

Beiträge zur thermografischen Strömungsvisualisierung und Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition an Rotorblättern von Windenergieanlagen

Vom Fachbereich Produktionstechnik der
UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von **Daniel Gleichauf M.Sc.**
geb. am 12.02.1990 in Bremen

Bremen, 3. November 2022

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Fischer,
Universität Bremen
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Gerald Gerlach,
Technische Universität Dresden

Tag der mündlichen Prüfung: 26.09.2022

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich gegenüber der Universität Bremen, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel:

Beiträge zur thermografischen Strömungsvisualisierung und Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition an Rotorblättern von Windenergieanlagen

selbstständig ohne unerlaubte fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Alle Ausführungen, die wörtlich oder inhaltlich aus anderen Schriften entnommen sind, habe ich als solche gekennzeichnet. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keinem/r anderen Prüfer/in als Prüfungsleistung eingebracht und ist somit auch noch nicht veröffentlicht. Zudem wird versichert, dass die zu Prüfungszwecken beigelegte elektronische Version der Dissertation identisch mit der abgegebenen gedruckten Version ist.

Bremen, 16.05.2022

Daniel Gleichauf

Abstract

The boundary layer flow on rotor blades of operating wind turbines (WT) influences the aerodynamic lift and the performance-inhibiting drag of the rotor blade and therefore has a direct influence on the performance of the entire WT. A suitable method to visualize especially laminar and turbulent boundary layer flow regions from a larger distance and without preparation of the surface or influencing the flow is the thermographic flow visualization. Based on different surface temperatures, the method allows to draw conclusions about the distribution of the flow regions and to localize the laminar-turbulent transition between the regions. The basic prerequisite for this is a temperature difference between the flow and the surface. In contrast to experiments in wind tunnels, free-field measurements depend solely on weather conditions, e.g. in the form of a heating of the surface by the sun. A low heating results in a low contrast-to-noise ratio (contrast-to-noise ratio, CNR) between the different flow regions and thus leads to a high measurement error in the localization of the transition. This work focuses on extending the measurement system to achieve an increase in CNR and a reduction in the measurement error in localizing the laminar-turbulent transition for applications with low contrast between flow regions of well below 1 K.

For typical temperatures of 0°C - 40°C, an increase in CNR is justified by the change in the sensitive wavelength range due to a higher radiation intensity. In a direct comparison, it is presented that a higher CNR between flow regions is achieved at only about $\frac{1}{3}$ of the required integration time when an infrared camera sensitive in the higher wavelength region is used. While in a wind tunnel application the CNR is increased by 50%, in a free field application even a doubling can be achieved. For the evaluation of image series, a measurement system for rotor rotation detection is introduced. The application of feature extraction methods to an image series with low contrast results in an increase of CNR by one order of magnitude to 2 in the wind tunnel. The validation of the method on a free field measurement of a WT in operation with low CNR results even in a doubling to 5. In the localization of the laminar-turbulent transition, supported by simulation data, the effect of previously unconsidered systematic gradients on the measurement error is investigated. An extension of the localization by restricting the evaluation range results in a significant reduction of the systematic errors of up to 90%. Moreover, the random and systematic errors could be minimized by the extended image processing and reach a value of 0,3% and 0,1% of the chord length, respectively. Especially, the systematic error is reduced by two orders of magnitude. As a result, the image processing methods in the free-field application even allow localization of the transition, which was not possible before, due to the low CNR. Surface disturbances trigger premature transitions that reduce the laminar flow region and create turbulence wedges. Localization is adapted to the non-linear shape of the transition line, increasing the robustness of the detection of premature transitions. In a free-field measurement with 14 turbulence wedges, from previously no fully detected wedge it was possible with the new evaluation to detect 10 wedges. The error in quantifying the reduction of laminar flow was thus reduced from 21% to 2%.

The results extend the application range of the thermographic flow visualization for use on WT in operation, as flow visualizations with high CNR and low error in the localization of the laminar-turbulent transition can be generated even when low CNR arises from weather conditions in the raw data. Combined with resource-efficient classical image processing methods, the presented results provide a profitable extension for the application of the thermographic flow visualization to WT in operation.

Kurzfassung

Die Grenzschichtströmung an Rotorblättern von sich in Betrieb befindlichen Windenergieanlagen (WEA) beeinflusst den aerodynamischen Auftrieb und den leistungshemmenden Luftwiderstand des Rotorblattes und hat daher einen direkten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der gesamten WEA. Ein geeignetes Verfahren, um insbesondere laminare und turbulente Grenzschichtströmungsbereiche aus größerer Entfernung und ohne Präparation der Oberfläche oder Beeinflussung der Strömung zu visualisieren, ist die thermografische Strömungsvisualisierung. Aufgrund unterschiedlicher sich ausprägender Oberflächentemperaturen ermöglicht das Verfahren einen Rückschluss auf die Verteilung der Strömungsbereiche und eine Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition zwischen den Bereichen. Grundvoraussetzung hierfür ist eine Temperaturdifferenz zwischen Strömung und Oberfläche. Hierfür ist man bei Freifeldmessungen, im Unterschied zu Experimenten im Windkanal, allein auf die Wetterbedingungen z.B. in Form einer Erwärmung der Oberfläche durch die Sonnen angewiesen. Aus einer geringen Erwärmung resultiert ein geringes Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis (engl.: contrast-to-noise ratio, CNR) zwischen den unterschiedlichen Strömungsbereichen und führt damit zu einer hohen Messabweichung bei der Lokalisierung der Transition. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Erweiterung des Messsystems, um für Anwendungen mit geringem Kontrast zwischen den Strömungsbereichen von deutlich unter 1 K eine Steigerung des CNR und eine Reduzierung der Messabweichung bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition zu erreichen.

Für typische Temperaturen von 0 °C - 40 °C wird eine Steigerung des CNR durch die Änderung des sensitiven Wellenlängenbereichs aufgrund einer höheren Strahlungsintensität begründet. In einem direkten Vergleich wird dargelegt, dass ein höheres CNR zwischen den Strömungsbereichen bei nur ca. $\frac{1}{3}$ der erforderlichen Integrationszeit erreicht wird, wenn eine im höherwelligen Wellenlängenbereich sensitive Infrarotkamera verwendet wird. Während in einer Windkanalanwendung das CNR um 50 % gesteigert wird, kann in einer Freifeldanwendung sogar eine Verdoppelung erreicht werden. Für die Auswertung von Bildserien wird ein Messsystem zur Dreherkennung des Rotors eingeführt. Die Anwendung von Verfahren der Merkmalsextraktion auf eine Bildserie mit geringem Kontrast resultieren im Windkanal in eine Steigerung des CNR um eine Größenordnung auf 2. Die Validierung des Verfahrens an einer Freifeldmessung einer WEA in Betrieb mit geringem CNR resultiert sogar in eine Verdoppelung von auf 5. Bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition wird, gestützt durch Simulationsdaten, die Auswirkung von bisher unberücksichtigten systematischen Gradienten auf die Messabweichung untersucht. Eine Erweiterung der Lokalisierung durch Einschränkung des Auswertebereichs bewirkt eine deutliche Reduzierung der systematischen Abweichungen von bis zu 90 %. Zudem konnten die zufällige und systematische Abweichungen durch die erweiterte Bildverarbeitung minimiert werden und erreichen einen Wert von 0,3 % bzw. 0,1 % der Sehnenlänge. Speziell die systematische Abweichungen wird dadurch um zwei Größenordnungen reduziert. Im Ergebnis ermöglichen die Bildverarbeitungsmethoden in der Freifeldanwendung sogar eine Lokalisierung der Transition, die zuvor, aufgrund des geringen CNR, nicht möglich war. Durch Oberflächenstörungen werden verfrühte Transitionen ausgelöst, die den laminaren Strömungsbereich reduzieren und Turbulenzkeile erzeugen. Die Lokalisierung wird an die nicht-geradlinige Form der Transitionslinie angepasst und somit die Robustheit der Erkennung von verfrühten Transitionen erhöht. In einer Freifeldmessung mit 14 Turbulenzkeilen wurde von zuvor keinem vollständig erkannten Keil mit der neuen Auswertung 10 Keile detektiert. Die Abweichung bei der Quantifizierung der Reduktion der laminaren Strömung wurde damit von 21 % auf 2 % reduziert.

Die Ergebnisse erweitern den Einsatzbereich der thermografische Strömungsvisualisierung für die Anwendung an WEA in Betrieb, da Strömungsvisualisierungen mit hohem CNR und geringer Abweichung bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition auch dann erzeugt werden können, wenn aus den Wetterbedingungen in den Rohdaten ein geringes CNR entsteht. In Kombination mit ressourcensparenden klassischen Bildverarbeitungsmethoden bieten die vorgestellten Ergebnisse eine gewinnbringende Erweiterung für die Anwendung der thermografischen Strömungsvisualisierung an WEA in Betrieb.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Energiesysteme und Werkstoffprüfung des Bremer Instituts für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ) der Universität Bremen.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater und Institutsleiter des BIMAQ, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Fischer, für den fachlichen Austausch, zahlreiches Feedback sowie Ansporn und Motivation zu dieser Arbeit. Ihm und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Gerald Gerlach danke ich zudem für die Begutachtung dieser Arbeit.

Meinen Kollegen im BIMAQ danke ich kollektiv für die angenehme Arbeitsatmosphäre, dem fachlichem, wie auch nicht fachlichem Austausch und dem Gefühl Teil eines zusammenhaltenden Teams zu sein. Als Betreuer meiner Bachelor- sowie Masterarbeit, Mentor und Vorbild für meinen wissenschaftlichen Werdegang geht ein besonderer Dank an Dr.-Ing. Christoph Dollinger, durch den ich die Möglichkeit bekam, auf diesem Forschungsgebiet der thermografischen Strömungsvisualisierung arbeiten zu können und der mir bis heute stets mit Rat zur Seite steht. Ebenfalls danke ich meinem Gruppenleiter Herrn Dipl.-Ing. Michael Sorg, der nicht nur fachlich, sondern auch zwischenmenschlich das Rückgrat meiner Zeit am BIMAQ war. Vielen Dank für Anregungen, das Vertrauen und positivem Zuspruch, wann immer dieser nötig war. Meinem Bürokollegen León Schweickhardt M.Sc. danke ich für einer weiteren Vertrauensperson in meinem Leben, Gesprächen fernab der Arbeit und Austausch über alles wichtige und unwichtige in der Welt. Dipl.-Ing. Felix Oehme habe ich auf dem Themengebiet der thermografischen Strömungsvisualisierung zahlreiche intensive fachliche Diskussionen und Hilfestellungen zu verdanken. Beiden wünsche ich einen erfolgreichen Werdegang in ihrer Zukunft. Für organisatorische Unterstützungen, der Beantwortung aller Fragen und der Lösung verschiedenster administrativer Probleme danke ich Eva Schultze, ohne die der Verwaltungsaufwand am Institut unsere Arbeit an der Forschung unmöglich machen würde.

Für ebenfalls fachlichen Austausch und die Unterstützung bei der Datenaufnahme in den Windkanalexperimenten danke ich der Deutschen WindGuard Engineering GmbH und namentlich Herrn Dipl.-Ing. Nicholas Balaesque und Nils Poeck M.Sc. Der InfraTec GmbH danke ich für technischen Support bei den Infrarotsystemen und namentlich Herrn Dipl.-Wi.-Inform. (FH) Torsten König für spontane Hilfen und der Bewältigung von Notlagen, Frau Dr. rer. nat. Maria Gärtner und Herrn Dr. rer. nat. Fabian Göttfert für den fachlichen Austausch Rund um das Thema Infrarotthermografie.

Für den Beitrag an den wissenschaftlichen Inhalten dieser Arbeit durch angefertigte Abschlussarbeiten danke ich Herrn Nils Poeck M.Sc. und Dennis Jacob M.Sc.

Der größte Dank geht jedoch an meine Lebenspartnerin und Verlobte Indra Smith für die mentale Unterstützung, den Glauben an mich und das Durchhaltevermögen; speziell in der Bearbeitungsphase dieser Arbeit. Ohne ihre Unterstützung im Alltag und im gemeinsamen Leben wäre dieser Arbeit gewiss nicht möglich gewesen, weshalb ich ihr diese Arbeit widme.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei meinen Eltern Ernst und Doris, die mir ein derartig privilegiertes Leben geschenkt und möglich gemacht haben, dass ich heute da sein kann, wo ich stehe. Danke für die Unterstützung und den Glauben an mich. Meinen Schwestern Bettina und Susanne danke ich für die beste Unterstützung, die sich ein kleiner Bruder nur wünschen kann. Für Mut Zuspruch und Erdung, wann immer ich sie benötigt habe. Zum Schluss, aber nicht am wenigsten möchte ich mich bei meinen Freunden bedanken, die mich auffangen, mir zuhören und mich ablenken, wann immer ich es brauche. Besonderer Dank geht hierbei an Lukas und Hauke für die enge Freundschaft.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	XI
Verzeichnis relevanter Formelzeichen	XIII
1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Stand der Technik und Forschung	2
1.2.1. Bildaufnahme	4
1.2.2. Strömungsvisualisierung	6
1.2.3. Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition	7
1.3. Ziele und Struktur der Arbeit	8
2. Theorie	11
2.1. Windenergieanlagen	12
2.1.1. Aufbau einer Windenergieanlage	13
2.1.2. Auftrieb und Grenzschichtströmung am Rotorblatt	15
2.2. Thermofluid	19
2.3. Thermografie	21
2.3.1. Wärmestrahlung	22
2.3.2. Hardware	31
2.3.3. Temperaturrauschen	34
2.4. Experimenteller Aufbau	39
2.4.1. Windkanalexperiment	40
2.4.2. Freifeldexperiment	41
2.4.3. Kamerasysteme	43
2.5. Strömungsvisualisierung	43
2.5.1. Kenngrößen	45
2.6. Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition	47
2.6.1. Natürliche Transition	47
2.6.2. Verfrühte Transition	54
3. Erweiterung der Bildaufnahme	61
3.1. Infrarotkamera	61
3.1.1. Messung des Temperaturrauschens	61
3.1.2. SNR und CNR bei der thermografischen Strömungsvisualisierung	64
3.1.3. Bewegungsunschärfe	67
3.2. Rotorposition-Trigger	68
3.2.1. Methodik	69
3.2.2. Implementierung	70
3.2.3. Validierung	72
3.2.4. Bildausrichtung	73

4. Spatio-temporale Bildverarbeitung	75
4.1. Strömungsvisualisierung	76
4.1.1. Klassische Bildverarbeitungsmethoden	76
4.1.2. Erweiterte Bildverarbeitungsmethoden der Merkmalsextraktion	77
4.2. Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition	80
4.2.1. Zufälliges Rauschen	80
4.2.2. Systematische Gradienten	83
4.3. Ergebnisse	88
4.3.1. Validierung (Zylinderobjekt)	89
4.3.2. Windkanal (DU96W180) - hoher Kontrast	98
4.3.3. Windkanal (DU96W180) - geringer Kontrast	104
4.3.4. Freifeld - 1	109
4.3.5. Freifeld - 2	114
4.4. Einfluss der Anzahl Einzelaufnahmen und Messfrequenz	116
4.4.1. Anzahl Einzelaufnahmen	116
4.4.2. Aufnahmefrequenz	118
4.5. Fazit	119
5. Lokalisierung verfrühter Transitionen	123
5.1. Implementierung	123
5.2. Ergebnisse	126
5.2.1. Verifikation	126
5.2.2. Validierung	132
6. Zusammenfassung und Ausblick	137
6.1. Ausgangslage	137
6.2. Wissenschaftlicher Fortschritt	139
6.3. Ausblick auf weiterführende Arbeiten	144
Literaturverzeichnis	156
A. Thermografie	157
B. Rotorposition-Trigger	159
C. Visualisierungsergebnisse	165
Veröffentlichungsliste des Autors	175
Betreute studentische Arbeiten	177

Abkürzungsverzeichnis

BB	black body
CFD	computational fluid dynamics
CFK	carbonfaserverstärkter Kunststoff
CNR	contrast-to-noise ratio
CO₂	Kohlenstoffdioxid
ECC	enhanced correlation coefficient
FIR	far infrared
Ge	Germanium
GigE	Gigabit Ethernet
H₂O	Wasser
FPA	focal plane arrays
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
IFOV	instantaneous field of view
InSb	indium antimonide
LE	leading edge
LFR	laminar flow reduction
LIR	long infrared
MCT	mercury-cadmium-telluride
MIR	middle infrared
MKQ	Methode der kleinsten Quadrate
MW	Mittelwert
NETD	noise equivalent temperature difference
NIR	near infrared
NNC	non-negative component
NNMF	non-negative matrix factorization
NUC	non-uniformity correction
PC	principal component
PCA	principal component analysis
Si	Silizium
SNR	signal-to-noise ratio
STA	Standardabweichung
TE	trailing edge
WEA	Windenergieanlage

Verzeichnis relevanter Formelzeichen

Lateinische Symbole

Symbol	Bezeichnung
A	Flächenvariable
A_{Rot}	Rotorfläche
\hat{a}	Approximationskoeffizient für das Intensitätsprofil
\tilde{a}	Approximationskoeffizient für den Intensitätsgradienten
b	Wiensche Verschiebungskonstante
\hat{b}	Approximationskoeffizient für das Intensitätsprofil
\tilde{b}	Approximationskoeffizient für den Intensitätsgradienten
c	Profilhnenlänge
\hat{c}	Approximationskoeffizient für das Intensitätsprofil
\tilde{c}	Approximationskoeffizient für den Intensitätsgradienten
c_{Keil}	relativer Kontrast des Turbulenzkeiles zur umgebenen laminaren Strömung
c_o	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
c_n	korrigierte Lichtgeschwindigkeit
c_A	Auftriebsbeiwert
$c_{f,x}$	Reibungskoeffizient
c_P	Leistungsbeiwert
$c_{P, \text{Betz}}$	Betz'sche Wert für den theoretisch max. Leistungsbeiwert
c_W	Widerstandsbeiwert
CNR_{lt}	Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis zwischen laminarer und turbulenter Strömung
\hat{d}	Approximationskoeffizient für das Intensitätsprofil
\tilde{d}	Approximationskoeffizient für den Intensitätsgradienten
D_{rand}	Unterscheidbarkeit basierend auf zufälligem Inhomogenitäten
D_{sys}	Unterscheidbarkeit basierend auf systematische Inhomogenitäten
d	Streckenvariable
E	Energie
$E_{P,\lambda}$	Energie eines Photons der Wellenlänge λ
F_W	Widerstandskraft (Luftwiderstand)
F_A	aerodynamische Auftriebskraft
F_G	Gesamtkraft
F_T	Tangentialkraft
F_S	Schubkraft
f	Frequenz
G_x, G_y	Gradient in x bzw. y Richtung
H	Matrixvariable
h	Planck'sche Wirkungsquantum
I	Intensität
i	Indexvariable
\bar{I}_a	mittlere Pixelintensität im Bereich a

I_{xy}	Intensität des Bildpunkte (xy)
\bar{I}_{xy}	mittlere Intensität des Bildpunkte (xy)
I_{xy}	Intensität eines Pixels (xy)
J	Anzahl Einzelaufnahmen
j	Indexvariable
K	Anzahl an Bildspalten
K_{res}	Residuenvariable
k	Boltzmann-Konstante
L	Strahldichte
L_{λ}	spektrale Strahldichte
l	charakteristische Länge
M	spezifische Ausstrahlung
M_{BB}	spezifische Ausstrahlung eines schwarzen Körpers
$M_{\lambda, \text{BB}}$	spektrale spezifische Ausstrahlung eines schwarzen Körpers
M_{λ}	spektrale spezifische Ausstrahlung
n_{med}	Brechungsindex
N	Anzahl an Einzelwerten
$N_{P, \lambda}$	Anzahl Photonen der Wellenlänge λ
\bar{N}_P	mittlere Anzahl Photonen
$N_{\text{Beobachtungen}}$	Anzahl an Beobachtungen
$N_{\text{Variablen}}$	Anzahl an Variablen
Nu_x	Nußeltzahl
O	Rang
P	Matrixvariable
P_{ent}	aus einem Luftstrom entnommene Leistung
Pr	Prandtlzahl
Q	Strahlungsenergie
Q_{λ}	spektrale Strahlungsenergie
\dot{q}_W	wandnahe Wärmestromdichte
R	Matrixvariable
r	Rotorradius
Re	Reynoldszahl
Re_c	Profil-Reynoldszahl
Re_{krit}	kritische Reynoldszahl
s	räumliche Standardabweichung eines Flächenbereichs
s_a	räumliche Standardabweichung im Bereich a
t	Zeitvariable
T_{IT}	Integrationszeit
T	Temperatur
T_i	einzelner Temperaturwert
T_{obj}	Objekttemperatur
T_{S}	Strömungstemperatur
T_{U}	Umgebungstemperatur
T_{W}	Wandtemperatur
\hat{I}_{W}	gemessene Wandtemperatur
u	Geschwindigkeit der Grenzschichtströmung
v	Anströmgeschwindigkeit
$\Delta v_{\angle, \text{Rotor}}$	Winkelgeschwindigkeit des Rotors
v_a	axiale Anströmgeschwindigkeit

v_W	Windgeschwindigkeit
v_r	resultierende Anströmgeschwindigkeit
W	Matrixvariable
X	Matrixvariable
x_{Lauf}	Lauflänge
x, y	Bildkoordinaten
x_{krit}	Umschlagspunkt von laminare in turbulente Strömung
$Y_{\text{tr, nat}}$	Positionen der natürlichen Transitionslinie
$Y_{\text{tr, tats}}$	Positionen der tatsächlichen Transitionslinie
y_{tr}	Lage der Transition in y-Richtung
$y_{\text{tr, nat}}$	Lage der natürlichen Transition in y-Richtung
$y_{\text{tr, tats}}$	Lage der tatsächlichen Transition in y-Richtung
y_{LE}	Lage der Vorderkante

Griechische Symbole

Symbol	Bezeichnung
α_{aoa}	aerodynamischer Anstellwinkel
α_{rot}	Rotationswinkel
α	Absorptionsgrad
α_{atm}	Absorptionsgrad der Atmosphäre
α_1	Drehwinkel 1
$\alpha_{h,x}$	Wärmeübergangskoeffizient
β	Polarwinkel
$\delta t_{\text{verf}}, \delta t_{\text{nat}}$	Schwellwert für den Gradienten der verfrühten bzw. natürlichen Transition
$\Delta_{\text{verf}}, \Delta_{\text{nat}}, \Delta_{\text{tats}}$	Position der verfrühten, natürlichen bzw. tatsächlichen Transition
ε	Emissionsgrad
ε_{obj}	Emissionsgrad des Objekts
η	Quantenwirkungsgrad
γ	Grenzschichtdicke
φ	Anströmwinkel
λ	Wellenlänge
λ_G	Grenzwertwellenlänge
$\lambda_{\text{max}}(T)$	Wellenlänge der max. spezifischen Ausstrahlung M_{BB}
λ_h	Wärmeleitfähigkeit der Strömung
μ	Viskosität des Fluids
Ω	Raumwinkelvariable
ω	objektseitiger Öffnungswinkel
$\Delta\omega_{\text{Rotor}}$	Abweichung der Winkelgeschwindigkeit
Φ	Strahlungsleistung
Φ_{BB}	Strahlungsleistung eines schwarzen Körpers
Φ_{detekt}	detektierte Strahlungsleistung
ρ	Reflexionsgrad
ρ_{Luft}	Luftdichte
σ_{Bild}	räumliches Bildrauschen
σ_N	Standardabweichung der gezählten Photonen
$\sigma_{T_i, \text{Detektor}}$	zeitliches Detektorrauschen
$\sigma_{T_i, \text{Photon}}$	zeitliches Detektorrauschen aufgrund des Photonenschrottrauschens

$\sigma_{I_{xy}}$	Standardabweichung der Intensität des Bildpunktes (xy)
$\sigma_{x_{tr},rand}$	zufällige Abweichung der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition
$\sigma_{x_{tr},syst}$	systematische Abweichung der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition
τ	Transmissionsgrad
τ_{atm}	Transmissionsgrad der Atmosphäre
ϑ	Blatteinstellwinkel
$\bar{u}(r)$	radiale Umdrehungsgeschwindigkeit

1. Einleitung

1.1. Motivation

Aufgrund der steigenden Konzentration an Treibhausgasen in der Atmosphäre seit Beginn der Industrialisierung steigen weltweit Jahresdurchschnittstemperaturen mit schwerwiegenden Auswirkungen auf Lebewesen und Natur. Zum Schutz des Klimas verfolgen viele Nationen daher die Absicht, eine Stabilisierung der Erderwärmung herbeizuführen, indem der Ausstoß von Kohlenstoffdioxid minimiert wird (Pariser Abkommen) [Fre2020]. Das „Klimaziel“ Deutschlands ist eine vollständige CO₂-Neutralität im Jahre 2050 [Fre2020]. Zum Erreichen dieses Zieles ist ein reduzierter Verbrauch fossiler Brennstoffe und die vermehrte Nutzung erneuerbarer Energiequellen unabdinglich. Im Jahr 2020 betrug der Anteil von erneuerbaren Energiequellen am Bruttostromverbrauch Deutschlands bereits 45,3%. Neben Photovoltaik, Biomasse, Wasserkraft und Geothermie ist die Windenergie mit einem Anteil von 52,8% der mit Abstand größte Sektor der erneuerbaren Energiequellen. Damit hat die Windenergie mit einem alleinigen Anteil von 23,9% des Bruttostromverbrauchs Deutschlands die Braunkohle als wichtigste Stromquelle abgelöst [Bun2021].

