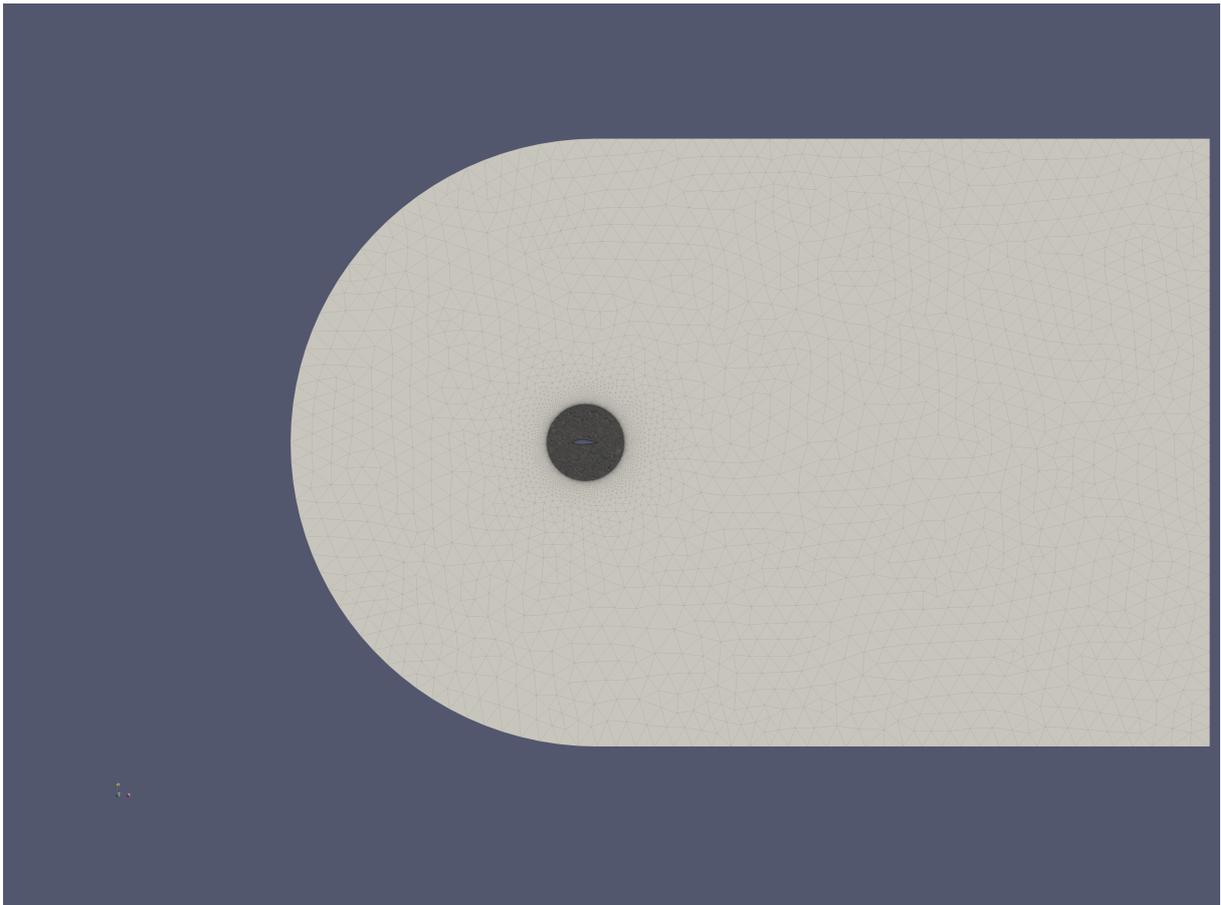


Abb. B.1: Geometrie des Windkanals mit eingezeichnetem Gitternetz bei der CFD-Simulation mit der Software Ansys Fluent.