Die Umwandlung der im Wind enthaltenen Energie in elektrische Energie wird durch Windenergieanlagen (WEA) ermöglicht [Hei2018]. Auftriebsprofile an den Rotorblättern erzeugen eine Drehbewegung des Rotors, die einen Generator zur Stromerzeugung antreibt. Ein Zuwachs in der Stromerzeugung durch Windkraft bei gleichzeitig geringerem Zubau von WEA (Stand 2018) zeigt auf, dass eine Steigerung des Wirkungsgrades von WEA angestrebt wird. Ausbaumaßnahmen und eine Effizienzsteigerung bestehender Anlagen werden also dem Anlagenneubau bevorzugt [Gaw2016, Fre2020]. Als erstes Glied der Wirkungskette bei WEA ist dabei die aerodynamische Effizienz der Rotorblätter von entscheidender Bedeutung, die sich aus dem Verhältnis der aus der Umströmung resultierenden Kräfte Auftrieb und Strömungswiderstand ergibt [Hau2016].

Für die aerodynamische Optimierung der Rotorblätter sind Untersuchungen der oberflächennahen Grenzschichtströmung von hoher Relevanz. Hierbei ist die Untersuchung an sich in Betrieb befindlichen WEA von herausragender Bedeutung, da eine Vielzahl von Einflüssen auf die Strömung in Simulationen und Windkanalexperimenten nicht vollständig berücksichtigt werden können. Hierzu zählen unter anderem die Wechselwirkung des umliegenden Geländes oder Turbulenzen der realen Atmosphäre [Hau2016] mit der Grenzschichtströmung sowie der Einfluss von Erosion und Kontamination auf die Rotorblattoberfläche [Gau2014, Sar2014]. Folglich leitet sich ein hoher Bedarf an einem Strömungsmessverfahren - konkret für eine Visualisierung der Grenzschichtströmungszustände - mit den folgenden Messeigenschaften ab: Das Verfahren muss in-Prozess fähig sein und eine Strömungsvisualisierung an realen WEA unter realen Strömungsbedingungen ermöglichen. Dabei ist eine berührungslose Messung auch aus größeren Entfernungen und ohne Präparation der Oberfläche mit Hilfsmitteln erwünscht, um den Betrieb der WEA nicht einzuschränken. Die in-Prozess-Strömungsvisualisierung soll im Ergebnis eine maximale globale Unterscheidbarkeit der relevanten Strömungszustände ermöglichen. Zusätzlich wird eine scharfe lokale Abgrenzung zwischen den entsprechenden Strömungsbereichen benötigt, um die Strömungstransitionen präzise lokalisieren zu können.

1.2. Stand der Technik und Forschung

Um eine für die aerodynamischen Eigenschaften des Rotorblattes möglichst vorteilhafte Grenzschichtströmung zu erreichen, wird angestrebt den Flächenbereich laminarer Umströmung zu maximieren und turbulenter Umströmung zu minimieren [Bak2011a]. Aus diesem Grund werden an WEA sogenannte Laminar-Profile verwendet, die eine maximale laminare Grenzschichtströmung aufweisen [Hau2016]. In Simulationen und Windkanalexperimenten entwickelt, sind nur limitierte Informationen über ihre Leistungsfähigkeit unter realen Bedingungen an WEA bekannt. Zusätzlich beeinflussen die Umweltbedingungen im realen Betrieb die Oberflächenbeschaffenheit der Rotorblätter und können einen verfrühten Umschlag von laminarer in turbulente Strömung bewirken und so eine Reduzierung der aerodynamischen Effizienz zur Folge haben. Als wesentliche Messaufgabe zur Bestimmung des aerodynamischen Zustandes gilt daher die Lokalisierung des laminar-turbulenten Überganges (fortlaufend als laminar-turbulente Transition bezeichnet) in der Grenzschichtströmung von Rotorblättern an sich in Betrieb befindlichen WEA. So können Informationen über die räumliche Verteilung der beiden Strömungszustände außerhalb der Laborumgebung und des Entwicklungsprozesses überprüft und eine durch die Umweltbedingungen negativ beeinflusste Grenzschichtströmung untersucht werden. Die so gewonnenen in-Prozess-Informationen über die Grenzschichtströmung bieten Optimierungspotenziale für die Weiterentwicklung von Rotorblattdesigns und -veränderungen, was zu einer stetigen Steigerung des Gesamtwirkungsgrades der WEA führt [Bal2016]. Darüber hinaus bietet eine regelmäßige Überprüfung der Grenzschichtströmung an laufenden Anlagen die Möglichkeit, den Wartungsbedarf der Rotorblätter im Rahmen der Instandhaltung besser abzuschätzen.

Ein klassische Methode, um die Grenzschichtströmung zu untersuchen, ist die Oberflächen-druckmessung, bei der die Druckverteilung in der Grenzschicht [Nit2006] durch mehrere in Bohr-löcher auf der Oberfläche eingebrachte Drucksensoren oder Mikrofone gemessen wird und über eine Auswertung des Druckgradienten auf die Strömung geschlossen werden kann [Sch2014a, Mad2018, But1990, Bak2011b]. Bei der Heißfilmtechnik werden dünne metallische Sonden auf die Oberfläche angebracht und durch einer elektrischen Spannung auf eine konstante Temperatur geregelt. Aus der elektrischen Energie, die erforderlich ist, um die Temperaturen konstant zu halten, kann auf die lokalen Strömungsgeschwindigkeiten und damit den Strömungszustand in der Grenzschichtströmung geschlossen werden [Sch2017, Nit2006, Lee1998]. Beide Messverfahren sind jedoch nur bedingt für eine Messung an WEA in Betrieb geeignet, da sie eine aufwendige Instrumentalisierung des Rotorblattes erfordern und die Oberfläche mitunter dauerhaft zerstören. Für die Installation sind lange Stillstandszeiten in Kauf zu nehmen, weshalb der finanzielle Aufwand hoch ist und das Messsystem für Instandhaltungsarbeiten an WEA wirtschaftlich unbrauchbar macht. Zudem verändern beide Verfahren die Oberflächenbeschaffenheit und beeinflussen dadurch die zu messende Strömung, weshalb sie als invasiv gelten.

Neben der direkten Druck- oder Strömungsgeschwindigkeitsmessung existieren Verfahren, mit denen eine Quantifizierung der räumlichen Ausbreitung von verschiedenen Strömungszuständen in der oberflächennahen Grenzschicht eines umströmten Körpers mit Strömungsvisualisierungen möglich ist. Diese bildgebenden Verfahren verwenden meist Präparate, welche mit der Grenzschichtströmung interagieren und mit einem Kamerasensor berührungslos beobachtet werden. Eine weit verbreitete Methode, die auch im Freifeld Anwendung findet, verwendet Wollfäden auf der Rotorblattoberfläche, die mit der Strömung interagieren. Anhand der Ausrichtung und Bewegung der Wollfäden kann auf die Strömungsrichtung und -fluktuation und damit den Strömungszustand der jeweiligen Oberflächenbereiche geschlossen werden [Swy2014, Vey2014, Ste2020]. Bei dem Ölfilm-Verfahren wird ein Ölgemisch gleichmäßig auf die Rotorblattoberfläche aufgetragen und interagiert mit der Strömung. Das sich ausprägende Muster des Ölfilmes kann daraufhin in Bezug auf die Strömungszustände interpretiert werden [Egg1990, Med2011, Che2020]. Da die Verschiebung des Ölfilms nicht rückgängig gemacht werden kann, eignet sich das Verfahren nicht für

Wiederholungsmessungen oder dynamisch veränderliche Strömungssituationen. Auch wenn beide Verfahren zerstörungsfrei bzgl. der Oberfläche sind und im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Verfahren einen geringeren Installationsaufwand erfordern, ist dennoch eine zeitaufwendige Präparation der Oberfläche erforderlich. Damit eignen sich die Verfahren ebenfalls nur bedingt für den Einsatz an WEA in Betrieb. Die in die Strömung eingebrachten Präparate haben zudem eine Rückwirkung auf die zu messende Grenzschichtströmung, weshalb diese Verfahren ebenfalls als invasiv gelten.

Laserbasierte optische Messverfahren wie die Particle Image Velocimetry (PIV) [Zha2008, Nil2020] oder Doppler Global Velocimetry [Mey1994, Fis2007] eignen sich für die Messung der Grenzschichtströmung an sich in Betrieb befindlichen WEA nicht, da die Messentfernungen in Freifeldanwendungen zu hoch sind (100 m - 300 m) und dadurch die Ortsauflösung zu gering ausfällt. Zudem ist das zu erreichende Signal-Rausch-Verhältnis stark limitiert durch die im Freifeld einsetzbare Lichtleistung der erforderlichen Beleuchtungsquelle. Um die Beleuchtungseinheit und Kamerasystem möglichst nah an die zu messende Grenzschicht zu positionieren wäre eine aufwendige Installation des Messsystems am bzw. im Rotorblatt erforderlich.

Ein geeignetes Verfahren zur Visualisierung der Grenzschichtströmung mit hoher geometrischer Auflösung, das ohne die Präparation der Oberfläche auskommt, ist die thermografische Strömungsvisualisierung [Dol2018a]. Durch die Verwendung einer Infrarotkamera ist es möglich, unterschiedlichen Strömungszustände auf der Rotorblattoberfläche anhand der Oberflächentemperaturen zu unterscheiden und ihre räumliche Verteilung zu quantifizieren. Der Unterschied der Oberflächentemperaturen ist ein Resultat unterschiedlicher Wärmeübergangskoeffizienten, welche in Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten in den verschiedenen Strömungszustände unterschiedlich hoch ausfallen [Qua1987, Gar1991, Luc1990]. Die Voraussetzung dafür, dass sich das für die Grenzschichtströmung charakteristische Temperaturfeld ausprägt, ist eine initiale Temperaturdifferenz zwischen Strömung und Oberfläche. Durch den berührungslosen Ansatz kann das Verfahren aus einer hohen Messentfernungen eingesetzt werden, ist nicht-invasiv und bietet eine in-Prozess-Fähigkeit für die Anwendung an sich in Betrieb befindlichen WEA.

Die thermografische Strömungsvisualisierung findet bereits seit langem Anwendung in Windkanalexperimenten mit subsonischer Strömungen [Pea1977, Bou1983] zur Visualisierung der laminar-turbulenten Transition, sowie der laminaren und turbulenten Ablösung [Luc1990, Mon2004, Gar1991, Gar2016]. Außerhalb des Windkanals wird das Verfahren bereits in Flugversuchen an Flugzeugtragflächen [Cra2013, Nit1993] oder Helikopterrotoren [Ric2014, Gar2020] angewandt. An WEA in Betrieb findet das Verfahren bisher im Wesentlichen Anwendung für die qualitative Schadenserkenkung [Tra2015, Tra, Tra2018]. Dollinger et al. untersuchten als erstes die Lage der laminar-turbulenten Transition an sich in Betrieb befindlichen WEA quantitativ und beschäftigten sich mit der Detektierbarkeit der turbulenten Strömungsablösung sowie dem Einfluss von Oberflächenstörungen auf die Strömung unter Verwendung der thermografischen Strömungsvisualisierung [Dol2018b, Dol2018c, Dol2019].

Im Zentrum der Strömungsvisualisierung steht die Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche. Bei der thermografischen Strömungsvisualisierung kann diese durch den Kontrast $\bar{I}_a - \bar{I}_b$ der mittleren detektierten Strahlungsintensität in Form der Pixelintensitäten \bar{I} in der Visualisierung innerhalb der Bildbereiche a und b definiert werden. Die Bereiche a und b beschreiben hierbei die zu unterscheidenden Strömungsbereiche. Rauschen in den beiden zu vergleichenden Bildbereichen kann die Unterscheidbarkeit jedoch verringern. Daraus folgt, dass ein Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis (engl.: contrast-to-noise ratio, CNR) analog zum Signal-zu-Rausch-Verhältnis (engl.: signal-to-noise ratio, SNR)

$$\text{SNR} = \frac{\bar{I}}{s} \quad (1.1)$$

definiert werden sollte. Dabei entspricht \bar{I} der mittleren Pixelintensität und s der räumlichen

Standardabweichung eines Flächenbereichs. Wird als Signal nun der Kontrast $\bar{I}_a - \bar{I}_b$ zwischen zwei Flächenbereichen a und b betrachtet, ergibt sich aus den unkorrelierten Standardabweichungen s_a und s_b die kombinierte Standardabweichung $\sqrt{s_a^2 + s_b^2}$, die mit dem Kontrast in Relation gesetzt wird. Analog zu Gleichung (1.1) ergibt sich so für das Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis die Definition [Rod2020]

$$\text{CNR}_{a-b} = \left| \frac{\bar{I}_a - \bar{I}_b}{\sqrt{s_a^2 + s_b^2}} \right|. \quad (1.2)$$

Für einer Steigerung der Unterscheidbarkeit der Bereiche unterschiedlicher Strömung muss, folgend aus Gleichung (1.2), der absolute Kontrast, d.h. die Differenz zwischen den mittleren Intensitäten \bar{I}_a und \bar{I}_b , maximiert und die räumliche Standardabweichung s_a bzw. s_b der Bereiche a und b minimiert werden.

1.2.1. Bildaufnahme

Eine Möglichkeit, die Intensität der Abstrahlung der Oberflächenbereiche und damit die Pixelintensität in den Thermografieaufnahmen zu erhöhen, ohne die in den räumlichen Standardabweichungen enthaltenen zufälligen Rauschanteile des Kamerasystems proportional mit zu erhöhen, liegt in der geeigneten Wahl des Emissionsgrades. Eine Verdopplung von \bar{I}_a und \bar{I}_b bei nahezu konstant bleibendem s_a und s_b würde das CNR um einen Faktor zwei erhöhen. In Windkanalexperimenten werden daher, wenn möglich, geeignete Materialien für die Versuchsmodelle oder Coatings mit den bevorzugten Oberflächeneigenschaften in Form eines hohen Emissionsgrades verwendet [Mon2004, Hoe2017, Ric2014, Bæk2009, Luc1990, Gar1992, Gar1994]. An WEA in Betrieb ist eine Änderung der Materialeigenschaften und Oberflächen jedoch nicht möglich und dies würde den Vorteil einer Visualisierung ohne Präparation der Oberfläche widersprechen.

Des Weiteren wird das CNR von der Hardware des verwendeten Infrarotkamarasystems beeinflusst, da die absolute, detektierte Strahlungsintensität gemäß dem Planck'schen Strahlungsgesetz bei einer gegebenen Oberflächentemperatur von dem Wellenlängenbereich abhängt, in dem die Infrarotkamera sensitiv ist [Pla1900]. Ein Anstieg der Oberflächentemperatur verschiebt den Bereich maximaler Abstrahlung, die detektiert werden kann, zu höheren Wellenlängen. Um eine hohes SNR zu erhalten, sollte daher der Wellenlängenbereich der Infrarotkamera an die Oberflächentemperatur angepasst werden. Die meisten Arbeiten zur thermografischen Strömungsvisualisierung in Windkanalexperimenten begründen die Wahl der Infrarotkamera nicht und verwenden in der Regel die ihnen zur Verfügung stehenden Systeme im mittleren (engl.: middle infrared, MIR) [Gar1991, Cra2013, Hoe2020] oder langwelligen (engl.: long infrared, LIR) [Gar2016] Wellenlängenbereich. Die künstliche Erwärmung in den meisten Windkanalanwendungen begünstigen die Verwendung des mittleren Wellenlängenbereichs und eine Steigerung des SNR bzw. CNR wird nicht durch die Wahl der Kamertechnik, sondern Änderungen der Temperaturverhältnisse erreicht. Eine detaillierte und begründete Erklärung des optimalen Wellenlängenbereichs für die thermografische Strömungsvisualisierung bei geringeren Temperaturen wurde von Gartenberg et al. gegeben [Gar1994]. Dem zufolge liegt der optimale Wellenlängenbereich der Infrarotkamera bei einer Oberflächentemperatur von ca. 100 K bei 40 μm und liegt damit deutlich über den kommerziell verfügbaren Systemen mit einer Sensitivität im Wellenlängenbereichen von bis zu 12 μm . Obwohl es sich dabei um deutlich niedrigere Temperaturen handelt als bei der Anwendung an WEA in Betrieb (ca. 270 K - 300 K), gilt die gleiche Argumentation für die Wahl eines höheren Wellenlängenbereichs, um die detektierbare Abstrahlungsintensität und damit das SNR in den Thermografieaufnahmen zu maximieren. Wie sich diese Auswahl des Wellenlängenbereichs des Weiteren auf das CNR zwischen laminarem und turbulenten Strömungsbereich an WEA in Betrieb auswirkt wurde bisher nicht untersucht.

Die mittleren Oberflächentemperaturen der verschiedenen Strömungsbereiche sind neben den unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten von der initialen Temperaturdifferenz zwischen Strömung und Oberfläche abhängig. Eine Steigerung dieser initialen Temperaturdifferenz erhöht den Unterschied der Oberflächentemperaturen und damit der Abstrahlungsintensitäten während das Bildrauschen der Infrarotkamera nicht proportional ansteigt. Als Resultat ist das CNR und damit die Unterscheidbarkeit in der thermografischen Strömungsvisualisierung gesteigert. In Windkanalexperimenten können Reibungseffekte zwischen der Strömung und den Innenwänden des Windkanals sowie eine Wärmezufuhr durch den Windkanalantrieb für einen ausreichenden Temperaturunterschied zwischen Strömung und Messobjekt sorgen, um den gewünschten Messeffekt in den Thermografieaufnahmen zu bewirken [Gar1991]. Eine herkömmliche Methode den Kontrast künstlich zu erhöhen besteht daher darin, die Temperaturverhältnisse während oder kurz vor dem Experiment zu manipulieren. Eine Möglichkeit ist, die Temperatur der Strömung zu senken oder zu erhöhen [Gar1992, Gar1994, Sér2003, Cra2013]. An WEA in Betrieb wird die Strömungstemperatur durch die Umgebungstemperatur definiert und kann nicht beeinflusst werden. Da eine Temperaturänderung der Strömung im Windkanal energetisch speziell für offene Messstrecken sehr aufwändig sein kann oder technisch schwer umzusetzen ist, wird alternativ die Oberflächentemperatur des Messobjektes intern oder extern erwärmt [Car1988, Car1989] oder abgekühlt [Jos2016]. Dies kann durch eine aktive Änderung der Oberflächentemperatur durch Wärmestrahlung [Lan2015, Bæk2009, Hoe2020] oder Heizelementen [Luc1990, Luc1995, Mon2004] oder passiv durch eine Änderung der Strömungsbedingungen kurz vor der Durchführung des Experimentes [Ric2014] verwirklicht werden. Im Gegensatz zur Temperaturänderung der Strömung, ist eine Änderung der Rotorblatttemperatur an WEA in Betrieb technisch möglich und findet in kalten Regionen in Form einer internen Blattheizung zum Schutz gegen Vereisung Anwendung [Par2011]. Die resultierende Erwärmung der Oberfläche ist jedoch aufgrund einzelner, individueller Heizstreben innerhalb der Struktur sehr ungleichmäßig und überlagert den thermischen Effekt der Oberflächenströmung, sodass eine Strömungsvisualisierung nicht mehr möglich ist. Außerdem ist die technische Umsetzung einer Blattheizung sehr kostspielig und kann nicht nachgerüstet werden. Der thermische Effekt, der eine Strömungsvisualisierung im Freifeld ermöglicht, hängt daher ausschließlich von der Strahlungsintensität der Sonne ab, welche die Rotorblattoberfläche erwärmt und damit zu einer Temperaturdifferenz gegenüber der Umgebungsluft führt [Tra2015, Dol2018a]. Das Resultat ist mitunter ein deutlich geringerer Kontrast zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich von unter 1 K im Vergleich zur Windkanalanwendung, bei der der Kontrast unter Anwendung der vorgestellten Maßnahmen mehrere Kelvin betragen kann.

Bei der Aufnahmetechnik, die für die Strömungsvisualisierung verwendet wird, können zudem Verfahren angewandt werden, um das CNR zwischen Strömungsbereichen zu erhöhen. Lokale Inhomogenitäten der gemessenen Temperaturfelder, die aus ungleichmäßigen Struktureigenschaften und thermischen Reflexionen entstehen, können ohne wirkende Grenzschichtströmung oder vor der Erzeugung einer Temperaturdifferenz zwischen Strömung und Oberfläche gemessen werden. In der Nachbearbeitung der Strömungsvisualisierung, können diese Referenzaufnahmen von den Thermografieaufnahmen subtrahiert und so die systematischen Anteile herausgerechnet werden [Gar1992, Hoe2017, Luc1990, Ric2009]. Das Resultat ist eine Reduzierung der räumlichen Standardabweichung und damit eine Steigerung des CNR. Bei der thermografischen Strömungsvisualisierung an WEA in Betrieb ist die Aufnahme von Referenzaufnahmen jedoch nicht möglich, da eine Strömung um das Rotorblatt selbst bei Stillstand nicht vermieden und die thermischen Rahmenbedingungen nicht beeinflusst werden können. Abgesehen von der Wahl der Kamertechnik sind die bisher vorgestellten Maßnahmen, die zu einer Erhöhung des CNR bei der thermografischen Strömungsvisualisierung führen, nur mit äußerst hohem Aufwand umzusetzen oder können gar nicht an WEA in Betrieb angewandt werden. Aus den limitierten Möglichkeiten an kontraststeigernden Maßnahmen bei der Aufnahme von Thermografiebildern leitet sich ein hoher

Bedarf an der Weiterentwicklung der nachgestellten Bildverarbeitung ab, um eine Steigerung des CNR herbeizuführen.

1.2.2. Strömungsvisualisierung

Für ein optimales Temperaturverhältnis zwischen Strömung und Oberfläche ist eine hohe, direkte Sonneneinstrahlung und eine kühle Umgebungstemperatur erforderlich. Die Abhängigkeit einer hohen Strahlungsintensität und optimalen Einstrahlwinkels der Sonne disqualifiziert das Messsystem bisher für die Verwendung als Hilfsmittel regelmäßiger Instandhaltungsarbeiten, da Zeiträume und Standorte für eine Messung durch die Wetterverhältnisse und Tageszeit stark eingegrenzt sind. Daher ist eine Bildverarbeitung der Thermografie-Rohbilder gewünscht, die mit einem geringen Kontrast zwischen den Strömungsbereichen zurechtkommt und die Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche maximiert.

Einflussfaktoren, welche die globale Unterscheidbarkeit zwischen verschiedenen Strömungsbereichen in der thermografischen Strömungsvisualisierung reduzieren, existieren als Folge der Strömungseigenschaften und externer Störungen und erhöhen die räumliche Standardabweichung der gemessenen Temperaturfelder. Strömungscharakteristiken verursachen systematische Temperaturgradienten innerhalb eines Strömungsbereichs aufgrund eines nicht konstanten Wärmeaustausches sowie zufällige Temperaturschwankungen aufgrund von Strömungsschwankungen. Externe Störeinflüsse sind systematische Temperaturgradienten aufgrund von Reflexionen und zufälligem Messrauschen. Eine zur Steigerung der Unterscheidbarkeit von Strömungsbereichen eingesetzte Bildverarbeitung muss diese zufälligen und systematischen Einflüssen reduzieren können und den Kontrast der mittleren Pixelintensitäten der Strömungsbereiche maximieren, um Strömungsvisualisierungen mit einem hohen CNR zu erzeugen.