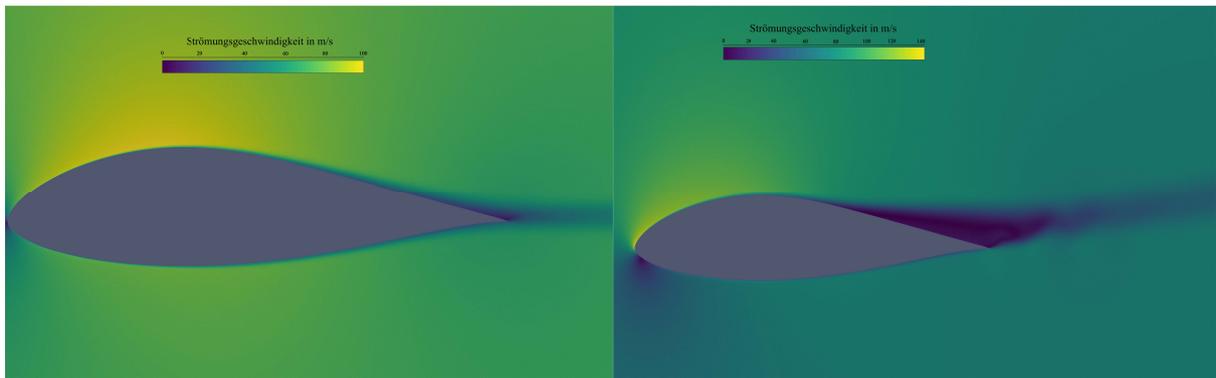


Abb. B.2: Berechnete Geschwindigkeitsverteilungen für das überströmte DU 96-W-180-Flügelprofil bei $Re_c = 2,5 \cdot 10^5$ und $\alpha = [4,18]^\circ$.

B.2 Lösung der Wärmeleitungsgleichung

Zur Lösung der Wärmeleitungsgleichung eines ebenen Temperaturfeldes (Gl.5.1) mit einer Finite-Differenzen-Methode werden die Variable Zeit t und die Koordinaten x, y mit

$$t_l = l \Delta t \quad \text{für } l = 0, 1, 2, \dots, o, \quad (\text{B.1})$$

$$x_i = i \Delta x \quad \text{für } i = 0, 1, 2, \dots, m, \quad (\text{B.2})$$

$$y_j = j \Delta y \quad \text{für } j = 0, 1, 2, \dots, n, \quad (\text{B.3})$$

diskretisiert. Die in Gl.5.1 auftretende Ableitung nach der Zeit wird durch vordere Differenzenquotienten approximiert, während die zweiten Ableitungen der Koordinaten durch zentrale Differenzenquotienten approximiert werden. Im Ergebnis ergibt sich ein ebenes Gitternetz zur Diskretisierung des in Abb. 5.1 eingeführten Bilanzraums und eine explizite Differenzengleichung zur Lösung der Wärmeleitungsgleichung an jeden Gitterpunkt. Das erstellte Gitternetz ist in Abb. B.3 dargestellt, Tab. B.1 enthält die gewählten Diskretisierungsparameter.

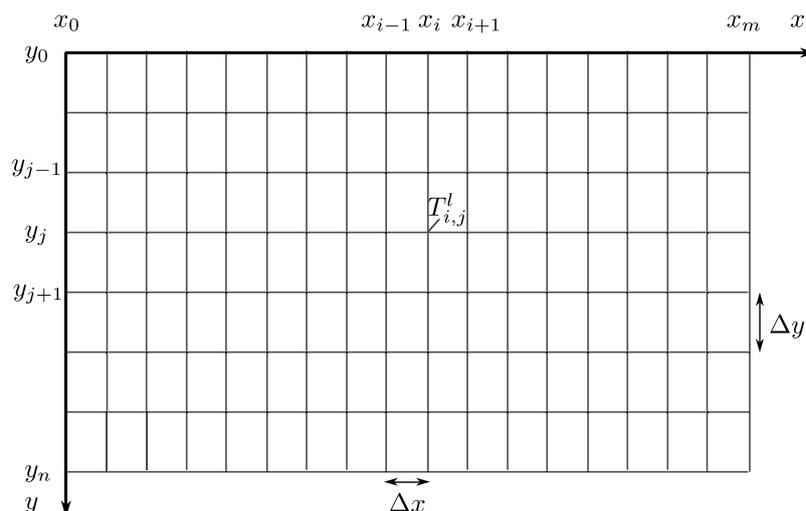


Abb. B.3: Schematische Darstellung des Gitternetzes zur Lösung der Wärmeleitungsgleichung mit einer Finite-Differenzen-Methode.