Klassische Bildverarbeitungsmethoden für die thermografische Strömungsvisualisierung erzeugen aus Einzelaufnahmen oder aus Bildserien einzelne Ausgabebilder. So führt z.B. die Mittelwertbildung einer Serie von Thermografieaufnahmen einer stationären Strömungssituation zu einer Reduzierung des Messrauschens und erhöht somit das CNR [Hoe2020, Ric2009]. Während die Mehrfachmessung in den meisten Anwendungen an unbewegten Messobjekten keine Herausforderung darstellt, muss bei bewegten Objekten ein zusätzlicher Aufwand für eine geeignete Triggerung des Messsystems betrieben werden. Richter et al. triggern die Infrarotkamera synchron mit der Drehbewegung eines schwebenden Helikopters, aber beschreiben das Triggersystem nicht näher [Ric2014]. Alternativ kann auch eine Nachverfolgung des sich bewegenden Messobjekts angestrebt werden. Wolf et al. verwenden hierfür ein Spiegelsystem, mit welchem die Drehbewegung eines Helikopterrotors nachverfolgt wird [Wol2020]. Eine detaillierte Untersuchung des Triggersystems und Potential zur CNR-Steigerung aufgrund von Mittelungen wurde bis dato nicht durchgeführt. Ebenso sind keine dokumentierten Triggersysteme bei der Anwendung der thermografischen Strömungsvisualisierung an WEA in Betrieb und Potential zur CNR-Steigerung bekannt. Crawford et al. stellten eine automatische Auswertung mit einem räumlichen Tiefpassfilter vor, um das SNR in Einzelbildern von In-Flight-Experimenten an Flugzeugtragflächen zu erhöhen [Cra2015]. Sowohl die zeitliche Mittelung, als auch die räumliche Tiefpassfilterung erhöht die Unterscheidbarkeit zwischen den Strömungsbereichen, indem die zufällige Intensitätsschwankungen im Bild minimiert werden. Systematische Einflüsse bleiben jedoch bestehen. Eine weitere von Dollinger et al. vorgestellte Bildverarbeitung konzentriert sich auf Temperaturschwankungen und wertet die zeitliche Standardabweichung einer Bildserie aus, um die Unterscheidbarkeit zwischen Strömungsbereichen zu erhöhen, indem zufällige und systematische Inhomogenitäten im Bild aufgrund von Intensitätsschwankungen reduziert werden [Dol2018c]. Diese klassischen Methoden ermöglichen eine einfache, reproduzierbare Bildverarbeitung, jedoch werden systematische Bildinhomogenitäten nicht oder nur teilweise korrigiert, was die Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche weiterhin einschränkt. Gardner et al. berechnen die räumliche Standardab-

weichung von Differenzbildern aufeinanderfolgender Aufnahmen bei der thermografischen Strömungsvisualisierung an Helikopter Rotorblättern und konnten so zwischen anliegender und abgelöster Strömung unterscheiden [Gar2016]. Welchen Einfluss diese Methode auf das CNR zwischen laminarer und turbulenter Strömung an WEA hat, wurde nicht untersucht. Zudem wurden die Verfahren bisher nicht unter Freifeldbedingungen an WEA in Betrieb untersucht.

Andere Studien konzentrieren sich auf erweiterte Bildverarbeitungsmethoden, die die gewünschten Informationen aus einer thermografischen Bildserie extrahieren. Dollinger et al. wendeten eine Fourier-Analyse mittels einer diskreten Fourier-Transformation für jedes Pixel über die Bildserie an und wählten einen bestimmten Frequenzbereich aus, um die mittlere Amplitude der zeitlichen Schwankungen auszuwerten [Dol2018c]. Die Auswertung der zeitlichen Schwankungen um die mittlere Temperatur ist unbeeinflusst von systematischen räumlichen Inhomogenitäten innerhalb der Strömungsbereiche und hat daher das Potenzial, die Unterscheidbarkeit zwischen den Strömungsbereichen zu erhöhen. Um die Unterscheidbarkeit zu maximieren, wird jedoch das a priori Wissen über den Frequenzbereich der charakteristischen Temperaturschwankungen benötigt. Ebenso kann die Fourier-Analyse als zeitliche Filterung für periodisch auftretende Artefakte genutzt werden [Hoe2020]. Auswerteverfahren, welche keine harmonische Basis in den Fluktuationen der Pixelintensitäten annimmt und räumliche sowie zeitliche Informationen in den Thermografieaufnahmen auswerten wurden für die thermografische Strömungsvisualisierung bisher nicht untersucht. Daher leitet sich die Forschungsfrage ab, ob es möglich ist, unter Anwendung von Verfahren der Merkmalsextraktion, Strömungsvisualisierungen zu erzeugen, in denen die Unterscheidbarkeit zwischen laminarem und turbulentem Strömungsbereich erhöht ist. Es gilt zu untersuchen, ob diese Verfahren speziell bei der Anwendung an WEA in Betrieb angewandt werden können und wie diese Verfahren in Kombination mit den klassischen Methoden verwendet werden können.

1.2.3. Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition

Eine wichtige nachfolgende Messaufgabe auf Basis des Ergebnisses der Strömungsvisualisierung ist die Lokalisierung des Übergangs von laminarer zu turbulenter Strömung. Um dies zu erreichen, sind verschiedene Bildverarbeitungsmethoden vorgeschlagen worden. Der am häufigsten angewandte Ansatz besteht darin, entweder unbearbeitete Rohbilder oder das Ergebnis einer einfachen Bildfilterung wie eine Mittelwertbildung zu verwenden und den maximalen Temperaturgradienten entlang der Temperaturprofile in der Hauptströmungsrichtung zu lokalisieren [Jos2016, Tra2015, Hei2014]. Für eine sich dynamisch verändernde Grenzschichtströmung nutzten Wolf et al. die Berechnung von Differentialbildern zur Visualisierung des Übergangs von laminarer zu turbulenter Strömung an einem Profil mit oszillierendem Anstellwinkel [Wol2020]. Crawford et al. führten eine automatische Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition mittels eines räumlichen Tiefpassfilters und eines anschließenden Kantendetektionsalgorithmus ein [Cra2015]. Um eine klare Abtrennung der Strömungsbereiche in den Thermografieaufnahmen zu begünstigen, werden für die Oberfläche der Versuchsmodelle Materialien mit geringer Wärmeleitung gewählt [Qua1987, Tra2018]. Die erreichbare Messunsicherheit für die Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition an WEA in Betrieb wurde erstmals von Dollinger et al. in unbearbeiteten Thermografie-Rohbildern untersucht [Dol2018b]. Nach ihren Erkenntnissen ist die Unsicherheit umgekehrt proportional zur Amplitude des Temperaturgradienten zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich. Zusätzlich wurde gezeigt, dass die ideale Lokalisierungsverfahren zur Lokalisierung des Strömungsübergangs mit minimaler Unsicherheit und einer Subpixelauflösung darin besteht, eine Approximation des Temperaturprofils mit der Verteilungsfunktion der Normalverteilung anzuwenden. Alternativ kann, wenngleich dieser Ansatz im Hinblick auf die erreichbare Messunsicherheit suboptimal ist, auch der Gradient des Temperaturprofils durch der Dichtefunktion der Normalverteilung approximiert werden. Die Position des Strömungsübergangs kann in

beiden Fällen direkt aus dem entsprechenden Parameter der angefitzten Approximationsmodelle extrahiert werden. Untersuchungen bzgl. der Messabweichung bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition ergaben einen reziproken Zusammenhang von der Temperaturdifferenz zwischen den Strömungsbereichen und der Höhe der zufälligen Messabweichung. Unberücksichtigt bleibt jedoch bisher die Auswirkung von Abweichungen des gemessenen Temperaturverlaufs von den Approximationsmodellen auf die systematische Messabweichung bei der Lokalisierung.

Ein wesentlicher Unterschied der laminar-turbulenten Transitionslinie auf dem Rotorblatt einer WEA in Betrieb und einem Windkanalmodell besteht in ihrer Form quer zur Strömungsrichtung. In Windkanalexperimenten wird eine ideale Beschaffenheit der Modelloberfläche angestrebt aus der sich eine geradlinige, parallel zur Rotorblattvorderkante und quer zur Strömungsrichtung ausgeprägte Transitionslinie ergibt. An WEA in Betrieb verändert das Anhaften von Insekten (Kontamination) und die Oberflächenbeschädigung durch aufprallende Partikel (Erosion) jedoch die Oberflächenrauheit der Rotorblattvorderkante und löst so eine verfrühte laminar-turbulente Transition [Gau2014], sowie eine Verlängerung des Übergangsprozesses [Sag2013] in der Grenzschicht aus. Durch solche verfrühten Transitionen entsteht hinter dem Oberflächendefekt ein keilförmiger Bereich turbulenter Strömung (ein sogenannter Turbulenzkeil), der laminar wäre, wenn die Oberfläche frei von Störungen wäre [Kue2015, Dol2019]. Diese Verkleinerung des Oberflächenbereichs mit laminarer Grenzschichtströmung führt zu einer Verringerung des Auftriebs und einer Erhöhung des Luftwiderstands, was den Wirkungsgrad eines Rotorblatts und damit die Leistung der gesamten WEA reduziert [Ehr2013, Sar2014]. Störungen der Oberfläche auf aerodynamischen Profilen haben daher einen erheblichen Einfluss auf die Grenzschichtströmung und damit auf die aerodynamischen Eigenschaften [Sch2006]. Dies ist für Rotorblätter von Windenergieanlagen von entscheidender Bedeutung, da sie aufgrund der Umweltbedingungen und des Langzeitbetriebs einer Verschmutzung und Erosion durch Insekten [Cor2001], Regen, Staub oder Hagel [Dal2009, Kee2013, Slo2015] ausgesetzt sind. Die benannten Lokalisierungsverfahren der laminar-turbulenten Transition sind jedoch aus der Windkanal-Anwendung motiviert und nicht darauf ausgelegt, eine nichtlineare Transitionslinie mit verfrühten Transitionen zu lokalisieren. Ohne eine Strömungsvisualisierung an realen WEA in Betrieb können Abschätzungen der Minderung der Jahresenergieproduktion aufgrund von Oberflächenstörungen nur mit Simulationen oder Messungen an Windkanalmodellen durch erzwungene Transitionen mit Zick-Zack-Bändern erfolgen [Han2018]. Die Bedingungen in diesen Experimenten sind idealisiert und die resultierenden Strömungsbereiche ergeben sich aus einer binären Lösung der Oberflächenstörungen [Zid2016]. Daher ist eine Messung der tatsächlichen, durch Oberflächenstörungen beeinflussten Grenzschichtströmung an realen WEA in Betrieb erforderlich. Hierzu übertrugen Dollinger et al. erstmals die Lokalisierungsverfahren der laminar-turbulenten Transition aus der Windkanalanwendung auf das Freifeld. Welche Auswirkung das Auftreten verfrühter Transitionen auf die Messabweichung der Lokalisierungsalgorithmen hat wurde dabei bisher nicht untersucht. Es fehlt ein Algorithmus, der an die Messsituation an WEA in Betrieb und dem Auftreten von verfrühten Transitionen angepasst ist, um Abweichungen zu minimieren.

1.3. Ziele und Struktur der Arbeit

Das Ziel der Arbeit ist es, die Unterscheidbarkeit des laminaren und turbulenten Strömungsbereichs in thermografischen Strömungsvisualisierungen an sich in Betrieb befindlichen WEA zu erhöhen. Hierfür werden einerseits hardwareseitige Messsystemerweiterungen untersucht, wie die Anwendung einer langwelligeren Infrarotkamera zur Steigerung des Kontrast-Rausch-Verhältnisses und der Aufbau eines Triggersystems zur Realisierung von Ensemble-Mittelungen bei gleicher Rotorposition. Zudem wird die Bildverarbeitung der thermografischen Rohbilder durch moderne Merkmalsextraktionsverfahren erweitert. Die aus der erweiterten Bildverarbeitung resultierenden Strömungsvisualisierungen werden bzgl. ihres gesteigerten Kontrast-Rausch-Verhältnisses

zwischen der laminaren und turbulenten Strömung, sowie der Minimierung der Messabweichung bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition bewertet. Abschließend sollen vorhandene Lokalisierungsalgorithmen angepasst werden, um die Messabweichung bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition bei auftretenden verfrühten Transitionen an WEA in Betrieb zu reduzieren.

In Kapitel 2 wird zunächst die Messkette der thermografischen Strömungsvisualisierung vorgestellt. Es folgt eine Beschreibung des Aufbaus und der Funktion von WEA und der Aerodynamik an den Rotorblättern. Anschließend wird ein theoretischer Abriss der Infrarotthermografie geliefert, der speziell die hardwareseitige Erweiterung des Messsystems motiviert. Es werden die Vorteile einer Verschiebung des sensitiven Spektralbereichs der Infrarotkamera hin zu längeren Wellenlängen zur Verbesserung des SNR und CNR angeregt und begründet. Nach den theoretischen Grundlagen wird der experimentelle Aufbau der in dieser Arbeit untersuchten Windkanal- und Freifeldmessungen vorgestellt. Die zuvor eingeführten Inhalte werden anschließend vereinigt und die Visualisierung der Strömung auf einem umströmten Profil mit Hilfe der Thermografie dargestellt und Kenngrößen zur Bewertung der Unterscheidbarkeit eingeführt. Im letzten Abschnitt wird die Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition in einer thermografischen Strömungsvisualisierung vorgestellt und die Auswirkung auf zufällige und systematische Abweichungen untersucht. Darüber hinaus wird das Konzept einer erweiterten Lokalisierung für die Detektion von verfrühten Transitionen zunächst motiviert und konzeptionell vorgestellt.

In Kapitel 3 werden die zuvor theoretisch motivierten hardwareseitigen Erweiterungen des Messsystems implementiert und im Hinblick auf eine Steigerung der Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche charakterisiert. Die Verwendung einer mittel- und langwelligen Infrarotkamera wird bezüglich des zu erreichenden CNR in Windkanal- und Freifeldanwendungen verglichen. Ein Triggersystem für die positionsgenaue Triggerung bei definierter Rotorposition wird eingeführt. Das System wird in einer Freifeldmessung getestet und bzgl. der Wiederholgenauigkeit der Triggerung zur Erstellung einer Bildserie bei immer gleicher Rotorblattposition untersucht.

In Kapitel 4 werden zunächst die in dieser Arbeit neu eingeführten Bildverarbeitungsmethoden zur Erzeugung von Strömungsvisualisierungen eingeführt. Hierbei wird zwischen klassischen Verfahren und den erweiterten Verfahren der Merkmalsextraktion unterschieden. Anschließend wird die Auswirkung von zufälligen und systematischen Inhomogenitäten in Strömungsvisualisierungen auf die Abweichung bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition mit der Hilfe von Simulationen untersucht. Hierbei kommen erstmals die in Kapitel 2 eingeführten Kenngrößen für die Bewertung der Unterscheidbarkeiten zum Einsatz. Durch die Erkenntnisse können die Vorteile der aus den neuen Bildverarbeitungsmethoden entstehenden Strömungsvisualisierungen und Auswirkung auf die Lokalisierung näher beleuchtet werden. Anschließend werden alle bisherigen Erkenntnisse kombiniert und die Ergebnisse der Bildverarbeitungsmethoden anhand von realen thermografischen Messungen dargestellt und untersucht. Einer Bewertung der Unterscheidbarkeit und des Kontrast-zu-Rausch-Verhältnisses folgt die Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition und die Bewertung der zufälligen und systematischen Messabweichung der Lokalisierung. Als Grundlage für die Ergebnisdarstellung werden sowohl Windkanal- als auch Freifeldmessdaten ausgewertet.

In Kapitel 5 werden Strömungsvisualisierungen aus dem Freifeld ausgewertet, bei denen aufgrund von Oberflächenerosion und -kontamination der Rotorblattoberfläche verfrühte laminar-turbulente Transitionen auftreten. Bei der Lokalisierung der natürlichen Transitionslinie durch die klassische eindimensionale Gradientenauswertung in Strömungsrichtung, die den Stand der Technik darstellt, entstehen hohe Messabweichungen bzw. verfrühte Transitionen bleiben unerkannt. Deshalb wird eine neue Lokalisierungsmethode angewandt, mit der die verfrühte laminar-turbulente Transition mit minimaler Messabweichung bestimmt werden kann, indem ein multidirektionaler Ansatz verfolgt wird.

Zuletzt werden alle Ergebnisse und die daraus erworbenen Erkenntnisse in Kapitel 6 zusammengefasst und ein Ausblick auf weiterführende Arbeiten gegeben.

2. Theorie

Das Messverfahren der thermografischen Strömungsvisualisierung und die nachgestellte Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition lässt sich grob in fünf Abschnitte unterteilen, die in Abb. 2.1 als Blockschaltbild skizziert sind. Die dargestellten Grafiken und Bilder dienen lediglich der Veranschaulichung und werden in den folgenden Kapiteln näher erklärt. (1.) Beginnend mit der ankommenden Strömung an der WEA bzw. dem Rotorblatt prägt sich in der oberflächennahen Grenzschicht über dem Rotorblattprofil die sogenannte Grenzschichtströmung aus. Ein kurzer Abriss des grundlegenden Wirkungsprinzips einer WEA und speziell die Ausprägung der Grenzschichtströmung auf dem Rotorblatt sowie ihre aerodynamische Relevanz für die Energieumwandlung wird in Kapitel 2.1 gegeben. (2.) Zusammenhänge zwischen der Grenzschichtströmung und dem Austausch von thermischer Energie zwischen der Oberfläche und dem Strömungsfluid bewirken eine charakteristische Temperaturverteilung auf der Oberfläche, die einen Rückschluss

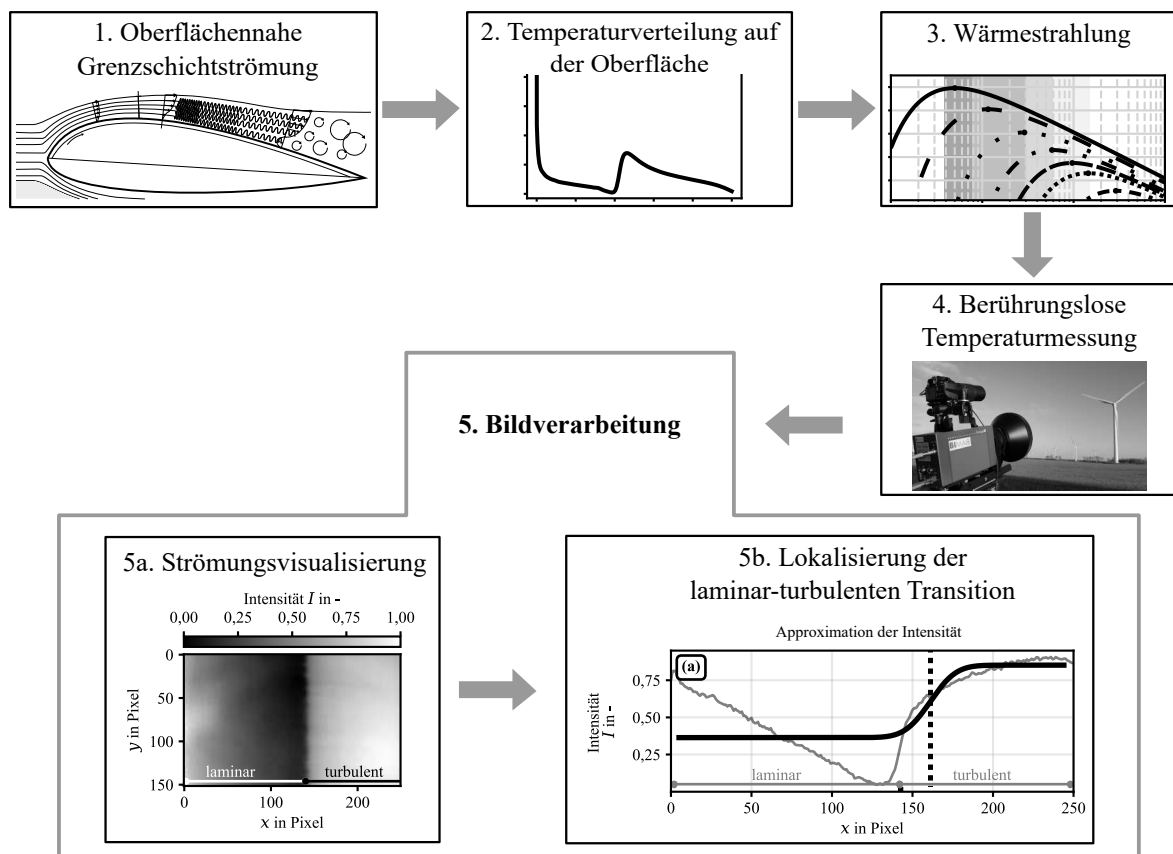


Abb. 2.1.: Messkette der thermografischen Strömungsvisualisierung von (1.) der Ausprägung der Grenzschichtströmung über (2.) die strömungsabhängige Verteilung der Temperatur auf der Oberfläche, (3.) der Wärmestrahlung der Oberfläche und (4.) der berührungslosen Erfassung der Wärmestrahlung bis zur (5.) finalen Bildverarbeitung. Die Bildverarbeitung kann weiter in (5a.) die reine Visualisierung der Strömung und (5b.) die Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition unterteilt werden.

auf die Strömungszustände erlaubt. Der Thermofluid-Zusammenhang aus Reibung in der Strömung und dem Wärmeübergang zwischen Fluid und Oberfläche wird in Kapitel 2.2 vorgestellt. In ihrem Zusammenhang wurzelt die Hypothese, dass eine Temperaturmessung der Oberfläche eine Strömungsvisualisierung ermöglicht. (3.) Die Theorie der Wärmestrahlung bzw. die berührungslose Temperaturmessung durch Detektion der Infrarotstrahlung eines Körpers gibt das Fundament für den berührungslosen Messansatz der thermografischen Strömungsvisualisierung. Die Theorie der Infrarotthermografie wird in Kapitel 2.3 eingeführt und bietet die theoretische Grundlage für das Messverfahren. Darüber hinaus werden strahlungsphysikalische und hardwaretechnische Begründungen für die Vorteile einer Verschiebung des sensitiven Spektralbereichs des Infrarotkamerasystems hin zu höheren Wellenlängen zur Steigerung des SNR und CNR in thermografischen Strömungsvisualisierungen geliefert. (4.) Um die Oberflächentemperatur thermografisch zu erfassen wird ein experimenteller Aufbau benötigt, der sowohl für die Windkanalanwendung, als auch für die Freifeldanwendung an sich in Betrieb befindlichen WEA in Kapitel 2.4 vorgestellt wird. Aus dem stationären Aufbau der Messtechnik heraus wird der Bedarf einer geeigneten Triggerung des Infrarotsystems motiviert, dass erforderlich ist, um positionsgenaue Wiederholungsaufnahmen bei immer gleicher Rotorblattposition zu ermöglichen. Diese sind erforderlich um Ensemble-Mittelungen durchzuführen und Fluktuationen der Oberflächentemperatur auszuwerten. (5.) Die Rohaufnahmen der thermografischen Messung werden anschließend durch Bildverarbeitungsverfahren weiter verarbeitet. Dieser Schritt teilt sich in (5a.) dem Ziel einer Strömungsvisualisierung mit maximaler Unterscheidbarkeit zwischen der laminaren und turbulenten Strömung und (5b.) der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition mit minimaler zufälliger und systematischer Abweichung. In Kapitel 2.5 wird die reine Visualisierung der Strömungsbereiche auf Grundlage der thermografischen Temperaturmessung vorgestellt und Kennzahlen zur Bewertung der globalen Unterscheidbarkeit eingeführt. Die Unterscheidbarkeit hängt dabei von den thermischen Umweltbedingungen zum Zeitpunkt der Messung ab, die in Freifeldanwendungen ungünstig ausfallen können. Das Resultat ist eine geringere Unterscheidbarkeit der laminaren und turbulenten Strömung in den Rohaufnahmen. Unter der Voraussetzung, dass Änderungen am Messverfahren und der Messsituation zur Steigerung der Unterscheidbarkeit nicht möglich sind, leitet sich der Bedarf an erweiterten Bildverarbeitungsmethoden ab, um aus den Rohaufnahmen Strömungsvisualisierungen mit höherer Unterscheidbarkeit zu erzeugen. Basierend auf der thermografischen Visualisierung der Strömung und der Unterscheidbarkeit zwischen der laminaren und turbulenten Strömung wird eine Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition mit minimaler zufälliger und systematischer Abweichung angestrebt. In Kapitel 2.6 wird ein Verfahren vorgestellt welches die laminar-turbulenten Transition mit einer Subpixelauflösung lokalisiert, indem Approximationsmodelle des Temperaturverlaufs angewandt werden. Einflüsse auf die zufällige und systematische Abweichung der Lokalisierung werden ergründet und eine Erweiterung zur Reduzierung der systematischen Abweichungen eingeführt. Anschließend wird das Strömungsphänomen einer verfrühten laminar-turbulenten Transition durch Oberflächenkontaminationen und die Auswirkung auf die Lokalisierung bezüglich erhöhter Abweichungen behandelt. Es wird ein Messansatz vorgestellt, mit der die Abweichung bei der Lokalisierung der verfrühten Transitionen reduziert wird. Eine Lokalisierung mit verringerter Abweichung ermöglicht eine Quantifizierung der Reduktion der laminaren Strömung aufgrund der verfrühten Transitionen als Kennzahl für den Grad der Oberflächenkontamination des Rotorblattes.