Tab. B.1: Übersicht der gewählten Gitterweiten für die zeitliche Auflösung Δt , die räumliche Auflösung in Strömungsrichtung Δx , und die räumliche Auflösung orthogonal zur Oberfläche Δy .

Variable	Diskretisierung
Δt	$1 \cdot 10^{-4} \text{ s}$
Δx	$0,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$
Δy	$2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$

Die verwendete explizite Differenzgleichung für die Gitterpunkte im inneren des Bilanzraums ist

$$T_{i,j}^{l+1} = \left(1 - \frac{2a_{\text{PU}} \Delta t}{\Delta x^2} - \frac{2a_{\text{PU}} \Delta t}{\Delta y^2}\right) \cdot T_{i,j}^l + \frac{a_{\text{PU}} \Delta t}{\Delta x^2} \cdot (T_{i-1,j}^l + T_{i+1,j}^l) + \frac{a_{\text{PU}} \Delta t}{\Delta y^2} \cdot (T_{i,j-1}^l + T_{i,j+1}^l) \quad (\text{B.4})$$

für $0 < j < 13$,

und

$$T_{i,j}^{l+1} = \left(1 - \frac{2a_{\text{GFK}} \Delta t}{\Delta x^2} - \frac{2a_{\text{GFK}} \Delta t}{\Delta y^2}\right) \cdot T_{i,j}^l + \frac{a_{\text{GFK}} \Delta t}{\Delta x^2} \cdot (T_{i-1,j}^l + T_{i+1,j}^l) + \frac{a_{\text{GFK}} \Delta t}{\Delta y^2} \cdot (T_{i,j-1}^l + T_{i,j+1}^l)$$

für $13 \leq j \leq n - 1$.
(B.5)

Hierbei bezeichnet a_{PU} die Temperaturleitfähigkeit von Polyurethane und a_{GFK} die Temperaturleitfähigkeit von glasfaserverstärkten Kunststoff. Unter Anwendung der Randbedingungen sind die Differenzgleichungen für die Oberkante des Bilanzraums

$$T_{i,0}^{l+1} = \left(1 - \frac{2a_{\text{PU}} \Delta t}{\Delta x^2} - \frac{2a_{\text{PU}} \Delta t}{\Delta y^2}\right) \cdot T_{i,0}^l + \frac{a_{\text{PU}} \Delta t}{\Delta x^2} \cdot (T_{i-1,0}^l + T_{i+1,0}^l) + \frac{a_{\text{PU}} \Delta t}{\Delta y^2} \cdot \left((T_{i,1}^l + \frac{2\dot{q}_{s,\text{abs}} \Delta y}{k_{\text{PU}}} - \frac{2h_a \Delta y}{k_{\text{PU}}} \cdot (T_{i,0}^l - T_{\text{ad}})) + T_{i,1}^l \right) \quad \text{für } 0 < i \leq m - 1, \quad (\text{B.6})$$

und

$$T_{i,n}^{l+1} = \left(1 - \frac{2a_{\text{GFK}} \Delta t}{\Delta x^2} - \frac{2a_{\text{GFK}} \Delta t}{\Delta y^2}\right) \cdot T_{i,n}^l + \frac{a_{\text{GFK}} \Delta t}{\Delta x^2} \cdot (T_{i-1,n}^l + T_{i+1,n}^l) + \frac{a_{\text{GFK}} \Delta t}{\Delta y^2} \cdot \left((T_{i,n-1}^l - \frac{2h_i \Delta y}{k_{\text{GFK}}} \cdot (T_{i,n}^l - T_i)) + T_{i,n-1}^l \right) \quad \text{für } 0 < i \leq m - 1, \quad (\text{B.7})$$