2.1. Windenergieanlagen

In Abschnitt 2.1.1 wird der Aufbau und das für die vorliegende Arbeit relevante, grundlegende Funktionsprinzip von WEA vorgestellt. Anschließend wird in Abschnitt 2.1.2 das aerodynamische Auftriebsprinzip und die für die Aerodynamik relevante Grenzschichtströmung auf der Oberfläche

des Rotorblattes einer WEA beschrieben. Dabei werden grundlegende Strömungsphänomene wie die natürliche und verfrüht auftretende laminar-turbulente Transition eingeführt.

2.1.1. Aufbau einer Windenergieanlage

Überblick

Eine Windenergieanlage ist ein Energiewandler, der die kinetische Energie des Windes zunächst in mechanische Arbeit in Form einer Drehbewegung und folgend durch den Antrieb eines Generators in elektr. Energie umwandelt [Hau2016, Hei2018]. Abgesehen von verschiedenen experimentellen Bauformen, wie z.B. fliegende WEA, besteht die am weitesten verbreitete und kommerziell verwendete Bauform aus einem senkrecht stehenden Turm, der auf einem Fundament installiert ist [Jam2018]. Das Fundament kann dabei auf dem Boden, dem Meeresgrund oder einer Plattform im Wasser positioniert sein.

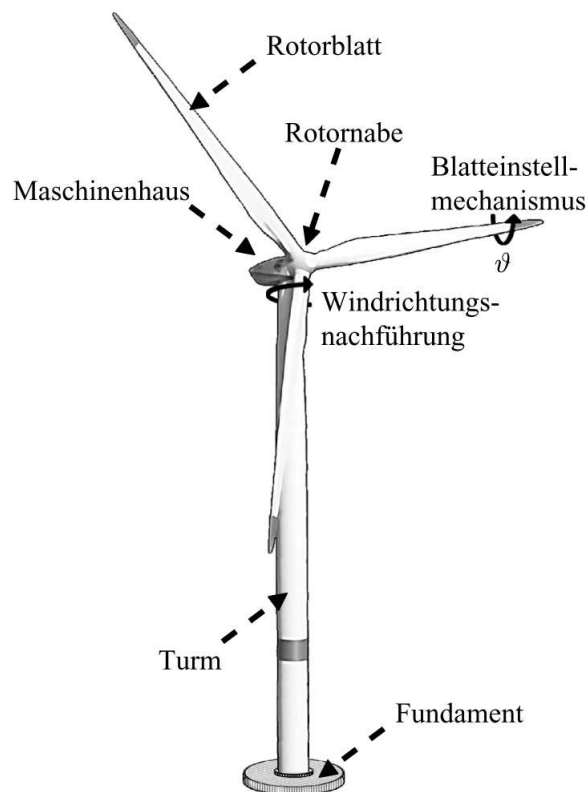


Abb. 2.2.: Skizze einer Windenergieanlage mit Horizontalachse. Grafik nach [Dol2018a]

Eine durch die weitere Bauform gegebene Unterteilung verschiedener Anlagentypen basiert auf der Ausrichtung der Hauptdrehachse in vertikal und horizontal. Aus konzeptbedingten Vorteilen hat sich hierbei die horizontale Bauform durchgesetzt [Hau2016], weshalb sich die vorliegende Arbeit auf das Prinzip der WEA mit Horizontalachse beschränkt. Die horizontale Drehachse befindet sich in einem auf dem Turm positionierten Maschinenhaus und mündet an einem herausragenden Ende in dem Rotorstern, der üblicherweise aus drei Rotorblättern besteht. Im Maschinenhaus befindet sich ein Generator, der abhängig von der Bauweise direkt oder über ein Getriebe angetrieben die Drehbewegung des Rotors bzw. der Achse in elektr. Energie umwandelt, die in das Stromnetz eingespeist wird [Sie2016]. Eine Drehzahl- und Leistungsregelung der WEA wird durch eine Änderung des Angriffswinkels der anströmenden Luft auf die einzelnen Rotorblätter realisiert. Hierzu wird das Rotorblatt durch einen Elektromotor an der Wurzel gedreht und der

Blatteinstellwinkel ϑ erhöht bzw. reduziert (Pitch-Regelung) [Hau2016, Twe2005]. Bei einer Änderung der Windrichtung wird das Maschinenhaus inkl. Drehachse der aktuellen Windrichtung nachgeführt (Azimutantrieb) [Sch2016], um Querströmungen zu vermeiden indem die Rotorfläche immer senkrecht zur Windrichtung ausgerichtet wird. Die Windstärke und -richtung wird dabei von Messinstrumenten auf dem Maschinenhaus gemessen.

Rotorblatt

Die Rotorblätter einer WEA stehen in direktem Kontakt mit dem Wind und wandeln die in der Luftbewegung enthaltene kinetische Energie in eine Drehbewegung des Rotors um. Ein klassisches Rotorblattdesign ist dabei der Widerstandsläufer, bei dem die Drehachse quer zur Strömungsrichtung ausgerichtet ist und die für die Drehbewegung Schubkraft direkt aus dem Luftwiderstand eines Rotorblattes entsteht. Da die Effizienz dieser Bauart limitiert ist, hat sich eine andere Bauart, die auf dem Prinzip des aerodynamischen Auftriebs basiert, für herkömmliche WEA durchgesetzt [Hau2016, Twe2005]. Die Rotorblätter dieser Bauart weisen eine Profilform auf, die bei Umströmung eine Auftriebskraft erzeugt und damit den Rotor in eine Drehbewegung versetzt [Hau2016]. Bei Rotoren, die diesem Prinzip folgen, ist die Drehachse parallel zur Hauptströmungsrichtung des Windes ausgerichtet und die Rotorblätter sternförmig an der Spitze der Achse angebracht. Hierbei hat sich eine Anzahl von drei Rotorblättern als optimal herausgestellt. Die Rotorblätter haben eine lange, schlanke Form, die in drei Abschnitte unterteilt werden kann [Sch2012], siehe Abb. 2.3. Beginnend am Zentrum des Rotors, der Rotornabe, befindet sich die Blattwurzel. Da in diesem Bereich die höchsten mechanischen Kräfte wirken, überwiegt der Bedarf an struktureller Integrität, weshalb das Rotorblatt eine möglichst stabile, zylindrische Form aufweist und kein bzw. nur ein geringes Maß an Auftrieb erzeugt. Es folgt ein Übergangsbereich, in dem die Rotorblattform aus der zylindrischen in eine aerodynamische Profilgeometrie übergeht. Dieser als Knie bezeichnete Bereich weist die größte Tiefe, also Strecke zwischen Vorderkante und Hinterkante, des Rotorblattes auf. Ab dem Knie verjüngt sich das Blatt trapezförmig [Mø2013, Hei2018]. Die Länge der Verbindungslinie zwischen Vorderkante und Hinterkante, die Profilschne c , nimmt stetig ab [Hau2016]. Mit zunehmendem Radius von der Blattwurzel aus löst das Bestreben nach optimalen aerodynamischen Eigenschaften den Bedarf an einer hohen Strukturstabilität ab. Die Blattform ist möglichst schlank, um den aerodynamischen Auftrieb zu maximieren und den Luftwiderstand zu minimieren. An der Rotorblattspitze wirkt die höchste Umdrehungsgeschwindigkeit, weshalb das Verhältnis von Auftrieb zu Luftwiderstand maximal ist. In diesem Bereich wird die Profilform durch das Bestreben eine ungewollte Geräuscherzeugung und leistungsreduzierende Strömungsphänomene zu vermeiden dominiert.

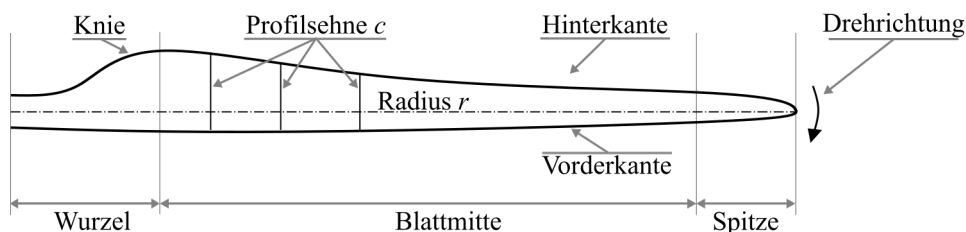


Abb. 2.3.: Skizze einer typischen Rotorblattform einer Horizontalachsen-WEA. Die Länge zwischen Vorderkante und Hinterkante (Profilschne c) nimmt zur Spitze hin ab. Die dickste Stelle wird als Knie bezeichnet und bildet den Übergang der zylinderförmigen Blattwurzel zur aerodynamischen Profilgeometrie in der Blattmitte und -spitze.

Um eine hohe Steifigkeit bei gleichzeitig geringer Masse zu erreichen, bedient sich der Rotorbau bei verschiedenen Verfahren der Leichtbautechnik. Dies gilt im Wesentlichen für die Verwendung von Faserverbundwerkstoffen [Dan2016]. Am häufigsten verwendet wird hierbei glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK), da es günstiger ist als carbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK) und eine ausreichend hohe Biegesteifigkeit aufweist. Bei größeren WEA wird jedoch für besonders strapazierte Teile des Rotorblattes vermehrt auf CFK zurückgegriffen, um den hohen Biegebelastungen standzuhalten [Kal1997]. Das Rotorblatt wird in zwei Halbschalen gefertigt und die Fasergelege werden in Polyester- oder Epoxydharz getränkt [Sør2010, Hei2018]. Bevor die zwei Halbschalen zusammengeklebt werden, wird der Hohlraum mit Stegen und Gurten zusätzlich stabilisiert [Twe2005]. Des Weiteren verwenden einige Hersteller eine Sandwich-Bauweise, bei der zwischen zwei Lagen Faserverbundwerkstoff Balsaholz oder Kunststoffschäum einlaminiert wird [Sør2010, Dan2016]. Die äußere Hülle des Rotorblattes wird meist mit einer Gelschicht bestrichen, um den Faserverbundwerkstoff vor äußeren Einflüssen, wie Erosion und UV-Strahlung zu schützen [Sør2010].

2.1.2. Auftrieb und Grenzschichtströmung am Rotorblatt

Der Rotor einer WEA ist ein Wandler, welcher die kinetische Energie des Windes in mechanische Arbeit umwandelt. Diese Umwandlung ergibt sich aus der aerodynamischen Eigenschaft der Rotorblätter, den Rotor mit Hilfe des Auftriebsprinzips in eine Drehbewegung zu versetzen. Ziel ist es, die dynamische Belastung durch den Wind möglichst gleichmäßig umzusetzen. Die erste auf Auftrieb basierende Theorie zur Energieumwandlung am Windrotor stammt von Albert Betz (Betzsche Theorie) Anfang des 20. Jahrhunderts. Sie bildete die Grundlage für die Tragflügeltheorie, einer Disziplin der Strömungsmechanik. Durch sie können die wirkenden Luftkräfte an einem Rotor beschrieben werden. Eine weitere für den Betrieb einer WEA relevante Theorie besteht in der Grenzschichttheorie der Strömung um das Rotorblatt, da der zu minimierende Luftwiderstand an modernen Rotorblättern im Wesentlichen von dieser abhängt. Im folgenden werden beide Theorien zusammenfassend vorgestellt.

Tragflügeltheorie

Der Rotor einer WEA steht im unmittelbaren Kontakt mit dem Wind und ist für die Umwandlung der im Wind vorhandenen kinetischen Energie in Rotationsenergie verantwortlich. Stark vereinfacht, kann der Rotor einer WEA als Fläche angesehen werden, welche dem Wind durch Verzögerung der Strömungsgeschwindigkeit verlustlos Leistung entnimmt [Bet1926]. Die entnommene Leistung P_{ent} bei einer Windgeschwindigkeit von v_W durch einen Rotor mit der Kreisfläche A_{Rot} errechnet sich zu

$$P_{\text{ent}} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot A_{\text{Rot}} \cdot v_W^3 \cdot c_P. \quad (2.1)$$

Dabei ist ρ_{Luft} die Luftdichte und c_P der Leistungsbeiwert, welcher von dem Verhältnis zwischen den Windgeschwindigkeiten vor und hinter der Rotorscheibe abhängt. Das theoretische Maximum des Leistungsbeiwert wurde durch Albert Betz bereits 1926 bestimmt und beträgt $c_{P, \text{Betz}} = 0,59$ [Bet1926]. Folglich kann ein Rotor maximal 59 % der im Wind enthaltenen Leistung umwandeln. In der Realität wird dieser maximale Leistungsbeiwert jedoch nicht erreicht, da verschiedene Verlustleistungen am Rotor auftreten, die im Betz'schen Modell nicht berücksichtigt wurden. So bewirkt die Drehbewegung des Rotors eine gegenläufige Verdrehung des Luftstromes hinter dem Rotor, den so genannten Drall. Die darin enthaltene Energie steht nicht zur Energieumwandlung am Rotor zur Verfügung und verringert so die Leistungsentnahme [Hau2016, Hei2018]. Weitere negative Einflüsse auf die erreichbare Leistungsentnahme bestehen im induzierten Widerstand durch die an den Rotorblattspitzen entstehenden freien Rand-

wirbeln und Verlusten an der Rotornabe [Hau2016].

Die tatsächliche Rotorleistung, hängt von den wirkenden Luftkräften an den Rotorblättern ab. Die aerodynamischen Kräfte lassen sich in zwei Komponenten aufteilen: Die Tangentialkraft, die in der Ebene der Rotorscheibe wirkt und das Drehmoment bewirkt und die Schubkraft, die als Belastung auf das Rotorblatt, den Turm und den Antriebsstrang der WEA wirkt [Tim2013]. Mit Hilfe der Blattelementtheorie lassen sich die örtlichen Luftkraftbeiwerte an einem Rotorblattabschnitt im Abstand r von der Rotorachse betrachten. Integriert über die gesamte Rotorebene ergibt sich daraus das Antriebsmoment in tangentialer Richtung und der Rotorgesamt Schub [Hau2016]. Dabei wird die Annahme getroffen, dass sich die Luftkräfte der radialen Abschnitte nicht gegenseitig beeinflussen.

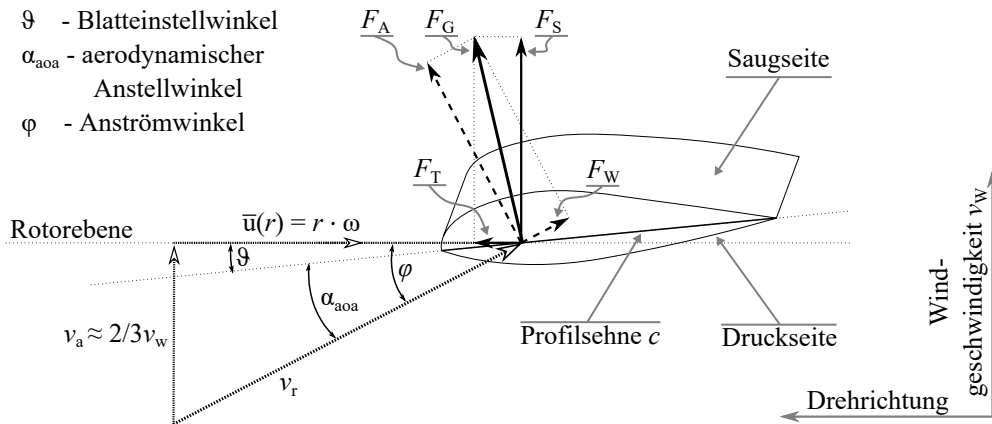


Abb. 2.4.: Blattelementtheorie an einem radialen Abschnitt eines Rotorblattes mit aerodynamischer Profilform. Dargestellt sind Geschwindigkeiten und wirkende Luftkräfte, resultierend in eine Tangentialkraft F_T , die ein Drehmoment am Rotor bewirkt, nach [Hau2016, Tim2013].

In Abb. 2.4 ist skizzenhaft ein Rotorblattsegment mit aerodynamischer Profilform und dem radialen Abstand r von der Rotornabe dargestellt. Die wirkenden Luftkräfte, resultierend aus der geometrischen Anströmsituation und dem Bewegungsfreiheitsgrad des Rotorblattes, verdeutlichen das aerodynamische Auftriebsprinzip. Das Profil ist mit der Druckseite dem Wind zugewandt und bewegt sich mit der radialen Umdrehungsgeschwindigkeit $\bar{u}(r)$ in der Rotorebene in Drehrichtung. Quer zur Rotorebene wirkt der Wind mit der axialen Anströmgeschwindigkeit v_a , die einen idealen Wert von ca. $2/3$ der Windgeschwindigkeit v_w annimmt [Bet1926]. Die aus beiden Komponenten resultierende Anströmgeschwindigkeit v_r trifft gegenüber der Rotorebene unter dem Winkel φ auf das Rotorblatt. Das Rotorblattprofil ist bezüglich der Profilschnecke um den Blatteinstellwinkel ϑ zur Rotorebene gekippt, woraus sich der Auftrieb beeinflussende aerodynamische Anstellwinkel α_{aoa} zwischen Anströmung v_r und der Profilschnecke ergibt. Resultierend aus der Anströmung, wirkt die aerodynamischen Widerstandskraft F_W und die Auftriebskraft F_A in Anströmrichtung bzw. quer dazu. Beide Kraftkomponenten kombiniert wirken als Gesamtkraft F_G auf das Profil. Die Gesamtkraft F_G kann entlang der Bewegungsrichtung des Profils und quer zu ihr in die Tangentialkraft F_T und Schubkraft F_S aufgeteilt werden. Die beiden Kraftkomponenten sind neben der Luftdichte, Anströmgeschwindigkeit und Profilschneckenlänge auch von den dimensionslosen Auftriebs- und Widerstandsbeiwerten c_A und c_W abhängig, die wiederum von der Profilform und dem Anstellwinkel α_{aoa} abhängig sind [Hau2016]. Das Verhältnis $\frac{c_A}{c_W}$ aus diesen Werten ist die Gleitzahl und charakterisiert verschiedene Profilformen des Rotorblattes. Aus der Kräfteverteilung am Rotorblattprofil folgt, dass eine hohe Gleitzahl ei-

ne Maximierung des Tangentialkraft und Minimierung der Schubkraft bewirkt und damit die Energiewandlung des Rotors optimiert und gleichzeitig die Lasten auf die Struktur der WEA minimiert [Hau2016, Hei2018, Gas2005].

Grenzschichtströmung

Eine hohe Gleitzahl eines Rotorblattes wird erreicht, indem der Auftrieb maximiert und der Widerstand minimiert wird. Aus diesem Grund werden für WEA-Rotoren schlanke, aerodynamische Profilformen verwendet, deren Druckwiderstand sehr gering ist. Der dominierende Anteil am Gesamtluftwiderstand hängt daher vom Reibungswiderstand zwischen Strömung und Oberfläche ab. [Hau2016]. Die für die Reibung relevante Wechselwirkung zwischen Strömung und Oberfläche wurde 1904 erstmals von Ludwig Prandtl, dem Gründer der Grenzschichttheorie, berücksichtigt [Pra1904]. Nach Prandtl kann die Strömung um einen Körper in zwei Schichten eingeteilt werden: Eine dünne Schicht nahe der Oberfläche des Körpers, genannt Grenzschicht, und die Außenströmung, außerhalb der Grenzschicht. Der wesentliche Betrachtungsunterschied ist, dass in der Grenzschicht die Reibungseffekte dominieren während sie in der Außenschicht vernachlässigt werden können. Die aus der Viskosität des Fluides entstehenden Reibungskräfte bremsen die Strömung zur Oberfläche hin ab, sodass die Strömungsgeschwindigkeit an der Wand des umströmten Körpers null beträgt [Huc2012]. Bis zur Einführung von Prandtls Grenzschichttheorie wurde der Einfluss der Viskosität der Strömung und die daraus resultierende Reibung vernachlässigt, um die hohen mathematischen Schwierigkeiten der Bewegungsgleichungen der Strömung mit berücksichtigter Reibung (Navier-Stokes-Gleichung [Nav1827, Sto1849]) zu umgehen [Sch2006]. Diese Annahme einer reibungsfreien Strömung wurde für typische Fluide wie Luft oder Wasser getroffen, da ihre Viskositäten sehr gering sind. Durch die Weiterentwicklung der Tragflächentheorie und daraus entstehenden Profilformen mit geringen Druckwiderständen, hat jedoch der Einfluss des Reibungswiderstandes an Bedeutung gewonnen [Sch2006]. Die Untersuchung der Grenzschichtströmung hat daher eine hervorgehobene Rolle bei der Bewertung der aerodynamischen Eigenschaften eines Rotorblattes.

Es existieren im Wesentlichen zwei Arten der Grenzschichtströmung: Die laminare und die turbulente Strömung. Die Existenz und der Unterschied dieser beiden Strömungszustände wurde erstmals von Osborne Reynolds 1883 in seinem „Farbfadenversuch“ gezeigt [Rey1883]. Die laminare Strömung ist durch parallele, geordnete Luftschichten gekennzeichnet, in denen nahezu kein Austausch quer zur Strömungsrichtung stattfindet. Die turbulente Strömung ist dagegen durch eine stark unregelmäßige Schwankungsbewegung und Vermischungen quer zur Strömungsrichtung geprägt [Mas2006].

Die Vorgänge in der Grenzschicht werden durch die Trägheitskräfte und Reibungskräfte des Fluids bestimmt. Ihr Verhältnis wird durch die dimensionslose Kennzahl

$$Re = \frac{\rho_{\text{Luft}} v l}{\mu} \quad (2.2)$$

definiert und wird Reynoldszahl genannt [Fal2018]. Ihr liegt die Dichte ρ_{Luft} und Viskosität μ des Fluids, sowie der Anströmgeschwindigkeit v und eine charakteristische Lauflänge l zugrunde. Bei aerodynamischen Profilen entspricht die charakteristische Lauflänge der Profilhöhe. Bei niedrigen Reynoldszahlen dominieren die Trägheitskräfte und die Strömung ist laminar. Bei höheren Reynoldszahlen hingegen überwiegen die Reibungskräfte und die Strömung ist turbulent [Hau2016]. An dem Ort x_{krit} entlang der Lauflänge des aerodynamischen Profils geht die laminare Strömung in eine turbulente Strömung über, da die kritische Reynoldszahl Re_{krit} erreicht wird [Pol2009]. Die Dicke $\delta(x)$ der Grenzschicht sinkt mit steigender Reynoldszahl und steigt mit der Lauflänge x [Sch2006]. An gängigen WEA mit einer Nennleistung von mehreren MW und Rotordurchmessern bis 200 m entstehen durch Blattspitzengeschwindigkeiten bis

90 ms^{-1} Reynoldszahlen abhängig von der betrachteten radialen Blattposition von $0,5 \cdot 10^6$ bis $1,2 \cdot 10^7$.

In Abb. 2.5 ist der Querschnitt eines aerodynamischen Profils mit eingezeichneter Grenzschichtströmung und Außenströmung dargestellt. Die Strömungsrichtung ist von links nach rechts, weshalb die Strömung im linken Bereich der Grenzschicht laminar ist und sich parallele, an die Profilform anpassende Luftschichten aufweist. Der Umschlagpunkt von dem laminaren in den turbulenten Strömungszustand ist mit x_{krit} gekennzeichnet. Stromabwärts hinter dem Umschlagpunkt ist die Strömung turbulent und durch einen Austausch der Schichten quer zur Strömungsrichtung geprägt. Jenseits der dicksten Stelle des Profils steigt der Druckgradient der Außenströmung. In Kombination mit der sinkenden kinetischen Energie der Grenzschichtströmung kann es zu einer Ablösung der Grenzschicht und Wirbelbildung mit rückläufiger Strömung kommen. Ab diesem Ablösepunkt sorgt die Wirbelbildung für einen großen Austausch der Luftschichten [Mas2006]. Eine aus der Ablösung resultierende unsymmetrische Druckverteilung in der Außenströmung in Form eines Unterdruckes im sogenannten Totwassergebiet hinter dem Ablösepunkt erzeugt einen hohen Druckwiderstand des Profils [Sch2006]. Daher ist die Grenzschicht sowohl für den Reibungswiderstand als auch für den Druckwiderstand verantwortlich. Eine Untersuchung der Grenzschicht ist also relevant für die Betrachtung des Luftwiderstandes eines aerodynamischen Profils [Hau2016]. Die Geschwindigkeitsprofile $u(x,y)$ der verschiedenen Strömungsbereiche, so wie die Dicke $\delta(x)$ der Grenzschicht (nicht maßstabsgetreu) sind ebenfalls dargestellt. Die Dicke der Grenzschicht nimmt insgesamt in Strömungsrichtung zu, zumal der Anstieg im turbulenten Bereich größer ausfällt, als im laminaren [Pol2009].

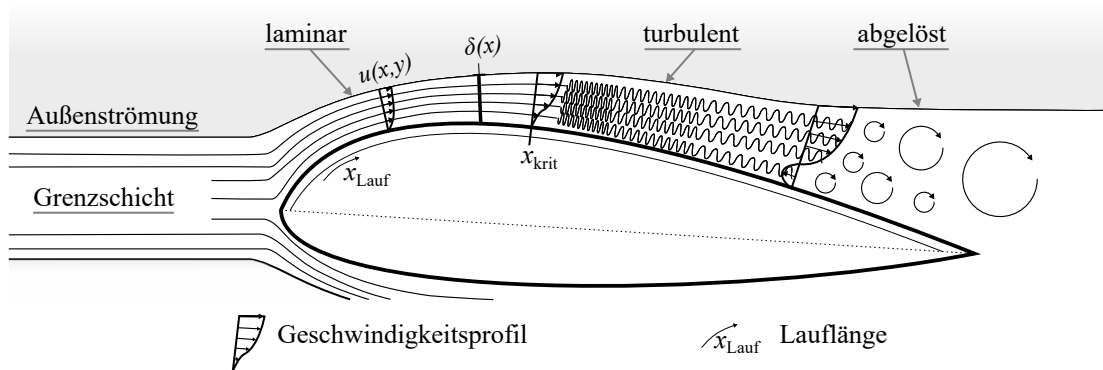


Abb. 2.5.: Grenzschichtströmung auf der Oberfläche eines aerodynamischen Tragflächenprofils. Ausprägung der laminaren Strömung und turbulenten Strömung und der Transition bei x_{krit} . Im Bereich der Hinterkante löst die Strömung vollständig ab, nach [Hau2016]

Aufgrund des höheren Reibungswiderstandes im turbulenten Strömungsbereich der Grenzschicht, ist der Ort des Umschlagpunktes (Transition) von laminarer in turbulente Strömung von hervorgehobener Bedeutung [Huc2012]. Ein größerer Bereich turbulenter Strömung hat ein größeren Luftwiderstand des Profils zur Folge. Daher werden an WEA meist sogenannte Laminarprofile verwendet, die sich durch eine möglichst große laminare Lauflänge kennzeichnen [Hau2016, Sch2017]. Bei steigendem Angriffswinkel α_{aoa} erhöht sich der Druckanstieg entlang der Saugseite des Profils, sodass es dort zu einer Strömungablösung kommen kann. Die Profilform ist dabei so gewählt, dass die Ablösung möglichst spät auftritt, indem die dickste Profilstelle und damit der Ort ab dem der Druck der Außenströmung ansteigt nach hinten verlagert wird [Sch2006]. Der Umschlagpunkt von laminarer in turbulente Strömung wird allgemein als ein Punkt angenommen - der Ort x_{krit} auf der Profiloberfläche. Tatsächlich ist die Transition jedoch ein Bereich, der in

verschiedene Teilbereiche unterteilt werden kann. Im folgenden sind die Teile des Transitionsbereichs zusammenfassend aufgelistet [Whi2006]:

1. Stabile laminare Strömung vor der Transition
2. Instabile zweidimensionale Tollmien-Schlichting-Wellen
3. Dreidimensionale Wirbelbildung und Wirbelschleppen
4. Wirbelzerfall in Regionen mit hoher lokaler Scherung
5. Wirbelzerfall in dreidimensionale Fluktuationen
6. Bildung von Turbulenzflecken
7. Verschmelzen der Flecken in vollturbulente Strömung

Die Auswirkung der Verteilung der laminaren und turbulenten Strömung bzw. die Lage der laminar-turbulenten Transition auf die Effizienz der Energieumwandlung motiviert den Bedarf einer Messtechnik, die an WEA in Betrieb angewandt werden kann. Visualisierung, vgl. Abschnitt 2.5, ermöglicht hierbei die globale Unterscheidung der Strömungsbereiche, während eine geeignete Lokalisierung die Lage der Transitionslinie mit möglichst geringen Messabweichungen ermittelt, vgl. Abschnitt 2.6.

Neben der Reynoldszahl hängt der Ort der laminar-turbulenten Transition im Wesentlichen vom Druckverlauf der Außenströmung, der Oberflächenbeschaffenheit und dem Turbulenzgrad der Außenströmung ab [Sch2006]. Rauheiten der Oberfläche können ohne den Prozess der laminaren Instabilität laminar-turbulente Transitionen auslösen und direkt Turbulenzflecken erzeugen [Mor1969]. Diese nicht aus der Reynoldszahl bzw. Strömungscharakteristik selbst entstehende Transition taucht an Rotorblättern von WEA auf, wenn Verschmutzungen oder Beschädigungen der Oberfläche vorliegen [Hau2016] und erzeugt eine verfrühte laminar-turbulente Transition [Gau2014], sowie eine Verlängerung des Übergangsprozesses [Sag2013]. Verschmutzung und Erosion durch Insekten [Cor2001], Regen, Staub oder Hagel [Dal2009, Kee2013, Slo2015] zählen hierbei zu den häufigsten Ursachen. Eine dadurch verfrüht auftretende Transition erhöht den Bereich turbulenter Strömung und damit den Reibungswiderstand des Profils, was einer Reduzierung des Wirkungsgrades eines Rotorblatts und damit die Leistung der gesamten WEA zur Folge hat [Ehr2013, Sar2014]. Um die veränderte Verteilung der Strömungsbereich aufgrund einer Beeinflussung durch die Oberflächenrauheit zu quantifizieren, ist ein Lokalisierungsverfahren mit hoher Empfindlichkeit gegenüber den verfrühten Transitionen erforderlich, vgl. Abschnitt 2.6.2. Ein weiteres Phänomen, dass bevorzugt bei geringen Reynoldszahlen auftritt, ist die laminare Ablöseblase, bei der die laminar-turbulente Transition über einem Bereich abgelöster laminarer Strömung auftritt [Whi2006, Mon2004, Ric2009].

2.2. Thermofluid

In Abschnitt 2.1.2 wurde der Zusammenhang zwischen den wirkenden Auftriebs- und Widerstandskräften an aerodynamischen Profilen und den Eigenschaften der Grenzschichtströmung am Beispiel von Rotorblättern von WEA in Hinblick auf den Wirkungsgrad der Anlagen erläutert [Sch2006]. Für die Funktionsweise der Strömungsvisualisierung durch Thermografie elementar ist die Wechselwirkung zwischen Strömung und Oberflächentemperatur in den jeweiligen Bereichen auf dem betrachteten Rotorblatt. Das Messprinzip basiert auf der Existenz eines konvektiven Wärmeaustauschs zwischen der Grenzschichtströmung und der Festkörperoberfläche, durch welches das Strömungsfeld über komplexe Geometrien untersucht werden kann [Car1989]. Bei bekannten Randbedingungen erlauben die aus den räumlich unterschiedlichen konvektiven Wärmestromdichten entstehenden Temperaturgradienten auf der Oberfläche des Messobjekts eine Unterscheidung laminarer und turbulenter Strömungsbereiche. [Qua1987].

Der Zusammenhang zwischen der lokalen konvektiven Wärmestromdichte und der Eigenschaft der Grenzschichtströmung lässt sich anhand der Wärmetransportmechanismen innerhalb der Strömungsgrenzschicht bzw. der thermischen Grenzschicht in unmittelbarer Wandnähe erklären. Die thermische Grenzschicht beschreibt den oberflächennahen Bereich, bei dem nennenswerte Temperaturgradienten zwischen der Außenströmung und Oberfläche auftreten [Sch2006]. Da es sich an WEA in Betrieb im Wesentlichen um Unterschallströmungen ($Ma \leq 0,3$) handelt, ist die Strömung inkompressibel [Wei2019], für welche allgemein das Newton'sches Abkühlungsgesetz für den konvektive Wärmeübergang zwischen einem Fluid und einem umströmten Körper gilt [Pol2009, Tru2008, Ben2018]:

$$\dot{q}_W = \alpha_{h,x} (T_W - T_S). \quad (2.3)$$

Somit hängt die konvektive Wärmestromdichte \dot{q}_W an der Wand neben der Differenz der Wandtemperatur T_W und der wandnahen Strömungstemperatur T_S von dem Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{h,x}$ ab. Der Zusammenhang zur Strömung kann für ebene Platten über die Reynolds-Analogie [Rey1874] getroffen werden [Mal2008, Kre1958]:

$$\frac{Nu_x}{Re_x Pr} = \frac{c_{f,x}}{2} \quad (2.4)$$

Sie stellt den Zusammenhang zwischen dem Reibungskoeffizienten $c_{f,x}$ zwischen Strömung und Oberfläche mit den Strömungscharakteristiken Nußeltzahl Nu_x und Reynoldszahl Re_x an der Stelle x , sowie der Prandtlzahl Pr dar. Die dimensionslose Nußeltzahl beschreibt das Verhältnis aus Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{h,x}$ zu Wärmeleitfähigkeit der Strömung λ_h und beinhaltet zudem die charakteristische Lauflänge L des umströmten Objektes [Pol2009]:

$$Nu_x = \frac{\alpha_{h,x} L}{\lambda_h}. \quad (2.5)$$

Die Prandtlzahl beschreibt das Verhältnis aus kinematischer Zähigkeit und Temperaturleitfähigkeit der Strömung. Dieser Zusammenhang kann näherungsweise auch für gekrümmte Oberflächen angenommen werden. Unter der Annahme, dass die Prandtlzahl $Pr = 1$ ist, folgt gemäß [Gar1989] aus Gleichung (2.4) und (2.5):

$$c_{f,x} = 2 \frac{Nu_x}{Re_x Pr} = 2 \frac{\alpha_{h,x} \nu}{\lambda_h v}, \quad (2.6)$$

wobei ν die kinematische Viskosität und v die Geschwindigkeit der Strömung außerhalb der Grenzschicht ist. Eine Umformung nach $\alpha_{h,x}$ ergibt:

$$\alpha_{h,x} = \frac{1}{2} c_{f,x} \frac{\lambda_h v}{\nu}. \quad (2.7)$$

Durch Gleichung (2.7) ist der proportionale Zusammenhang zwischen dem Reibungskoeffizienten $c_{f,x}$ und dem Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{h,x}$ gegeben.

In Abb. 2.6 ist exemplarisch der Verlauf des Reibungskoeffizienten $c_{f,x}$ für ein DU96W180 Tragflächenprofil dargestellt. Die Werte sind einer *XFoil* Simulation bei einer Reynoldszahl von $3 \cdot 10^6$ entnommen. Es ist erkennbar, dass der Reibungskoeffizient in den beiden Strömungsbereichen nicht konstant ist, sondern mit der Lauflänge abnimmt. Am Ort der laminar-turbulenten Transition bei einer relativen Sehnenposition von ca. 0,42 ist im Verlauf des Reibungskoeffizienten ein schlagartiger Anstieg zu erkennen. Aus dem unterschiedlichen Niveau des Reibungskoeffizienten in der laminaren und der turbulenten Grenzschicht folgt gemäß Gleichung (2.7) ein unterschiedlicher Wärmeübergangskoeffizient und damit Wärmestromdichte [Gar1991]. Grund für den

erhöhten Reibungswiderstand und Wärmeaustausch in der turbulenten Strömung ist der durch die turbulenten Schwankungsbewegungen bewirkte erhöhte Austausch von Impuls und Energie zu benachbarten Fluidteilchen [Pol2009, Huc1993]. Die plötzliche Änderung des Reibungskoeffizienten und der Wärmestromdichte am Ort der laminar-turbulenten Transition bewirkt folglich einen räumlich begrenzten Temperaturgradienten auf der Oberfläche [Qua1987, Bou1983].

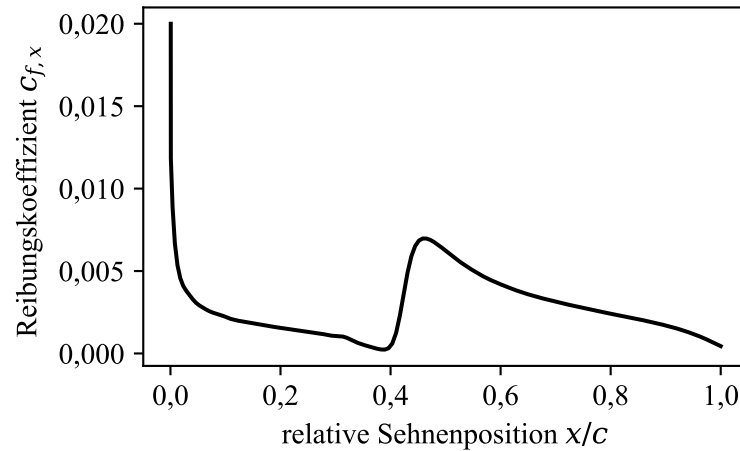


Abb. 2.6.: Reibungskoeffizient $c_{f,x}$ auf einem DU96W180 Profil bei einer Chord-Reynoldszahl von $Re_c = 3 \cdot 10^6$. An der Stelle der laminar-turbulenten Transition ist ein sprunghafter Anstieg des Reibungskoeffizienten zu erkennen. Werte aus einer *XFoil* Simulation.

Aus dem Zusammenhang zwischen dem Strömungszustand und dem Wärmeaustausch folgt den Messansatz der thermografischen Strömungsvisualisierung, demnach Strömungszustände anhand der Oberflächentemperatur in den jeweiligen Bereichen unterschieden werden können. Entscheidend für eine Messung der Temperatur aus der Entfernung an WEA in Betrieb ist die Wärmestrahlung, vgl. Abschnitt 2.3, die eine berührungslose Messung ermöglicht, indem ein Infrarotkamarasystem verwendet wird, vgl. Abschnitt 2.4, dass die abgestrahlte Wärmeleistung detektiert. Die Temperaturunterschiede in dem aufgenommenen Thermografiebild können als Strömungsvisualisierung interpretiert werden, vgl. Abschnitt 2.5, und ermöglichen durch geeignete Verfahren eine Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition anhand des Temperaturgradienten, vgl. Abschnitt 2.6.

2.3. Thermografie

In diesem Abschnitt werden die theoretischen Grundlagen der elektromagnetischen Strahlung thematisiert. Relevant für die berührungslose Messung von Oberflächentemperaturen ist hierbei speziell die Wärmestrahlung, vgl. Abschnitt 2.3.1. Hierbei wird nach der Einführung der relevanten strahlungsphysikalischen Größen besonderes Augenmerk auf den Vergleich der verschiedenen Bereiche der Wärmestrahlung gelegt und die Unterschiede bei der Detektion der Strahlung in den jeweiligen Bereichen diskutiert. So werden die Vorteile einer Detektion der Wärmestrahlung im langwelligen Infrarotspektrum für die Anwendung der thermografischen Strömungsvisualisierung herausgearbeitet. Nach der grundlegenden Theorie der Wärmestrahlung wird in Abschnitt 2.3.2 die Gerätetechnik eingeführt, die zur Detektion der Wärmestrahlung verwendet wird. Anschließend werden die im praktischen Teil dieser Arbeit verwendeten zwei Infrarotkamarasysteme vorgestellt und verglichen. In Abschnitt 2.3.3 werden die Rauscheinflüsse auf die Temperaturmessung beschrieben und eine Abschätzung des signalabhängigen Rauscheinflusses des Photonenschro-

trauschens für die beiden verwendeten Kamerasysteme theoretisch abgeschätzt und verglichen. Hierbei wird erneut die Detektion durch ein im langwelligen Infrarotbereich sensitives Kamerasystem motiviert.

2.3.1. Wärmestrahlung

Strahlungsphysikalische Größen

Im Jahr 1800 vollzog William Herschel sein berühmtes Prisma-Experiment, bei dem er Sonnenlicht durch Dispersion zerlegte und die Temperatur der verschiedenfarbigen Lichtanteile mit einem Thermometer maß [Her1800]. Hierbei bemerkte er, dass jenseits des roten Lichtes eine unsichtbare Strahlung existiert, die eine noch höhere Temperatur aufweist als die sichtbaren Anteile. Er entdeckte die Infrarotstrahlung.

Grund für den Temperaturanstieg in Herschels Experiment durch unsichtbare Strahlung ist die Tatsache, dass jeder Körper über dem absoluten Nullpunkt Wärme in Form von elektromagnetischer Strahlung abgibt. Bei steigender Temperatur treten durch eine durchschnittlich höhere Energie verstärkt atomare Anregungsprozesse auf, wodurch sich die auch spontane Emission von elektromagnetischer Strahlung erhöht [Gau1994]. Im Sinne der Quantentheorie kann die elektromagnetische Strahlung anstatt als Welle auch als gequantelte, diskrete Teilchen (Photonen) betrachtet werden, welche die Oberfläche des Körpers verlassen [Bae2016]. Die Energie $E_{P,\lambda}$ eines Photons wird dabei von seiner Wellenlänge λ bestimmt. Für eine Ausbreitung der elektromagnetischen Strahlung im Vakuum ergibt sich die spektrale Strahlungsenergie Q_λ für $N_{P,\lambda}$ Photonen der Wellenlänge λ wie folgt [Ber2014]:

$$Q_\lambda = E_{P,\lambda} \cdot N_{P,\lambda} = \frac{h \cdot c_0}{\lambda} \cdot N_{P,\lambda}. \quad (2.8)$$

Hierbei beschreibt der Parameter $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$ das Planck'sche Wirkungsquantum und $c_0 = 299.792.458 \text{ ms}^{-1}$ die Lichtgeschwindigkeit in Vakuum. Für Berechnungen im nicht-leeren Raum muss die Geschwindigkeit mit Hilfe des Brechungsindex n_{med} des jeweiligen Mediums korrigiert werden: $c_n = \frac{c_0}{n_{\text{med}}}$. Bis auf Weiteres wird in dieser Arbeit auf diese Korrektur verzichtet.

Die gesamte Strahlungsenergie Q über dem gesamten Wellenlängenbereich kann durch das Integral

$$Q = \int Q_\lambda \, d\lambda \quad (2.9)$$

berechnet werden. Aus ihr kann die Strahlungsleistung Φ berechnet werden, indem die Strahlungsenergie auf die Zeiteinheit bezogen wird:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}. \quad (2.10)$$

Die auf den Flächenanteil dA eines Körpers bezogene emittierte Strahlungsleistung ist die spezifische Ausstrahlung einer Oberfläche:

$$M = \frac{d\Phi}{dA}. \quad (2.11)$$

Die Ausstrahlung bezieht sich hierbei auf den gesamten hemisphärischen Halbraum über dem Flächenelement dA und fasst darüber hinaus alle Wellenlängen λ zusammen. Wird die spezifische Ausstrahlung M einer Fläche dA auf den Raumwinkel $d\Omega$ bezogen, der unter dem Winkel β zum

Normal der Fläche dA steht, bildet dies die Strahldichte [Wal2001, Vol2018]:

$$L = \frac{dM}{d\Omega \cos(\beta)} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega \cos(\beta) dA}. \quad (2.12)$$

Die eingeführten Größen können auf einen infinitesimal kleinen Abschnitt $d\lambda$ der Wellenlängenspektrums bezogen werden, um sie als spektrale Größen zu definieren. Aus der Strahldichte L wir so z.B. die spektrale Strahldichte L_λ . Ändert sich die spektrale Größe in Abhängigkeit von der Wellenlänge, wird diese funktionale Abhängigkeit hinzugefügt. Das gleiche gilt für die Abhängigkeit von der Temperatur T der abstrahlenden Oberfläche [Bae2016]. Die spektrale Verteilung der Strahldichte oder spektrale Strahldichte-Verteilung, ist demnach wie folgt definiert:

$$L_\lambda(\lambda, T) = \frac{dL(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{d^3\Phi(\lambda, T)}{d\Omega \cos(\beta) dA d\lambda}. \quad (2.13)$$

Durch Umformung der Gleichung (2.12) nach M und Integration über den Halbraum Ω über der ausstrahlenden Fläche dA ergibt sich die spektrale Verteilung der spezifische Ausstrahlung:

$$M_\lambda(\lambda, T) = \int_{\Omega} L_\lambda(\lambda, T) \cos(\beta) d\Omega = \pi L_\lambda(\lambda, T). \quad (2.14)$$

Plancksches Strahlungsgesetz

Der Zusammenhang zwischen der spektralen spezifischen Ausstrahlung M_λ und der Wellenlänge wurde 1900 von Max Planck theoretisch abgeleitet [Pla1900]. Da die tatsächliche spezifischen Ausstrahlung eines Körpers abgesehen von der Temperatur auch von der Materialeigenschaften der Oberfläche abhängt, gilt das Plancksche Strahlungsgesetz nur für einen theoretischen, ideal abstrahlenden Körper, den sogenannten schwarzen Strahler (engl.: black body, BB). Dieser zeichnet sich dadurch aus, dass kein anderer Körper bei gleicher Temperatur mehr Strahlung abgeben kann. Die spektrale spezifische Ausstrahlung des schwarzen Körpers ergibt sich nach Planck zu [Wal2001]:

$$M_{\lambda, BB}(\lambda, T) = \frac{2\pi h c_0^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc_0}{\lambda k T}} - 1}, \quad (2.15)$$

wobei $k = 1,380.65 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ die Boltzmann-Konstante ist. Abb. 2.7 zeigt den durch das Plancksche Strahlungsgesetz gegebenen Zusammenhang aus Wellenlänge und spektraler spezifischen Ausstrahlung für verschiedene Temperaturen.

Die Grafik verdeutlicht, dass die spezifischen Ausstrahlung M_{BB} eines schwarzen Strahlers mit der Temperatur T ansteigt. Des Weiteren ist zu erkennen, dass sich das Maximum von $M_{\lambda, BB}$ bei höheren Temperaturen hin zu kürzeren Wellenlängen verschiebt. Dieser Zusammenhang wird durch das Wiensche Verschiebungsgesetz [Wie1893] beschrieben:

$$\lambda_{\max}(T) = \frac{b}{T}, \quad (2.16)$$

mit der Verschiebungskonstante $b = \frac{hc_0}{4,965k} = 2898 \mu\text{m K}$.

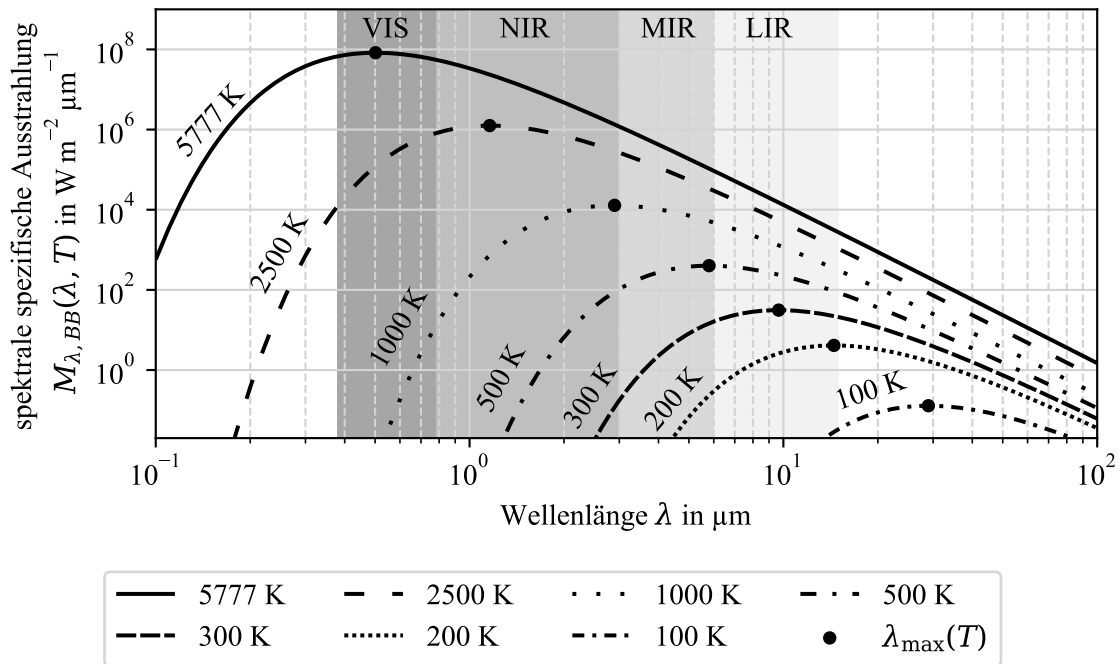


Abb. 2.7.: Verteilung der spektralen spezifischen Ausstrahlung $M_{\lambda, BB}$ über der Wellenlänge λ für verschiedene Oberflächentemperaturen T eines schwarzen Strahlers. Für jede Temperatur ist die Wellenlänge $\lambda_{\max}(T)$ markiert, bei der $M_{\lambda, BB}$ maximal ist (Wiensche Verschiebungsgesetz). Vertikale Bereiche teilen das Wellenlängenspektrum in nahes, mittleres und langes (near, middle, long) Infrarot aufzuteilen, nach [Bae2016].