für die Unterkante des Bilanzraums. Die Differenzgleichungen für den linken Rand sind

$$T_{0,j}^{l+1} = \left(1 - \frac{2a_{\text{PU}} \Delta t}{\Delta x^2} - \frac{2a_{\text{PU}} \Delta t}{\Delta y^2}\right) \cdot T_{0,j}^l + \frac{a_{\text{PU}} \Delta t}{\Delta x^2} \cdot T_{0,j}^l + T_{0,j}^l + \frac{a_{\text{PU}} \Delta t}{\Delta y^2} \cdot (T_{0,j-1}^l + T_{0,j+1}^l) \quad (\text{B.8})$$

für $0 < j < 13$,

und

$$T_{0,j}^{l+1} = \left(1 - \frac{2a_{\text{GFK}} \Delta t}{\Delta x^2} - \frac{2a_{\text{GFK}} \Delta t}{\Delta y^2}\right) \cdot T_{0,j}^l + \frac{a_{\text{GFK}} \Delta t}{\Delta x^2} \cdot T_{0,j}^l + T_{0,j}^l + \frac{a_{\text{GFK}} \Delta t}{\Delta y^2} \cdot (T_{0,j-1}^l + T_{0,j+1}^l) \quad (\text{B.9})$$

für $13 \leq j \leq n - 1$.

Am rechten Rand gilt

$$T_{m,j}^{l+1} = \left(1 - \frac{2a_{\text{PU}} \Delta t}{\Delta x^2} - \frac{2a_{\text{PU}} \Delta t}{\Delta y^2}\right) \cdot T_{m,j}^l + \frac{a_{\text{PU}} \Delta t}{\Delta x^2} \cdot T_{m,j}^l + T_{m,j}^l + \frac{a_{\text{PU}} \Delta t}{\Delta y^2} \cdot (T_{m,j-1}^l + T_{m,j+1}^l) \quad (\text{B.10})$$

für $0 < j < 13$,

und

$$T_{m,j}^{l+1} = \left(1 - \frac{2a_{\text{GFK}} \Delta t}{\Delta x^2} - \frac{2a_{\text{GFK}} \Delta t}{\Delta y^2}\right) \cdot T_{m,j}^l + \frac{a_{\text{GFK}} \Delta t}{\Delta x^2} \cdot T_{m,j}^l + T_{m,j}^l + \frac{a_{\text{GFK}} \Delta t}{\Delta y^2} \cdot (T_{m,j-1}^l + T_{m,j+1}^l) \quad (\text{B.11})$$

für $13 \leq j \leq n - 1$.

Abschließend werden die Differenzgleichungen für die Eckpunkte des Bilanzraums angegeben:

$$T_{0,0}^{l+1} = \left(1 - \frac{2a_{\text{PU}} \Delta t}{\Delta x^2} - \frac{2a_{\text{PU}} \Delta t}{\Delta y^2}\right) \cdot T_{0,0}^l + \frac{a_{\text{PU}} \Delta t}{\Delta x^2} \cdot T_{0,0}^l + T_{0,0}^l + \frac{a_{\text{PU}} \Delta t}{\Delta y^2} \cdot \left(\left(T_{0,0}^l + \frac{2\dot{q}_{s,\text{abs}} \Delta y}{k_{\text{PU}}} - \frac{2h_a \Delta y}{k_{\text{PU}}} \cdot (T_{0,0}^l - T_{\text{ad}})\right) + T_{0,0}^l\right) \quad (\text{B.12})$$