Bereiche der Infrarotstrahlung

Das Wellenlängenspektrum der elektromagnetischen Strahlung wird in verschiedene Bereiche unterteilt. Der für das menschliche Auge sichtbare Wellenlängenbereich des Spektrums liegt beispielsweise zwischen 380 nm und 780 nm. Eine fest definierte Unterteilung des hieran schließenden Infrarotstrahlungsbereichs existiert jedoch nicht. So unterscheidet [Sch2004] nahes Infrarot zwischen 0,78 μm - 3 μm (engl.: near infrared, NIR), mittleres Infrarot zwischen 3 μm - 7 μm (engl.: middle infrared, MIR), langes Infrarot zwischen 7 μm - 14 μm (engl.: long infrared, LIR) und fernem Infrarot $>14 \mu\text{m}$ (engl.: far infrared, FIR). Andere Quellen wie [Ast2012] trennen MIR und LIR bei 6 μm und betiteln den Bereich $>15 \mu\text{m}$ als extremes Infrarot. Die Wärmestrahlung wird indessen von 0,1 μm - 1000 μm definiert und beinhaltet neben dem Infrarot auch das sichtbare Licht und einen Teil von ultravioletter Strahlung. Für diese Arbeit wird die Definition nach [Ast2012] verwendet, vgl. Tab. 2.1.

Tab. 2.1.: Unterteilung des Infrarot-Wellenspektrums nach [Ast2012].

NIR	MIR	LIR
0,76 μm - 3 μm	3 μm - 6 μm	6 μm - 15 μm

Objekte mit einer an der Oberfläche der Erde typischerweise auftretenden Temperatur im Bereich von 300 K haben den größten Anteil ihrer spezifischen Ausstrahlung im Bereich der Infrarotstrahlung [Ast2012]. In Abb. 2.7 wird diese Tatsache gemäß dem Planckschen Strahlungsgesetz durch den Flächenbereich unter dem entsprechenden Verlauf der spektralen spezifischen Ausstrahlung widerspiegelt, die bereits bei einer Wellenlänge von 100 μm deutlich abgefallen ist.

Die maximale spektrale Ausstrahlung liegt für 300 K bei ca. 10 μm und liegt damit im Spektralbereich der langwelligen Infrarotstrahlung.

Die von einer Oberfläche ausgestrahlte Strahlungsleistung lässt sich mit Hilfe des Planckschen Strahlungsgesetzes berechnen und hängt folglich von dem betrachteten Wellenlängenbereich und der Oberflächentemperatur ab. Wird die spektrale spezifische Ausstrahlung $M_{\lambda, BB}(\lambda, T)$ aus Gleichung (2.15) über einen Wellenlängenbereich $\lambda_1 - \lambda_2$ integriert, ergibt sich die spezifische Ausstrahlung in Abhängigkeit von der Temperatur T [Wal2001, Bae2016]:

$$M_{\lambda_1 - \lambda_2, BB}(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda, BB}(\lambda, T) d\lambda. \quad (2.17)$$

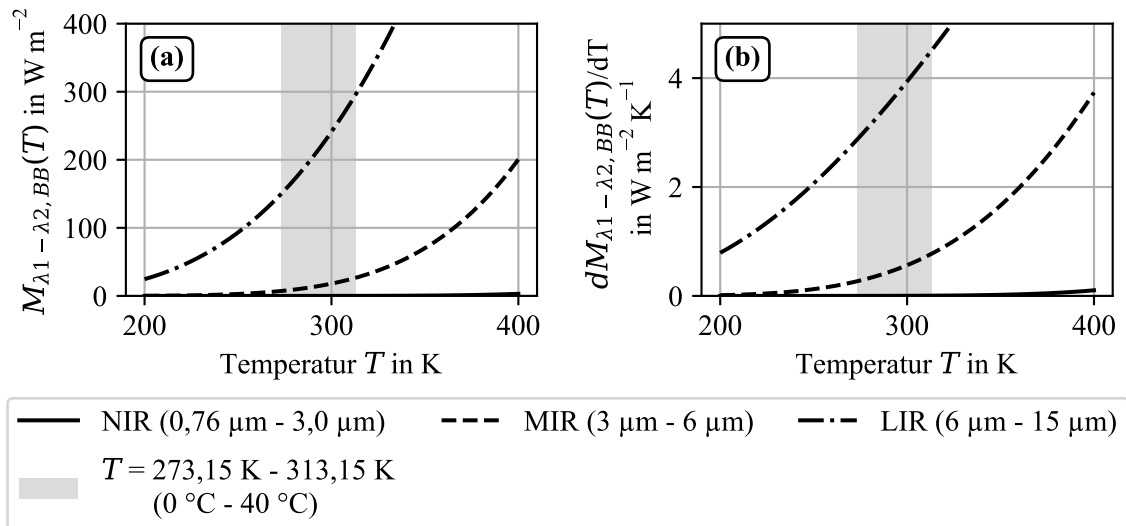


Abb. 2.8.: (a) Spezifische Ausstrahlung eines Schwarzen Körpers in Abhängigkeit von der Temperatur T für die Wellenlängenbereiche des Infrarotspektrums nach [Ast2012]. (b) Differenzieller Kontrast der spezifischen Ausstrahlung in (a). Für den relevanten Temperaturbereich von $0^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}$ ist die Differenz der spezifischen Ausstrahlung bei einem Temperaturunterschied ΔT im langwelligen Infrarotbereich um einen Faktor 8 größer als im mittelwelligen Infrarotbereich.

Für die drei in Tab. 2.1 aufgelisteten Bereiche der Infrarotstrahlung ergibt sich hierdurch der in Abb. 2.8 (a) dargestellte Verlauf. Innerhalb des für die Anwendung der thermografischen Strömungsvisualisierung relevanten Temperaturbereichs von $273,15\text{K} - 313,15\text{K}$ ($0^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}$) ist die spezifische Ausstrahlung im langwelligen Infrarotbereich im Mittel um einen Faktor 15 höher, als im mittelwelligen Infrarotbereich. Im nahen Infrarotbereich beträgt die ausgestrahlte Leistung nur ca. 0,1‰ des Niveaus der langwelligen Strahlung. Bei angenommener gleicher Strahlungsempfindlichkeit resultiert folglich die Detektion der Strahlung im langwelligen Infrarotbereich in eine ca. 15-fach höhere Signalstärke, als die Detektion im mittelwelligen Infrarotbereich.

Zur Erkennung von verschiedenen Bereichen unterschiedlicher Temperatur in Thermografieaufnahmen ist nicht nur die absolute Strahlungsleistung der Oberfläche und daraus resultierende Signalstärke von Bedeutung. Relevanter für die Unterscheidung von Bereichen mit einer Temperaturdifferenz ΔT ist der Unterschied der Strahlungsleistungen der verschiedenen Bereiche. Für diesen Zweck wird der differenzielle Kontrast $dM_{\lambda_1 - \lambda_2, BB}(T)/dT$ aus den Verläufen in Abb. 2.8 (a) berechnet und in Abb. 2.8 (b) dargestellt. Für den Temperaturbereich von $0^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}$ ist die Steigung der spezifischen Ausstrahlung im langwelligen Infrarotbereich um einen Faktor von ca. 8

größer, als im mittelwelligen Infrarotbereich. Bei einer gegebenen Temperaturdifferenz ΔT zweier Oberflächenbereiche existiert also bei einer Detektion im langwelligen Bereich eine größere Differenz der detektierbaren Strahlungsleistungen, die sich in der resultierenden Thermografiefotografie als ein Kontrast zwischen Bildbereichen darstellt.

Aus Gleichung (2.8) folgt, dass die Energie eines einzelnen Photons reziprok proportional zur Wellenlänge der Strahlung ist. Es seien zwei gleich große Oberflächenbereiche, deren Abstrahlung innerhalb eines endlichen Zeitraums untersucht werden. Die erste Oberfläche wird im mittelwelligen und die zweite im langwelligen Infrarotbereich analysiert. Wie in Abb. 2.8 (a) dargestellt, existieren zwei Temperaturen, bei denen die spektralen spezifischen Ausstrahlungen $M_\lambda(\lambda, T)$ der beiden Oberflächen in den jeweils betrachteten Wellenlängenbereichen identisch sind. Im langwelligen Infrarotbereich ist die Energie eines einzelnen Photons aufgrund der höheren Wellenlänge jedoch kleiner, als im mittelwelligen Infrarotbereich. Bei gleicher Strahlungsleistung, die von den Oberflächen emittiert wird, ergibt sich somit eine höhere Anzahl an emittierten Photonen.

Relevant für die Detektion von Infrarotstrahlung in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen ist auch der Unterschied in der Anzahl emittierter Photonen bei gleicher Temperatur. Da die spektrale spezifische Ausstrahlung eine Wellenlängenabhängigkeit aufweist, ist sie bei gleicher Temperatur in den unterschiedlichen Wellenlängenbereichen unterschiedlich groß, vgl. Plancksches Strahlungsgesetz in Abb. 2.7. Um die gesamte Anzahl an emittierten Photonen zu berechnen, wird zunächst die spektrale Photonenzahl aus dem Quotienten der spektralen Strahlungsenergie Q_λ und der Energie eines Photons $E_{P,\lambda}$ berechnet. Eine Umstellung von Gleichung (2.8) ergibt:

$$N_{P,\lambda} = \frac{Q_\lambda}{E_{P,\lambda}}. \quad (2.18)$$

Wird die Anzahl $N_{P,\lambda}$ der emittierten Photonen auf die Zeit- und Flächeneinheit bezogen, kann durch Umformung von Gleichung (2.10) und (2.11) die spektrale spezifische Ausstrahlung an Stelle der spektralen Strahlungsenergie verwendet werden:

$$\frac{d^2}{dA dt} N_{P,\lambda} = \frac{d^2}{dA dt} Q_\lambda \cdot \frac{1}{E_{P,\lambda}} = \frac{M_\lambda}{E_{P,\lambda}}. \quad (2.19)$$

Eine Integration über den Wellenlängenbereich $\lambda_1 - \lambda_2$ und Anwendung des Planckschen Strahlungsgesetzes aus Gleichung (2.15), sowie der Energiegleichung eines Photons aus Gleichung (2.8) ergibt die Anzahl an emittierten Photonen pro Zeit- und Flächeneinheit, die Photonendichte:

$$\frac{d^2}{dA dt} N_{P,\lambda_1-\lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi c_0}{\lambda^4} \frac{1}{e^{\frac{hc_0}{\lambda k T}} - 1} d\lambda. \quad (2.20)$$

In Abb. 2.9 (a) ist die Photonendichte für die eingeführten Bereiche der Infrarotstrahlung dargestellt. Sie beschreibt die gesamte in den Halbraum über der Oberfläche emittierte Anzahl an Photonen pro Fläche und pro Zeit. Wie erwartet, ist die Teilchenstromdichte der emittierten Photonen bei gleicher Temperatur T für den langwelligen Infrarotbereich deutlich höher, als für den mittelwelligen oder das nahe Infrarot. Hierbei gilt es zu betonen, dass dies nur für den betrachteten Temperaturbereich gilt. Für höhere Temperaturen von $T > 1600\text{ K}$ werden im nahen Infrarot die meisten Photonen emittiert. Für den Temperaturbereich von $0^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}$ ist die Photonendichte im langwelligen Infrarotbereich im Mittel um einen Faktor von ca. 30 größer, als im mittelwelligen Infrarotbereich. Bei gleicher Temperaturen werden also im langwelligen Infrarotbereich ca. 30-Fach mehr Photonen emittiert. Die aufsummierte emittierte Photonenzahl pro Flächeneinheit für verschiedene Integrationszeiten sind in Abb. 2.9 (b) dargestellt. Dies verdeutlicht, dass der Unterschied in der Anzahl an emittierten Photonen zwischen den jeweiligen Infrarotbereichen mit der Integrationszeit im langwelligen Infrarotbereich höher ansteigt, als im

mittelwelligen.

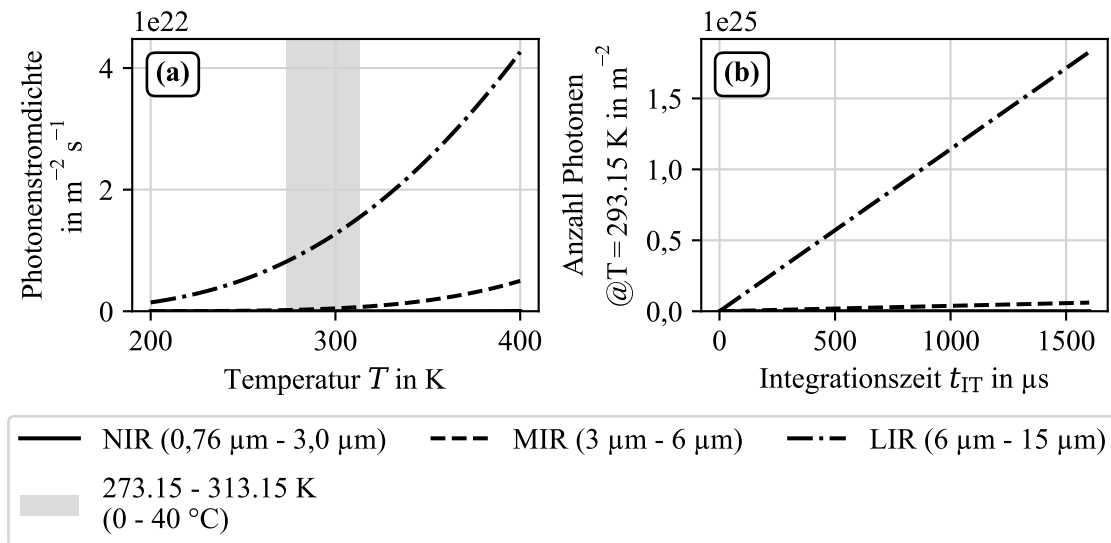


Abb. 2.9.: (a) Teilchenstromdichte der emittierten Photonen in den eingeführten Wellenlängenbereichen der Infrarotstrahlung in den gesamten Halbraum über der abstrahlenden Oberfläche. (b) Anzahl emittierter Photonen pro Fläche für verschiedene Integrationszeiten, innerhalb derer die emittierten Photonen aufaddiert werden.

Da die Oberflächentemperaturen eines Rotorblattes von WEA deutlich unterhalb von 100°C liegen, sollte für die Maximierung der Signalstärke die emittierte Strahlung im langwelligen Infrarotspektrum gemessen werden. Aufgrund der höheren spezifischen Ausstrahlung wird im Vergleich zu den anderen Infrarotbereichen eine 15-Fach höhere Energie in gleicher Zeit übertragen, aus der ein Ausgangssignal erzeugt werden kann. Wird die Quantennatur der Wärmestrahlung betrachtet, resultiert eine Detektion der Strahlung im langwelligen Infrarotbereich gegenüber den anderen Bereichen zudem in eine 30-Fach höhere Anzahl an emittierten Photonen, die detektiert werden können. Im Bezug auf die Gerätetechnik besteht damit das Potential, die Signalstärke gegenüber signalunabhängigen Rauscheinflüssen zu maximieren. Im Bezug auf die Integrationszeit gedacht, bedeutet eine Detektion der Strahlung im langwelligen Infrarotbereich, dass eine geringere Integrationszeit erforderlich ist, um die gleiche Menge an Strahlungsenergie bzw. Anzahl an Photonen zu detektieren. Dies hat besonders bei der Anwendung an sich in Bewegung befindlichen Messobjekten eine hervorgehobene Bedeutung. Für die Detektion von Strahlungsunterschieden konnte gezeigt werden, dass eine 8-Fach höhere Differenz der spezifischen Ausstrahlung pro Temperaturänderung im langwelligen Infrarotbereich genutzt werden kann, um Temperaturunterschiede zu detektieren. Es sei an dieser Stelle nochmals betont, dass die vorgestellten Unterschiede einer Detektion in den verschiedenen Wellenlängenbereichen nur für den dargestellten Temperaturbereich gelten.

Emissivität, Absorption, Reflektivität und Transmissivität

Die spektrale spezifische Ausstrahlung $M_\lambda(\lambda, T)$ eines realen Körpers mit der Temperatur T liegt immer unter der des theoretischen schwarzen Strahlers gleicher Temperatur. Das Verhältnis

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{M_\lambda(\lambda, T)}{M_{\lambda, BB}(\lambda, T)} \quad (2.21)$$

ist der spektrale hemisphärische Emissionsgrad [Bae2016].

Der Emissionsgrad ist im Allgemeinen abhängig von den Materialeigenschaften der Oberfläche. Aufgrund der verwendeten Materialien weisen die Oberflächen von Rotorblättern einen Emissionsgrad in der Größenordnung von ca. 0,8 auf [Yu2009, Che2007]. Der Emissionsgrad kann durch Umformung der Gleichung (2.21) verwendet werden, um die spektrale spezifische Ausstrahlung einer Oberfläche für eine gegebene Temperatur T und Wellenlänge λ zu berechnen. Integriert über einen Wellenlängenbereich $[\lambda_1, \lambda_2]$ ergibt sich so die gesamte spezifische Ausstrahlung der realen Oberfläche in diesem Wellenlängenbereich in den gesamten Halbraum:

$$M(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, T) \cdot M_{\lambda, BB}(\lambda, T) \, d\lambda. \quad (2.22)$$

Befindet sich ein realer Körper, bzw. Strahler, im Strahlungsgleichgewicht, so gibt er die gleiche Menge an Energie in Form von Strahlung ab, wie er sie auch durch Absorption von Strahlung aufnimmt. In diesem Fall gilt das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz, laut dem der spektrale Emissionsgrad einer Oberfläche gleich dem Absorptionsgrad α ist [Kir1860]. Der Absorptionsgrad beschreibt das Verhältnis zwischen der eintreffenden Strahlungsleistung $\Phi_{\lambda,0}$ und der absorbierten Strahlungsleistung $\Phi_{\lambda,\alpha}$. Der nicht absorbierte Strahlungsanteil wird entweder reflektiert (Reflexionsgrad ρ) oder transmittiert (Transmissionsgrad τ), also durchgelassen [Sch2004]:

$$\alpha(\lambda, T) = \frac{\Phi_{\lambda,\alpha}(\lambda, T)}{\Phi_{\lambda,0}(\lambda, T)}, \quad (2.23) \quad \rho(\lambda, T) = \frac{\Phi_{\lambda,\rho}(\lambda, T)}{\Phi_{\lambda,0}(\lambda, T)}, \quad (2.24) \quad \tau(\lambda, T) = \frac{\Phi_{\lambda,\tau}(\lambda, T)}{\Phi_{\lambda,0}(\lambda, T)}. \quad (2.25)$$

Nach dem Energieerhaltungsgesetz folgt [Sch2014b]:

$$\alpha(\lambda, T) + \rho(\lambda, T) + \tau(\lambda, T) = 1. \quad (2.26)$$

Das Reflexionsverhalten einer Rotorblattoberfläche hängt von den Materialeigenschaften der Oberflächenschicht ab. In Windkanalanwendung wird die Oberfläche für eine Reduzierung der Reflexion aus der Umgebungsstrahlung und einer Maximierung des Emissionsgrades verändert [Mon2004, Hoe2017, Ric2014, Bæk2009, Luc1990, Gar1992, Gar1994]. In der Freifeldanwendung der thermografischen Strömungsvisualisierung an WEA in Betrieb ist eine derartige Beeinflussung der Oberfläche nicht ohne viel Aufwand möglich und widerspricht der Anforderung ohne Manipulation der Oberfläche auszukommen. Einen großen Einfluss auf die gemessene Oberflächenstrahlung hat die direkte Reflexion der Sonne. Die auf der Oberfläche reflektierte Strahlung überlagert sich mit dem Signal der Oberflächentemperaturmessung und erschwert so eine Unterscheidbarkeit von geringen Temperaturunterschieden. Der Anteil der Strahlung, der von der Oberfläche emittiert wird und der Anteil der reflektierten Sonnenstrahlung kann für die verschiedenen Wellenlängenbereiche gemäß Tab. 2.1 verglichen werden. Im Vergleich zum mittellwelligen Infrarotspektrum ergibt sich eine um den Faktor 0,12 geringere Strahlungsleistung der Sonne im langwelligen Infrarotspektrum. In Kombination mit der zuvor ermittelten 15-Fach höheren emittierten Strahlungsleistung der Oberfläche in einem Temperaturbereich von $0^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}$ ergibt sich daraus für die Anwendung an WEA in Betrieb ein deutlicher Vorteil bei der Verwendung eines Infrarotsystems, dass im langwelligen Infrarotbereich sensitiv ist.

Strahlungstransport

Bei der Messung der elektromagnetischen Strahlung, die eine Oberfläche mit der Temperatur T_{obj} abgibt, müssen alle Strahlungsanteile berücksichtigt werden, die durch das Messgerät aufgenommen werden. Abb. 2.10 stellt die verschiedenen Strahlungsanteile an einer schematisch dargestell-

ten Messung der Oberflächenstrahlung eines Objektes in der Atmosphäre dar und werden entsprechend dem Modell in [Vol2018, Ast2012] erläutert. Die temperaturabhängige Strahlungsleistung, die vom Messobjekt abgestrahlt wird, ergibt sich aus dem Emissionsgrad ε_{obj} der Objektoberfläche und der Strahlungsleistung $\Phi_{BB}(T_{\text{obj}})$ des schwarzen Strahlers bei gleicher Temperatur: $\Phi_{\text{obj}}(T_{\text{obj}}) = \varepsilon_{\text{obj}} \cdot \Phi_{BB}(T_{\text{obj}})$. Wird angenommen, dass alle sich in der Umgebung befindlichen Objekte eine gleichmäßige Temperatur T_U haben, so wirkt deren Strahlungsleistung $\Phi_U(T_U)$ auf das Messobjekt und wird mit dem Reflexionsgrad ρ_{obj} reflektiert. Da die meisten Objekte keine Strahlung im infraroten Spektralbereich durchlassen, wird der Transmissionsgrad $\tau_{\text{obj}} = 0$ angenommen. Daraus folgt aus Gleichung (2.26) für den Reflexionsgrad des Objektes: $\rho_{\text{obj}} = 1 - \varepsilon_{\text{obj}}$ und die aus der Umgebung am Objekt reflektierte Strahlungsleistung ist $(1 - \varepsilon_{\text{obj}}) \cdot \Phi_U(T_U)$. Auf dem Weg zur Infrarotkamera müssen alle Strahlungsanteile die Atmosphäre durchqueren. In der Atmosphäre enthaltene Partikel und Moleküle absorbieren einen Teil der Strahlung und reduzieren die an der Infrarotkamera ankommende Strahlungsleistung um den Faktor des Transmissionsgrades der Atmosphäre τ_{atm} . Unter der Annahme, dass der durchquerte Teil der Atmosphäre die gleichmäßige Temperatur T_{atm} hat und einen vernachlässigbaren Reflexionsgrad aufweist, emittiert die Atmosphäre selbst mit der Strahlungsleistung $(1 - \tau_{\text{atm}}) \cdot \Phi_{\text{atm}}(T_{\text{atm}})$. Die Gesamtstrahlungsleistung, die auf das Messgerät wirkt ergibt sich folglich zu:

$$\Phi_{\text{detekt}} = \tau_{\text{atm}} \varepsilon_{\text{obj}} \cdot \Phi_{BB}(T_{\text{obj}}) + \tau_{\text{atm}} (1 - \varepsilon_{\text{obj}}) \cdot \Phi_U(T_U) + (1 - \tau_{\text{atm}}) \cdot \Phi_{\text{atm}}(T_{\text{atm}}). \quad (2.27)$$

Anhand der einzelnen Strahlenanteile, die auf die Infrarotkamera treffen, ist zu erkennen, dass der Transmissionsgrad τ_{atm} der Atmosphäre einen wesentlichen Einfluss auf die detektierte Strahlungsleistung Φ_{detekt} hat.

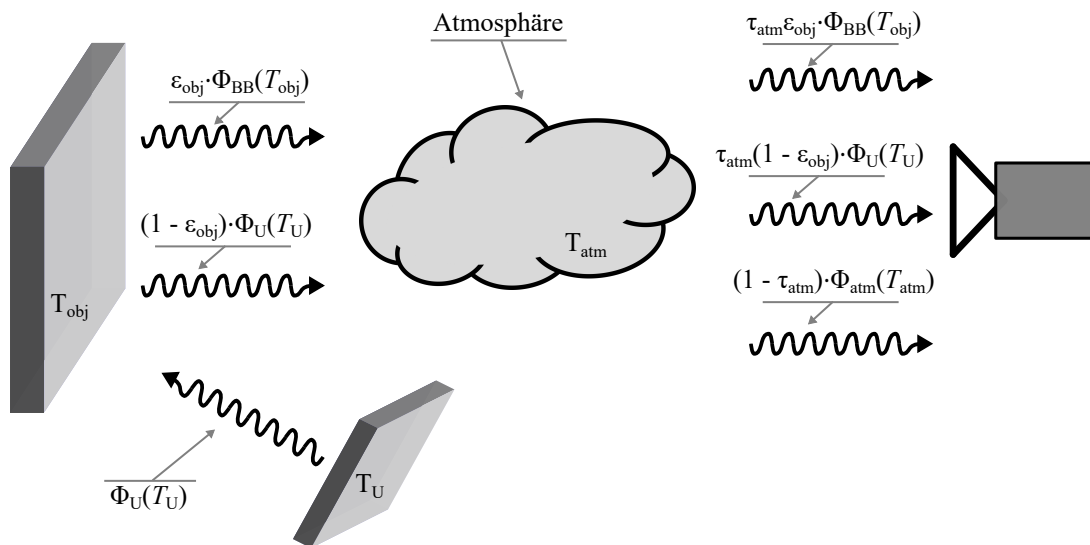


Abb. 2.10.: Einfluss der Übertragungsstrecke und Umgebung durch Emissivität, Transmissivität und Absorption auf die gesamte am Messgerät eintreffende Strahlungsleistung bei der Infrarotthermografie, nach [Vol2018, Ast2012]

Eine längere Strecke zwischen abstrahlender Objektoberfläche und Messgerät bedeutet eine größere Menge an Atomen in der Atmosphäre, durch die sich die Strahlungsleistung aufgrund von Absorption reduziert. Für den Spektralbereich der Infrarotstrahlung ist hierbei besonders das in der Luft enthaltene Wasser (H_2O) in Form von Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid (CO_2) zu nennen [Bae2016]. Abb. 2.11 zeigt den Transmissionsgrad τ_{atm} der Atmosphäre über der Wellenlänge

λ für eine Übertragungstrecke von $d = 10\text{m}$ und $d = 100\text{m}$. Die Werte wurden von [Dol2018a] nach einem in [Gau1994] vorgestellten Modell für eine Umgebungstemperatur von $T_U = 20^\circ\text{C}$ und eine Luftfeuchtigkeit von 75% berechnet. Die grau hinterlegten Bereiche sind die sogenannten atmosphärischen Fenster, spektrale Bereiche in denen sich eine Messung der Infrarot-Strahlung aufgrund des hohen Transmissionsgrads der Atmosphäre lohnt.

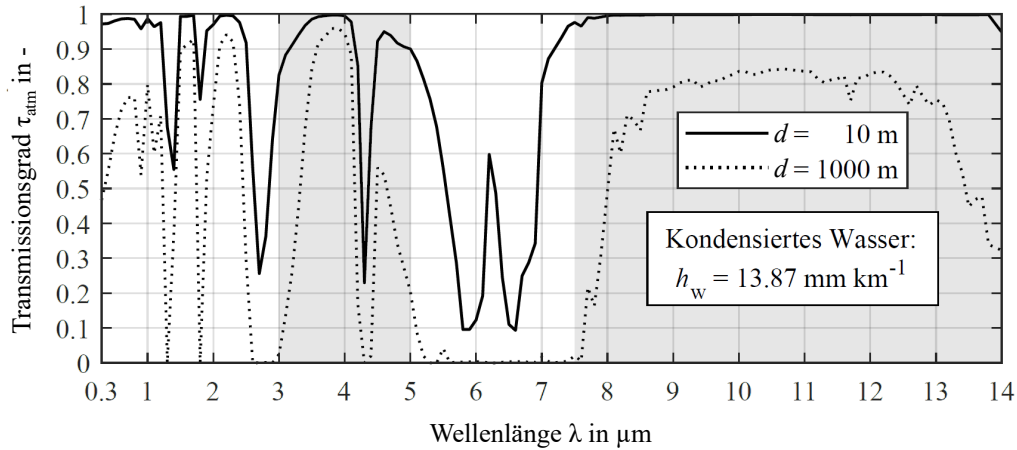


Abb. 2.11.: Transmissionsgrad τ_{atm} der Atmosphäre für zwei Distanzen d bei einer Umgebungstemperatur von $T_U = 20^\circ\text{C} = 293,15\text{K}$. Berechnet nach einem vereinfachten Modell von [Gau1994], nach [Dol2018a]. Die grau markierten Bereiche stellen die sogenannten atmosphärischen Fenster dar, in denen sich eine Detektion der Infrarotstrahlung aufgrund hoher Transmission und geringer Absorption der Atmosphäre eignet.

Aus der Betrachtung der atmosphärischen Fenster ergibt sich ein klarer Vorteil der Detektion der Wärmestrahlung im langwelligen Infrarotbereich gegenüber dem mittel- oder kurzwelligem. Ein Vergleich der in Tab. 2.1 aufgelisteten Wellenlängenbereiche mit Abb. 2.11 verdeutlicht, dass bei einer Detektion im langwelligen Infrarotbereich ($6\text{ }\mu\text{m} - 15\text{ }\mu\text{m}$) ein größerer Anteil der detektierten Strahlung in Wellenlängenbereichen mit hohem Transmissionsgrad betrachtet wird, als im mittelwelligen ($0,76\text{ }\mu\text{m} - 3\text{ }\mu\text{m}$) oder kurzwelligen. Dieser Effekt ist noch größer, wenn der Wellenlängenbereich in dem das Infrarotsystem sensitiv ist noch enger gefasst wird und dabei einer möglichst große Überlappung mit dem atmosphärischen Fenster aufweist. Genau dies trifft für das im praktischen Teil dieser Arbeit verwendete Infrarotsystem bei einer Detektion der Infrarotstrahlung innerhalb des langwelligen Spektrums zu, vgl. Abschnitt 2.3.2. Da bei der Anwendung der thermografischen Strömungsvisualisierung an WEA in Betrieb die atmosphärische Wegstrecke nicht vernachlässigt werden kann, sollte für eine Minimierung der Verlustleistung der übertragenden Strahlung der gemessenen Oberfläche eine Detektion im langwelligen Infrarotspektrum angestrebt werden.

Ein weiterer Grund für die Wahl des langwelligen Infrarotspektrums für die thermografische Strömungsvisualisierung bezieht sich auf die Unterscheidung von Oberflächentemperaturen. Aus dem Energieerhaltungssatz in Gleichung (2.26) und dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz folgt, dass die Atmosphäre zum gleichen Teil Strahlung emittiert, wie sie absorbiert. Die Emission der Atmosphäre bezieht sich jedoch auf die Temperatur der Atmosphäre, nicht der Oberfläche, die betrachtet wird. Aufgrund der Absorption der Atmosphäre wird die aus einer Temperaturdifferenz auf der Oberfläche entstehende Energiedifferenz der Wärmestrahlung reduziert. Das Maß der Energiedifferenz oder Differenz an Photonen, welches das Infrarotsystem erreicht, wird folglich durch die Absorption der Atmosphäre reduziert. Daher sollte die Absorption der Atmosphäre für eine maximale Detektion von Strahlungsdifferenzen von Oberflächenbereichen unterschied-

licher Temperatur minimiert werden. Aus dem Zusammenhang $\alpha_{\text{atm}} = 1 - \tau_{\text{atm}}$ folgt, dass die Transmission maximiert werden sollte. Dies ist in Übereinstimmung mit denen im vorherigen Absatz genannten Vorteile einer Detektion der Infrarotstrahlung im langwelligen Spektrum bei der thermografischen Strömungsvisualisierung.

2.3.2. Hardware

Zur Detektion von elektromagnetischer Strahlung sind Strahlungsempfänger (Detektoren) erforderlich. Infrarot-Detektoren erzeugen aus einer einfallenden elektromagnetischen Strahlung im Infrarotbereich ein elektrisches Ausgangssignal [Sch2004]. Bei thermischen Empfängern trifft die absorbierte Strahlungsleistung auf ein Sensorelement und ändert damit dessen Temperatur. Die Temperaturänderung wird anschließend auf verschiedene Arten in ein elektrisches Signal umgewandelt, das sich proportional zur absorbierten Strahlungsleistung verhält. Thermische Empfänger sind wellenlängenunabhängig [Sch2004, Sch2014b]. Verschiedene Bauarten von thermischen Empfängern verwenden unterschiedliche physikalische Mechanismen um die Temperaturänderung in ein elektrisches Signal umzuwandeln, das als Ausgangssignal dient. Bolometer nutzen die Änderung der elektrischen Leitfähigkeit eines ohmschen Widerstandes bei einer Temperaturänderung. Thermoelektrische Sensoren basieren auf dem thermoelektrischen bzw. Seebeck-Effekt. Dabei entsteht eine temperaturabhängige Spannung zwischen zwei unterschiedlichen elektrischen Leitern. Pyroelektrische Sensoren nutzen die spontane Polarisierung in einem Kristall aufgrund von Temperaturänderung. An der Außenfläche des Kristalles kommt es zu einer Ladungsbildung, die als Ausgangssignal verwendet werden kann.

Im Zentrum dieser Arbeit stehen sogenannten Photonendetektoren, welche die Energie der am Detektor ankommenden Photonen nutzen, um die Beweglichkeit von Elektronen im Leitermaterial zu erhöhen, indem sie ins Leitungsband angehoben werden. Im Gegensatz zu einer Temperaturänderung des Detektorelements aufgrund absorbierte Strahlungsleistung und der Umwandlung in ein Spannungssignal, wird bei Photonendetektoren die Wechselwirkung von Photonen mit freien Ladungsträgern in Halbleitermaterialien ausgenutzt, um ein Signal zu erzeugen. Dieser innerer Photoeffekt genannte Prozess ändert die Leitfähigkeit des Detektorelements oder erzeugt eine Spannung [Sch2014b, Sch2004]. Trifft ein Photon mit der Energie, die größer als der Grenzwert ist, auf ein Detektorelement, wird ein Elektron aus dem Valenzband in das Leitungsband angehoben. Um die Energielücke zwischen den Bändern und damit den zu erreichenden Grenzwert zu verringern, wird durch Dotierung des Halbleitermaterials bei Störstellenhalbleitern das Valenzbandniveau angehoben oder das Leitungsbandniveau abgesenkt [Sch2014b]. Dadurch wird es ermöglicht, Halbleitermaterialien wie Silizium (Si) und Germanium (Ge) für die Detektion von energiearmer Infrarotstrahlung zu verwenden [Sch2004]. In beiden Fällen steigt die Leitfähigkeit des Halbleiters aufgrund der frei beweglichen Elektronen bzw. „Löchern“ im Leitungs- bzw. Valenzband [Vol2018]. Im Vergleich zu thermischen Empfängern sind Photonendetektoren grundsätzlich als schnell, empfindlich und rauscharm anzusehen [Sch2004]. Für den optimalen Betrieb und Rauschunterdrückung werden die Detektoren auf eine Temperatur $< 77\text{ K}$ gekühlt [Vol2018]. Man unterscheidet zwischen folgenden Hauptarten von Photonendetektoren:

Bei einem **Photoleiter** oder **Photowiderstand** wird ein Strom durch das Detektorelement geleitet, an dem die Signalspannung U_S abfällt. Eine Änderung der Leitfähigkeit des Photowiderstandes aufgrund des Photoeffekts verändert die Signalspannung, die als Ausgangssignal weiterverarbeitet werden kann [Mal2001]. Die Empfindlichkeit von Photowiderständen steigt mit höheren Versorgungsspannungen oder -strömen. Dies erhöht jedoch den Kühlaufwand, um Rauschanteile, speziell das $1/f$ -Rauschen, zu minimieren. Im Vergleich zu anderen Detektortypen, die den Photoeffekt ausnutzen, haben Photowiderstände zudem eine relativ hohe Verzögerungszeit, weshalb sich Photowiderstände für die Verwendung in Infrarotkameras mit hoher Bildrate nicht

eignen [Vol2018].

Photodioden besitzen einen p-n-Übergang, an dem Ladungsträger nachgewiesen werden können, wenn Photonen auf die Diode auftreffen. Aufgrund von Diffusionsvorgängen wandern die Elektronen in das n-Gebiet und die Defektelektronen in das p-Gebiet [Sch2004]. Es bildet sich ein Potential aus, welches einen fließenden Photostrom zur Folge hat, der proportional zur absorbierten Strahlungsleistung ist [Ber2014, Sch2014b]. Ein typisches Halbleitermaterial für den LIR-Bereich ist Quecksilber-Cadmium-Tellurid (engl.: mercury-cadmium-telluride, MCT). Hierbei muss auf eine sehr genaue Herstellung der Tellurid-Verbindung geachtet werden, da der Grenzwert der zu detektierenden Wellenlänge λ_G von dem Verhältnis der beiden Materialien abhängt. MCT kann auch für den MIR-Bereich verwendet werden [Vol2016], wengleich dort häufiger auf Indiumantimonid (engl.: indium antimonide, InSb) zurückgegriffen wird, da dessen Herstellung deutlich einfacher ist [Vol2018]. Aufgrund von geringen Reaktionszeiten von Photodioden, können sie für Bildraten von bis zu 100 kHz verwendet werden [Vol2018].

Schottky-Barrieren-Detektoren bestehen aus mehreren Halbleiter-Metall-Übergängen, an denen der Photoeffekt entsteht. Ein typisches IR-Material ist ein Verbund von PtSi und p-Si. Es entstehen Defektelektronen im Halbleitermaterial anstatt an einem n-p-Übergang wie bei Photodioden [Sch2004].

In **Quanten-Topf-Photodioden** werden verschiedene Halbleitermaterialien mit unterschiedlichen Bandlücken in einer Matrixstruktur verwendet. Die heterogene Verteilung der Bandlücken sorgt an den Materialübergängen für eine räumliche Varianz bei den Bandkanten. Daraus entstehen abwechselnde Quantentöpfe und Barrieren für die Elektronen und Defektelektronen. In den Quantentöpfen bilden sich sogenannte Teilbänder. Absorbierte Photonen können Elektronen vom untersten Niveau in das Teilband anregen. Dabei ist die dafür erforderliche Energiemenge deutlich geringer, als die Bandlücke der jeweiligen Halbleitermaterialien [Sch2014b].

Aus der Bedingung, dass die Energie eines einzelnen auf den Detektor treffendes Photons den Grenzwert ΔE übersteigen muss, vgl. 2.3.2, folgt, dass alle Photonendetektoren einen oberen Grenzwert λ_G für die Wellenlänge der detektierbaren Strahlung besitzen [Vol2018]:

$$\begin{aligned} \Delta E < E_{P,\lambda} &= \frac{h \cdot c_0}{\lambda} \\ \iff \lambda < \frac{h \cdot c_0}{\Delta E} &= \lambda_G. \end{aligned} \tag{2.28}$$

Ein Photonendetektor ist also nur für eine Wellenlänge $\lambda < \lambda_G$ sensitiv. Die Strahlungsempfindlichkeit von Photonendetektoren ist zudem proportional zur Wellenlänge [Wal2001]. Deshalb besitzen Photonendetektoren auch eine untere Grenzwellenlänge die durch geeignete Filterung vor dem Detektor fest vorgegeben wird. Die untere Grenzwellenlänge ist meist durch eine relative spektrale Empfindlichkeit von $> 50\%$ der maximalen Empfindlichkeit definiert [Ber2014]. Durch eine geeignete Wahl des Halbleitermaterials werden die Wellenlängenbereiche so gewählt, dass die atmosphärischen Fenster, vgl. Abschnitt 2.3.1, gut ausgenutzt werden, um einen Verlust der Strahlungsleistung durch den Transportweg zu minimieren.

Den Spannungsbereich am Ausgang eines Detektorelements, in dem die Ausgangsspannung proportional zur einfallenden Strahlungsleistung ist, nennt man Dynamikbereich [Wal2001]. Die obere Grenze wird durch die Ladekapazität des Kondensators am Ausgang des Detektorelements bestimmt. aufgrund der unterschiedlichen Anzahl an emittierten Photonen in den Wellenlängenbereichen wird die ideale Integrationszeit so ausgelegt, dass die Ladekapazität bei einer Nenn-

temperatur (z.B. 30 °C) zu 80 % ausgenutzt wird. aufgrund des unterschiedlichen Anstiegs des funktionalen Zusammenhangs aus der Anzahl an emittierten bzw. detektierten Photonen und der Temperatur einer Oberfläche, vgl. Abb. 2.9, bewirkt einer Temperaturänderung der Oberfläche einen höheren Rückgang der Kondensatorauslastung relativ zum Maximalwert, wenn Strahlung im mittelwelligen Infrarotbereich detektiert wird. Für den langwelligen Infrarotbereich können folglich niedrigere Oberflächentemperaturen bei ausreichend hoher Auslastung der Ausleseeinheit detektiert werden. Das Ausgangssignal eines Detektorelements wird häufig über einen A/D-Wandler in ein digitales Signal umgewandelt. Anforderungen an den A/D-Wandler sind hierbei eine möglichst hohe Bitzahl und eine schnelle Umwandlung. Der Bitwert 1 stellt dabei die untere und der höchste Bitwert die obere Grenze des Dynamikbereichs dar. Bei einem 16-Bit-Digitalwert beträgt der Dynamikbereich also $2^{16} : 1 = 65536 : 1$.

Eine durch den Hersteller hinterlegte Kalibrierung weist dem Signalwert eines jeden Detektorelements einen Temperaturwert zu. Dazu werden verschiedene Temperaturkurven an einem schwarzen Strahler mit bekannter Temperatur gemessen und die Zuweisung von Signal zu Temperaturwert als Kalibrierung hinterlegt [Vol2018]. Für eine absolute Temperaturmessung sind daher zusätzliche Informationen erforderlich, um die aus den Spannungssignalen erhaltenen Temperaturen zu korrigieren. Dies beinhaltet im Wesentlichen den objektabhängigen Emissionsgrad, den Transmissionsgrad der Übertragungstrecke und die aus der Umgebungstemperatur auf der Oberfläche reflektierende Strahlung, vgl. Abschnitt 2.3.1.

Die Anordnung mehrerer Detektorelemente ermöglicht die bildgebende Strahlungsmessung. So genannte Infrarotkameras können in ihrer Bauart im Wesentlichen durch die Anordnung der einzelnen bzw. mehreren Detektorelemente und der Art der Bilderfassung unterschieden werden [Sch2014b, Ber2014]. Moderne Fertigungstechniken erlauben eine Anordnung vieler Detektorelemente in einer Matrixstruktur. Sogenannte Detektorarrays (engl.: focal plane arrays, FPA) bestehen aus mehreren Zeilen und Spalten von Einzelelementdetektoren mit Kantenlängen in der Größenordnung von 10 μm . Die Arrays haben dabei eine Kantenlänge von ca. 20 mm - 30 mm. Die einzelnen Signale der rasterförmig angeordneten Detektorelemente eines FPA werden mit Auslese-Multiplexer-Schaltkreisen elektronisch ausgelesen und an die digitale Messwert- und Bildverarbeitungselektronik weiter gegeben [Ber2014]. Moderne FPA-Kamerasysteme mit Photonendetektoren erreichen Megapixel-Auflösungen und Aufnahmefrequenzen von >100 Hz, sowie Integrationszeiten von 1 μs [Sch2014b].

Verwendete Kamerasysteme

Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei Infrarotkamerasysteme bzgl. ihrer Eignung für die thermografische Strömungsvisualisierung mit Hinsicht auf die Unterscheidbarkeit des laminaren und turbulenten Strömungsbereichs in der oberflächennahen Grenzschicht an Rotorblättern von WEA untersucht. Im Vordergrund stehen hierbei die zuvor motivierten Vorteile einer Detektion der Wärmestrahlung im langwelligen Infrarotbereich bei der Anwendung der für die thermografische Strömungsvisualisierung typischen Temperaturbereich von 0 °C – 40 °C und hohen Messdistanzen in typischer Atmosphäre.

Die in dieser Arbeit verwendeten Infrarotkameras des Herstellers *InfraTec GmbH* des Types *ImageIR 8300* und *ImageIR 8800* sind Photonendetektoren mit Photodioden. Die verwendeten Halbleitermaterialien sind jeweils InSb und MCT und sind für unterschiedliche Wellenlängenbereichen sensitiv, die der Tabelle 2.2 entnommen werden können. Für einen einfacheren Lesefluss, werden die beiden Infrarotkameras folgend als „mittelwellige“ (*ImageIR 8300*) und „langwellige“ (*ImageIR 8800*) Infrarotkamera bezeichnet. Weitere Informationen der Kamerasysteme, die sich nicht auf den theoretischen Teil der Wärmestrahlung beziehen sind in Abschnitt 2.4.3 aufgeführt.

Tab. 2.2.: Herstellerangaben der beiden in dieser Arbeit verwendeten Infrarotkamarasysteme mit unterschiedlichen Detektor-Halbleitermaterialien des Herstellers *InfraTec GmbH*. Beide Systeme sind in unterschiedlichen Spektralbereichen sensitiv: *ImageIR 8300* im mittelwelligen (MIR) und *ImageIR 8800* im langwelligen (LIR) Infrarotbereich.

Typenbezeichnung	Halbleitermaterial	Wellenlängenbereich $\lambda_1 - \lambda_2$ in μm	Art der Infrarotstrahlung
ImageIR 8300	InSb	1,5 - 5,7	MIR
ImageIR 8800	MCT	7,7 - 10,2	LIR

2.3.3. Temperaturrauschen

Da das aus der absorbierten Strahlungsleistung erzeugte Ausgangssignal durch geeignete Verstärkung beliebig erhöht werden kann, steckt in der Höhe des Signals keine Aussage über die Qualität der finalen Bildgebung. Erst wenn das Signal mit dem Signalrauschen verglichen wird, entsteht eine Aussage über die Qualität der Detektion. Das Rauschen eines gemessenen Temperaturwertes T_i in einer Thermografieaufnahme teilt sich in das zeitliche Detektorrauschen $\sigma_{T_i, \text{Detektor}}$ eines einzelnen Detektorelements i und das räumliche Bildrauschen $\sigma_{T, \text{Bild}}$ auf. Das zeitliche Detektorrauschen bezeichnet dabei die zeitliche Fluktuation eines Signalwertes und das räumliche Bildrauschen die Fluktuation der Signalwerte der verschiedenen Detektorelemente bei jeweils konstanter und homogener Strahlungsleistung, die auf den Detektor wirkt. Das resultierende Gesamtrauschen ergibt sich zu:

$$\sigma_{T_i} = \sqrt{\sigma_{T_i, \text{Detektor}}^2 + \sigma_{T, \text{Bild}}^2} \quad (2.29)$$

Detektorrauschen

Verschiedene zufällig auftretende Einzelvorgänge tragen zum Detektorrauschen bei und werden folgend kurz aufgeführt [Sch2014b, Bud2011, Hey1990]:

Thermisches Rauschen (Johnson-, Nyquist-Rauschen) hängt von dem stochastischen Ladungstransport innerhalb eines elektrischen Widerstandes ab und kann durch geeignete Kühlung des Detektorelements reduziert werden. Das thermische Rauschen beschränkt sich auf thermische Sensoren und taucht in Photonendetektoren nicht auf.

Generations-Rekombinationsrauschen (G&R-Rauschen) ist auf den stochastischen Prozess zufälliger Wechsel von Elektronen zwischen dem Valenz- und Leitungsband in Halbleitermaterialien zurückzuführen, durch welchen sich die Leitfähigkeit bzw. der Stromfluss verändert. Es ist der Haupteinfluss auf den Dunkelstrom. Ein fließender Strom im Halbleitermaterial, ohne dass eine Strahlung auf den Detektor fällt. Das Generations-Rekombinationsrauschen wird auch als Stromrauschen bezeichnet.

1/f-Rauschen existiert als Überlagerung von verschiedenen, nicht endgültig erklärten Effekten in Halbleitermaterialien, die mit sinkender Frequenz wachsen.