$$T_{m,0}^{l+1} = \left(1 - \frac{2a_{\text{PU}} \Delta t}{\Delta x^2} - \frac{2a_{\text{PU}} \Delta t}{\Delta y^2}\right) \cdot T_{m,0}^l + \frac{a_{\text{PU}} \Delta t}{\Delta x^2} \cdot T_{m,0}^l + T_{m,0}^l + \frac{a_{\text{PU}} \Delta t}{\Delta y^2} \cdot \left(\left(T_{m,0}^l + \frac{2\dot{q}_{s,\text{abs}} \Delta y}{k_{\text{PU}}} - \frac{2h_a \Delta y}{k_{\text{PU}}} \cdot (T_{m,0}^l - T_{\text{ad}})\right) + T_{m,0}^l\right) \quad (\text{B.13})$$

$$T_{0,n}^{l+1} = \left(1 - \frac{2a_{\text{GFK}} \Delta t}{\Delta x^2} - \frac{2a_{\text{GFK}} \Delta t}{\Delta y^2}\right) \cdot T_{0,n}^l + \frac{a_{\text{GFK}} \Delta t}{\Delta x^2} \cdot T_{0,n}^l + T_{0,n}^l + \frac{a_{\text{GFK}} \Delta t}{\Delta y^2} \cdot \left(\left(T_{0,n}^l - \frac{2h_i \Delta y}{k_{\text{GFK}}} \cdot (T_{0,n}^l - T_i)\right) + T_{0,n}^l\right) \quad (\text{B.14})$$

$$T_{m,n}^{l+1} = \left(1 - \frac{2a_{\text{GFK}} \Delta t}{\Delta x^2} - \frac{2a_{\text{GFK}} \Delta t}{\Delta y^2}\right) \cdot T_{m,n}^l + \frac{a_{\text{GFK}} \Delta t}{\Delta x^2} \cdot T_{m,n}^l + T_{m,n}^l + \frac{a_{\text{GFK}} \Delta t}{\Delta y^2} \cdot \left(\left(T_{m,n}^l - \frac{2h_i \Delta y}{k_{\text{GFK}}} \cdot (T_{m,n}^l - T_i)\right) + T_{m,n}^l\right) \quad (\text{B.15})$$

C Ergänzende Abbildungen

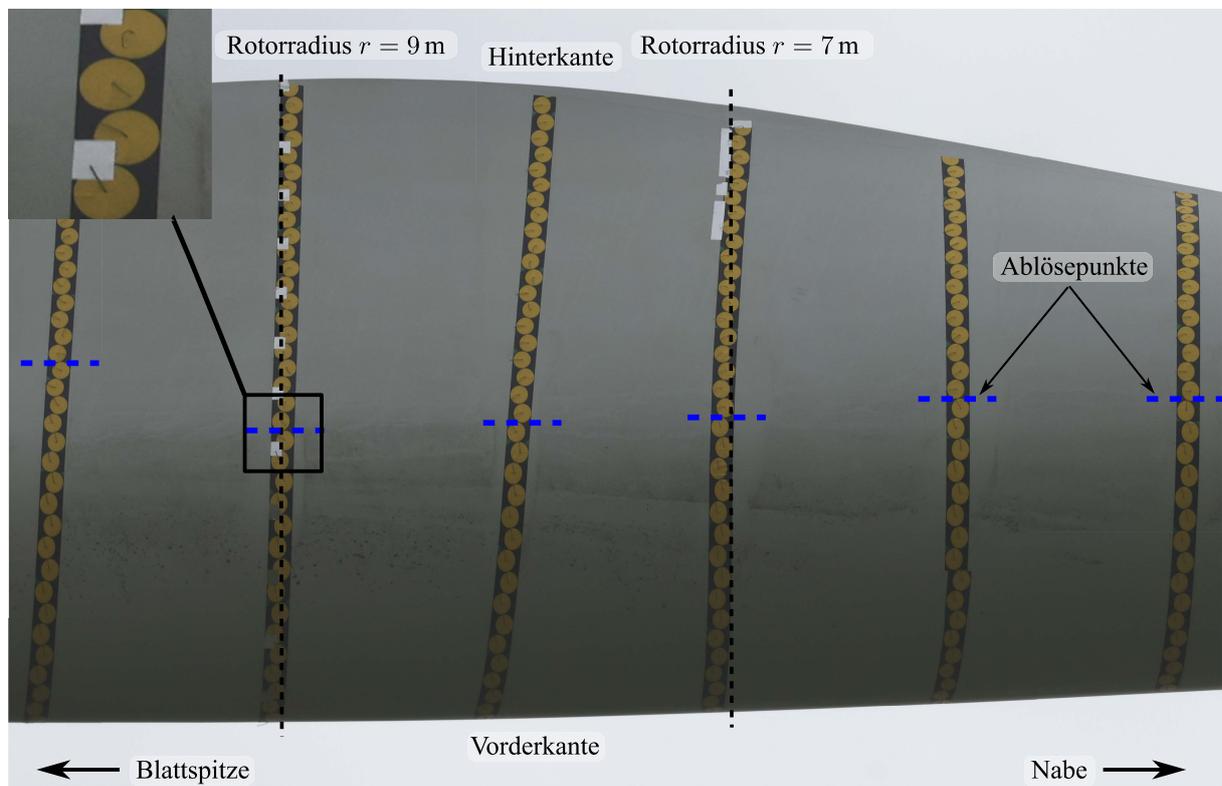


Abb. C.1: Zu Abb. 4.6 komplementäre Darstellung der Validierung der Ablöseposition mit Hilfe Tuft-basierter Strömungsvisualisierung. Die gestrichelten blauen Linien zeigen die vordere Ablöseposition, während des Auftretens einer Böe.

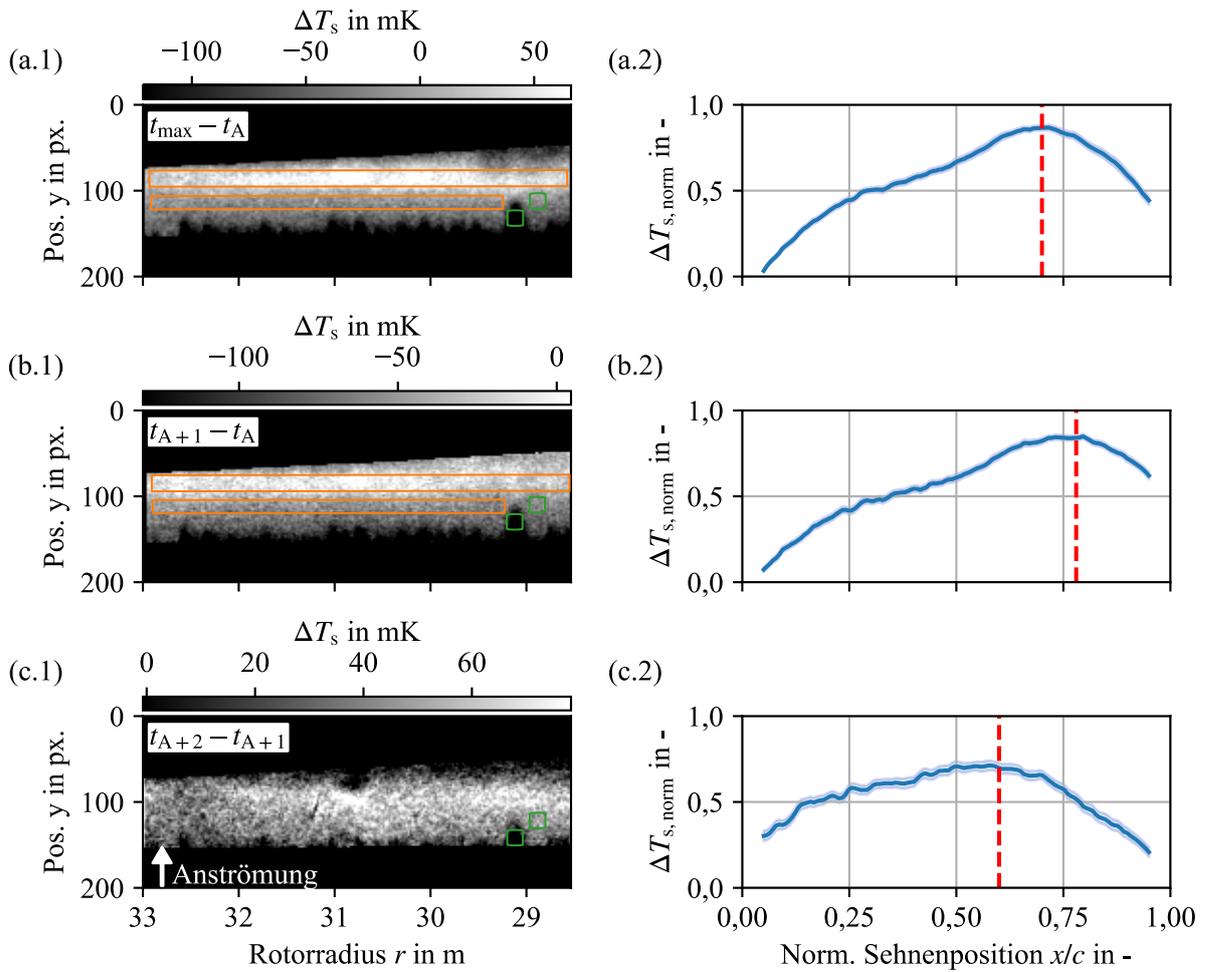


Abb. C.2: Komplementäre Darstellung zu Abb. 5.11. Im Vergleich zu Abb. 5.11 sind die Auswertebereiche für die Berechnung des CNR eingezeichnet. Orange Rechtecke: turbulent-abgelöste Bereiche, grüne Rechtecke: initial laminar-turbulente Bereiche.



Abb. C.3: Prototyp eines mit der WEA mitrotierenden Messsystemträgers.

Curriculum Vitae des Autors

Persönliche Daten

Name	Felix Oehme
Geburtsdatum	26.01.1994
Geburtsort	Leipzig
Familienstand	ledig
Kinder	eine Tochter
Staatsangehörigkeit	deutsch

Bildungsweg

10/2013 – 07/2019	Studium der Verfahrens- und Naturstofftechnik an der TU Dresden Abschluss: Diplom (Abschlussnote 1,5) Vertiefung: Allgemeine Verfahrenstechnik Diplomarbeit: Entwicklung eines Softsensors zur Prädiktion von Viskositäten beim Compoundieren Stipendiat des Deutschlandstipendiums
08/2004 – 07/2012	Neue Nikolaischule, Gymnasium der Stadt Leipzig Abschluss: Abitur

Berufliche Erfahrung

seit 05/2023	Entwicklungsingenieur für den Bereich Thermofluiddynamik in der Prozessentwicklung der SLM Solutions Group AG in Lübeck
12/2019 – 04/2023	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft, Universität Bremen
11/2018 – 07/2019	Diplomand in der Digitalisierungseinheit der BASF Schwarzheide GmbH
07/2017 – 08/2018	Studentischer Mitarbeiter am Institut für Systemverfahrenstechnik, TU Dresden
09/2016 – 03/2017	Praktikum in der Grundlagenentwicklung der Drägerwerk AG & Co. KGaA in Lübeck

	Thema: Theoretische/experimentelle Untersuchung der Wärmeübertragung in einem beheizten Verdunster
03/2016 – 08/2016	Studentischer Mitarbeiter am Institut für Fluidodynamik, Helmholtz Zentrum Dresden-Rossendorf
	Thema: Numerische und experimentelle Optimierung innovativer Wärmeübertragungsstrukturen
09/2015 – 10/2015	Forschungspraktikum Institut für Physikalische Chemie, Staatliche Universität Moskau - Lomonossow