Photonenschrottrauschen existiert durch den stochastischen Prozess emittierter Photonen einer Oberfläche mit gegebener Temperatur. Die Abstrahlrate der Photonen ist hierbei nicht konstant, sondern folgt einer Poission-Verteilung und bestimmt so die physikalische Grenze der Nach-

weisbarkeit der Strahlung. Ein idealer Photonendetektor kann den Rauschanteil aus Photonen-schrotrauschen nicht unterschreiten. Die Höhe des Rauschens hängt mit $\sqrt{\bar{N}_P}$ von der mittleren Anzahl \bar{N}_P der detektierten Photonen ab. Einfluss auf die Anzahl der von einem Detektorelement detektierten Photonen hat neben der Objekt- und Hintergrundtemperatur die Bandbreite der detektierten Strahlung und der Öffnungswinkel der Kameraoptik. Die Schwankungen im Photonstrom wirken sich direkt auf die im Halbleitermaterial entstehenden Schwankungen des Signalstroms aus.

Die für Photonendetektoren mit Photodioden dominanten Rauscheffekte sind das Photonen-schrotrauschen, das Generations-Rekombinationsrauschen und das $1/f$ -Rauschen. Nach dem Detektorausgang überlagert sich zusätzlich das Verstärkerrauschen bzw. das Ausleserauschen. Das Generations-Rekombinationsrauschen ist die wesentliche Ursache des Dunkelstroms im Detektor, ein Stromfluss der entsteht, obwohl keine Strahlung auf den Detektor trifft. Der Dunkelstrom entsteht durch Störstellen und Unreinheiten im Halbleitermaterial und hängt stark von dem verwendeten Material und der inneren Struktur des Halbleiters ab. Er lässt sich nur durch technische Maßnahmen reduzieren. Das $1/f$ -Rauschen lässt sich hingegen nicht kontrollieren und lässt sich nicht restlos ergründen. Das Ausleserauschen ist größtenteils signalunabhängig, weshalb höhere Signalstärken ein besseres SNR bezogen auf das Ausleserauschen bewirken. Daher soll eine möglichst hohe Auslastung der Auslesetechnik durch die Menge an detektierter Strahlung angestrebt werden. Der wesentliche signalabhängige Einfluss auf das Temperaturrauschen eines Detektorelements ist das Photonen-schrotrauschen, weshalb es in Abschnitt 2.3.3 näher betrachtet und für verschiedene Wellenlängenbereiche verglichen wird.

Bildrauschen

Das räumliche Rauschen oder auch Bildrauschen $\sigma_{T,\text{Bild}}$ beschreibt die Inhomogenität der einzelnen Ausgangssignale der Detektorelemente bei gleichmäßiger eintreffender Strahlungsleistung. Dies ist auf Unterschiede in der Strahlungsempfindlichkeit der einzelnen Elemente und nachgestellten Elektronik zurückzuführen [Wal2001]. Die Inhomogenität der einzelnen Detektorelemente kann über eine Inhomogenitäts-Korrektur (engl.: non-uniformity correction, NUC) durch einen Offset der auf das Detektorsignal angewandt wird, minimiert werden. Hierzu wird eine Referenzfläche mit gleichmäßiger Temperaturverteilung und einer Emissivität nahe $\varepsilon = 1$ vor den Detektor positioniert und die Abweichungen der Detektorelemente zum mittleren gemessenen Wert gespeichert. Die Abweichungen werden in verschiedenen Korrekturstrategien für lineare oder auch quadratische Korrekturfunktionen verwendet [Ber2014, Bud2011]. Eine aufwändige quadratische Korrektur benötigt dabei die Messung bei verschiedenen Temperaturen der Referenzfläche und wird meist durch den Hersteller vorgenommen und in einer Kalibrierung hinterlegt, sodass eine lineare Korrektur bei nur einer Temperatur durch den Benutzer während der Verwendung der Infrarotkamera meist ausreicht [Vol2018]. Eine experimentelle Untersuchung des verbleibenden Bildrauschens nach der NUC und der Anteil am Gesamtrauschen wird in Abschnitt 3.1.1 durchgeführt.

Rauschäquivalente Temperaturdifferenz

In der Praxis könnten die verschiedenen Rauschanteile nur schwer oder gar nicht abgeschätzt werden, da relevante Herstellerangaben über die Infrarotkameras nicht vorhanden sind und Ausgangsspannungen der Detektorelemente nicht direkt abgegriffen werden können. Als Gütemaß wird daher das zeitliche Detektorrauschen als rauschäquivalente Temperaturdifferenz (engl.: noise equivalent temperature difference, NETD) angegeben. Das NETD gibt die Temperaturdifferenz ΔT einer Oberfläche an, die eine Änderung des Ausgangssignals T_i eines Detektorele-

ments i bewirkt, welche innerhalb der Rauschamplitude liegt und damit ein $(\text{SNR})_{T_i} = 1$ erzeugt [Bud2011, Wal2001]. Eine andere Beschreibung ist die niedrigste Temperaturdifferenz, welche unter Berücksichtigung des Detektorrauschens eine Signaländerung des Detektorelements mit $(\text{SNR})_{T_i} \geq 1$ bewirkt.

Tab. 2.3.: Herstellerangaben zum NETD und optimaler Integrationszeit der beiden in dieser Arbeit verwendeten Infrarotkamarasysteme.

Typen- bezeichnung	NETD @ 30 °C in K	Optimale Integrationszeit @ 30 °C in μs
ImageIR 8300	< 0,025	1600
ImageIR 8800	< 0,025	449

Die Herstellerangaben beider Infrarotkamarasysteme für das NETD bei einer Objekttemperatur von 30 °C ist < 0,025 K, vgl. Tab. 2.3. Hierbei ist zu beachten, dass hierbei unterschiedliche Integrationszeiten zum Einsatz kommen. Laut Herstellerangaben beträgt eine bzgl. der Ausnutzung der Ladungsspeicherkapazität der Ausleseschaltungen optimale Integrationszeit bei 30 °C für die mittelwellige Infrarotkamera 1600 μs und für die langwellige Infrarotkamera 449 μs . Da es sich bei der thermografischen Strömungsvisualisierung an WEA in Betrieb um eine Messung an sich bewegenden Objekten handelt, spielt die Integrationszeit eine besondere Bedeutung bei der Bildgebung, indem sie einen maßgeblichen Einfluss auf die Bewegungsunschärfe hat. So stellt sowohl eine bessere Temperaturauflösung in Form eines geringeren NETD bei gleicher Integrationszeit, als auch eine geringere Integrationszeit bei gleichem NETD einen Vorteil da. Eine experimentelle Untersuchung des Detektorrauschens, sowie ein Vergleich der Bewegungsunschärfen bei optimalen Integrationszeiten für die beiden eingeführten Infrarotkamarasysteme werden in Abschnitt 3.1 durchgeführt.

Einfluss des Photonenschrotrauschens

Im folgenden werden der Einfluss des Photonenschrotrauschens auf das Gesamtrauschen und die Unterschiede der Wellenlängenbereiche der beiden verwendeten Infrarotkameras im Bezug auf das zu erwartende Photonenschrotrauschen untersucht. Viele Rauscheinflüsse eines Detektorelements sind geräteabhängig und können durch geeignete technische Verfahren minimiert werden. Der Rauscheinfluss des Photonenschrotrauschens hingegen hängt mit der zu detektierenden Strahlung selbst zusammen und lässt sich daher nicht durch technische Maßnahmen reduzieren. Somit bildet das Photonenschrotrauschen die theoretisch untere Grenze des Temperaturrauschens bei Photonendetektoren.

Sowohl der elektrische Stromfluss in einem Leiter, als auch der Strahlenfluss einer elektromagnetischen Strahlung weisen eine Teilchennatur aufgrund einzelner Elektronen bzw. Photonen auf. In beiden Fällen weist der Fluss gewisse Fluktuation auf, die als Poisson-Verteilung angenommen werden können [Rei2012, Sei2007, Bud2011]. Die Varianz $\text{Var}(N)$ der Anzahl an geladenen Teilchen N pro Zeitraum t kann folglich als mittlere Anzahl an Teilchen \bar{N} über mehrere Zeiträume angenommen werden:

$$\sigma_N^2 = \text{Var}(N) = \bar{N}. \quad (2.30)$$

Wird die Anzahl an Teilchen N als Signal aufgefasst, ergibt sich das SNR der Teilchenzählung zu

$$(\text{SNR}) = \frac{N}{\sigma_N} = \sqrt{\bar{N}} \quad (2.31)$$

und kann daher mit der Anzahl gezählter Teilchen pro Zeitraum beliebig erhöht werden [Wal2001].

Photonendetektoren nutzen die Energie der im Strahlungsfluss vorhandenen Photonen, um einen Elektronenfluss im Halbleitermaterial zu erzeugen. Der so erzeugte Signalstrom ist daher proportional zur Anzahl der auf den Detektor treffenden Photonen. Somit kann das Photonenschrotrauschen auch als Schrotrauschen des Elektronenflusses im Halbleitermaterial interpretiert werden. Der Zusammenhang zwischen der Fluktuation der Photonen und der Elektronen besteht in der Quantenwirkungsgrad, also dem Vermögen des Detektors ein ankommendes Photon zu nutzen, um ein fließendes Elektron im Leitermaterial entstehen zu lassen. Ist die Quantenwirkungsgrad ausreichend hoch ($\eta > 0,8$) [Wal2001], kann das Photonenschrotrauschen und das Schrotrauschen im Leitermaterial als nahezu identisch angesehen werden. Für die folgenden Abschätzungen wird eine Quantenwirkungsgrad von $\eta = 1$ angenommen. Der aus der Fluktuation des Photonenstrom resultierenden Rauschanteil eines gemessenen Temperaturwertes in der Thermografieaufnahme kann anhand der Anzahl an detektierten Photonen abgeschätzt werden. Die Berechnung der Anzahl an detektierten Photonen für die beiden eingeführten Infrarotsysteme in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen ist in Anhang A zu finden.

Für die Abschätzung der mittleren Anzahl der durch ein Detektorelement detektierten Photonen werden die aus einer typischen Anwendung der thermografischen Strömungsvisualisierung an sich in Betrieb befindlichen WEA verwendeten Messparameter angewandt. Es wird ein Messabstand von 100m und ein objektivseitiger Öffnungswinkel $\omega = 1 \cdot 10^{-3}$ rad angenommen. Die von einem Detektorelement betrachtete Fläche auf der Rotorblattoberfläche ist $\Delta A = 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$.

Während die Kameraoptik der beiden Infrarotkamarasysteme identisch ist, unterscheiden sich beide Systeme neben dem Wellenlängenspektrum in der vom Hersteller als optimal angegebene Integrationszeit. Diese beträgt für die langwellige Infrarotkamera mit 449 μs nur ca. $\frac{1}{3}$ der Integrationszeit der mittelwelligen Kamera mit 1600 μs . Für einen direkten Vergleich gemäß der optimalen Verwendung der Systeme wird die Anzahl an detektierten Photonen unter Berücksichtigung der jeweiligen Integrationszeit untersucht. In Abb. 2.12 (a) ist die mittlere Anzahl der detektierten Photonen \bar{N}_P über die Temperatur T aufgetragen. aufgrund der deutlich höheren Anzahl an emittierten Photonen im langwelligen Infrarotbereich, vgl. Abschnitt 2.3.1, werden durch die langwellige Infrarotkamera bei einer mittleren Temperatur von 303,15K = 30°C trotz geringerer Integrationszeit ca. Faktor 3 mal mehr Photonen detektiert, als von der mittelwelligen Infrarotkamera. Über eine Fortpflanzungsrechnung kann aus dem Zusammenhang zwischen mittlerer detektierte Photonenanzahl und Temperatur die Unsicherheit der Temperaturmessung aufgrund des Photonenschrotrauschens $\sigma_{T_i, \text{Photon}}$ berechnet werden. In Abb. 2.12 (b) ist der Verlauf von $\sigma_{T_i, \text{Photon}}$ über der Temperatur aufgetragen. In Tab. 2.4 sind die mittlere Anzahl der detektierten Photonen und der Rauschanteil der Temperaturmessung aufgrund des Photonenschrotrauschens für eine Oberflächentemperatur von 30 °C aufgelistet. Der Rauschanteil aufgrund des Photonenschrotrauschens ist demnach für die langwellige Infrarotkamera größer als für die mittelwellige.

Wird gemäß des NETD ein Detektorrauschen von $\sigma_{T_i, \text{Detektor}} = 0,025 \text{ mK}$ angenommen, können die restlichen unbekannt Rauschanteile über den Zusammenhang $\sqrt{\sigma_{T_i, \text{Detektor}}^2 - \sigma_{T_i, \text{Photon}}^2}$ abgeschätzt werden. Für die restlichen Rauschanteile ergibt sich folglich 24,4mK für die mittelwellige und 24,3mK für die langwellige Infrarotkamera. Der Rauschanteil, der durch das Photonenschrotrauschen entsteht, kann folglich für den betrachteten Temperaturbereich um eine mittlere Temperatur von 30 °C als nicht dominant angenommen werden. Es verbleiben also gerätespezifische Rauschquellen wie der Dunkelstrom und das Ausleserauschen als die dominanten Rauscheinflüsse. Nichtsdestotrotz wird der Vorteil einer Detektion im langwelligen Infrarotspektrum für die thermografische Strömungsvisualisierung ersichtlich. Die verwendete Integrationszeit beträgt für das Rauschen in gleicher Größenordnung nur ca. $\frac{1}{3}$ der Dauer, die für die mittelwellige Infrarotkamera genutzt wird. Bei einer identischen Integrationszeit von 449 μs werden sogar eine um

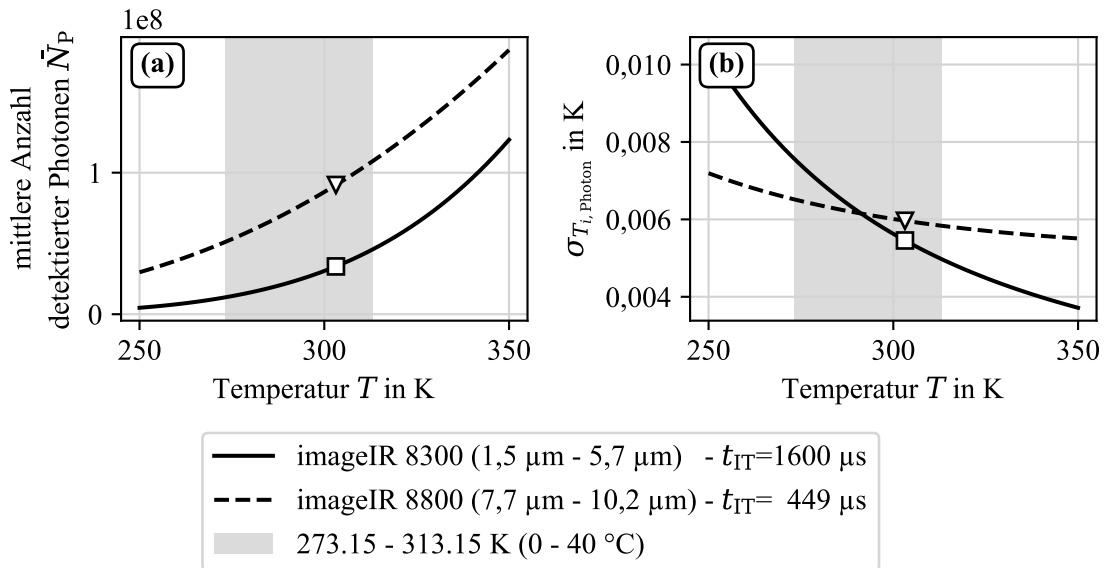


Abb. 2.12.: (a) Mittlere detektierte Photonenzahl \bar{N}_P in Abhängigkeit von der Temperatur T und einer betrachteten Fläche $\Delta A = 0,5 \text{ cm}^2$ für unterschiedliche Wellenlängenbereiche und Integrationszeiten. Aufgrund der höheren spezifischen Ausstrahlung detektiert die langwellige Infrarotkamera eine höhere Anzahl an Photonen trotz der geringeren Integrationszeit. Die Parameter der Optik werden als identisch angenommen. (b) Zusammenhang zwischen der Oberflächentemperatur und dem resultierenden Rauschanteil bei der Temperaturmessung aufgrund des Photonenschrotrauschens.

Faktor 11 mehr Photonen durch die langwellige Infrarotkamera detektiert. Das Temperaturrauschen aufgrund des Photonenschrotrauschens bei 30 $^{\circ}\text{C}$ ist in dieser Abschätzung jedoch bei der mittelwelligen System um 70 % höher als bei der langwelligen Infrarotkamera. Relevant hierbei zu beachten ist, dass eine höhere Anzahl an detektierten Photonen zwar ein höheres Photonstromrauschen bedeutet (Anstieg mit $\sqrt{\bar{N}_P}$), aber die Empfindlichkeit der aus einer Schwankung der Photonen resultierenden Unsicherheit der Temperaturmessung auch von der Integrationszeit abhängt. Darüber hinaus ist die Empfindlichkeit, sichtbar als die Steigung der detektierten Photonenzahl über der Temperatur in Abb. 2.12 (a), nicht linear und hängt von der betrachteten Oberflächentemperatur ab. In Abb. 2.12 (b) wird daher ein weitere Vorteil der Detektion im langwelligen Infrarotspektrum ersichtlich: Mit sinkender Temperatur der Oberfläche steigt das Photonenschrotrauschen bedingte Temperaturrauschen bei der langwelligen Infrarotkamera nicht so stark an, wie bei der mittelwelligen. Für eine Temperatur unter

Tab. 2.4.: Berechnete Anzahl detektierter Photonen und Anteil des Photonenschrotrauschens am Gesamtrauschen einer Temperaturmessung bei den beiden eingeführten Infrarotkammersystemen.

Typenbezeichnung	$\lambda_1 - \lambda_2$ in μm	Integrationszeit in μs	\bar{N}_P @ 30 $^{\circ}\text{C}$	$\sigma_{T_i, \text{Photon}}$ @ 30 $^{\circ}\text{C}$ in mK
ImageIR 8300	1,5 - 5,7	1600	$3,38 \cdot 10^7$	5,46
ImageIR 8800	7,7 - 10,2	449	$9,13 \cdot 10^7$	5,96

291K = 16,85 $^{\circ}\text{C}$ liegt das Rauschen für die langwellige Infrarotkamera sogar unter dem der

mittelwelligen. Durch die Detektion im langwelligen Infrarotspektrum kann folglich ein in der Größenordnung identisches Temperaturrauschen aufgrund des Photonenschrotrauschens mit einer geringeren Empfindlichkeit gegenüber sinkenden Temperaturen erreicht werden. Für bewegte Objekte wie Rotorblättern an WEA und einer typischen Oberflächentemperatur von meist unter 30 °C stellt dies zwei klare Vorteile dar. Ein experimenteller Vergleich der beiden eingeführten Infrarotsysteme bzgl. des Temperaturrauschens und die Auswirkungen auf das CNR zwischen der laminaren und turbulenten Strömung in thermografischen Strömungsvisualisierungen wird in Abschnitt 3.1 durchgeführt.

In diesem Abschnitt wurden die relevanten theoretischen Grundlagen der Infrarotthermografie für die thermografische Strömungsvisualisierung vorgestellt. Aus der Betrachtung verschiedener Aspekte der berührungslosen Temperaturmessung konnten mehrere Vorteile abgeleitet werden, die eine Detektion im längerwelligen Infrarotbereich für die Anwendung bei der thermografische Strömungsvisualisierung an sich in Betrieb befindlichen WEA motivieren. Für den bei der thermografische Strömungsvisualisierung typischen Temperaturbereich von 0 °C - 40 °C gelten im langwellige Infrarotbereich (6 μm - 15 μm) folgende Vorteile gegenüber dem mittelwelligen Infrarotbereich (3 μm - 6 μm):

- Höhere emittierte Leistung pro Fläche um einen Faktor 15 und höhere Photonendichte um einen Faktor 30
 - > höher Signalstärke gegenüber signalunabhängigen Rauscheinflüssen
 - > niedrigere Integrationszeit bei gleicher Signalstärke
- Leistungsdifferenz pro Temperaturdifferenz um einen Faktor 8 höher
 - > höhere Signaldifferenz bei Temperaturdifferenz
- Quereinfluss durch reflektierte Sonnenstrahlung um einen Faktor 0,12 kleiner
- Höherer Transmissionsgrad der Atmosphäre reduziert Verluste
- Geringerer relativer Verlust der maximalen Auslastung bei geringere Temperatur der Ausleseinheit bei Quantendetektoren

Für die beiden im praktischen Teil der Arbeit verwendeten Quantendetektoren wurden die Rauscheinflüsse auf die Temperaturmessung eingeführt und der Einfluss des Photonenschrotrauschens auf die Temperaturmessung als nicht dominant abgeschätzt. Bei ca. $\frac{1}{3}$ der Integrationszeit der mittelwelligen Infrarotkamera detektiert die langwellige Infrarotkamera noch das 2,7-Fache der Photonenzahl. Das aus dem Photonenschrotrauschen resultierende Temperaturrauschen ist mit 5,96 mK hierbei minimal höher, als für die mittelwellige Infrarotkamera (5,46 mK). Ein Vorteil besteht jedoch in der geringeren Empfindlichkeit des aus dem Photonenschrotrauschen resultierenden Temperaturrauschens bei niedrigeren Temperaturen < 30 °C und der geringeren Integrationszeit. Durch die allgemein höhere Signalstärke und höhere Signaldifferenz durch eine Temperaturdifferenz, sowie das geringere Rauschen für niedriger Temperaturen besitzt das langwellige Infrarotsystem das Potential Strömungsvisualisierungen mit höherer Intensitätsdifferenz zwischen der laminaren und turbulenten Strömung sowie reduziertem räumlichen Rauschen zu erzeugen. Hieraus resultiert das bereits in Abschnitt 1.3 motiviert Ziel, eine Steigerung des CNR und damit der globalen Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche in thermografischen Strömungsvisualisierung zu bewirken. Eine experimentelle Untersuchung der Theorie wird in Kapitel 3 durchgeführt.

2.4. Experimenteller Aufbau

In diesem Abschnitt wird der experimentelle Aufbau beschrieben, aus dem die Messergebnisse des praktischen Teils dieser Arbeit hervorgehen. Zunächst wird in Abschnitt 2.4.1 das Wind-

kanalexperiment im Windkanal der *Deutschen WindGuard Engineering GmbH* in Bremerhaven erläutert. Anschließend wird in Abschnitt 2.4.2 das Freifeldexperiment beschrieben, dass für die Erzeugung von thermografischen Strömungsvisualisierungen an WEA in Betrieb Anwendung findet. In Abschnitt 2.4.3 werden abschließend die Kamerasysteme vorgestellt.

2.4.1. Windkanalexperiment

Der erste Teil der im experimentellen Teil dieser Arbeit erzeugten Messdaten wurden im aeroakustischen Windkanal der *Deutschen WindGuard Engineering GmbH* in Bremerhaven erzeugt. In dem nach Göttinger Bauart konzipierten Windkanal lassen sich laminare Strömungen mit Turbulenzintensität von kleiner 0,3% erzeugen. Der Kanal ist für akustische und aerodynamische Forschung an Rotorblattsegmenten von WEA optimiert. An zwei Orten im Kanal werden die Temperatur, der Druck und die Luftfeuchtigkeit gemessen, um die Dichte der Strömung zu bestimmen.

In der geschlossenen Messstrecke werden Windgeschwindigkeiten von bis zu 100 ms^{-1} bzw. einer Profil-Reynoldszahl von $Re_c = 6 \cdot 10^6$ erreichen. Die 2,5 D Modelle von Profilschnitten können dabei eine Sehnenlänge von bis zu $c = 0,9 \text{ m}$ haben. Die Strömungsgeschwindigkeit wird mit 4 Pitotrohren gemessen. Der Angriffswinkel α_{aoa} der Anströmung auf das Profil kann mit einer Unsicherheit von $0,05^\circ$ stufenlos eingestellt werden. Hierzu ist das Versuchsobjekt zwischen zwei Drehtellern in der Decke und auf dem Boden der Messstrecke befestigt, die über 6- bzw. 2-Komponenten verfügen, um die auf das Profil wirkenden Kräfte zu messen. Für eine direkte Oberflächendruckmessung stehen einzelne, in die Oberfläche eingelassene Piezo-Drucksensoren mit separaten Druckschläuchen zu Verfügung. Die Sensoren agieren im Differenzmodus und messen die Druckverteilung in der oberflächennahen Grenzschicht des umströmten Messobjekts. Die relative Unsicherheit einer Einzelmessung des Sensoren beträgt laut Herstellerangaben $\frac{0,5\%}{\sqrt{3}}$. Der Windkanal kann für verschiedene Messverfahren eingesetzt werden. Neben der direkten Druck- und Kraftmessung am Messobjekt können Wollfäden, Rauchvisualisierungen und die Ölfilmtechnik verwendet werden.

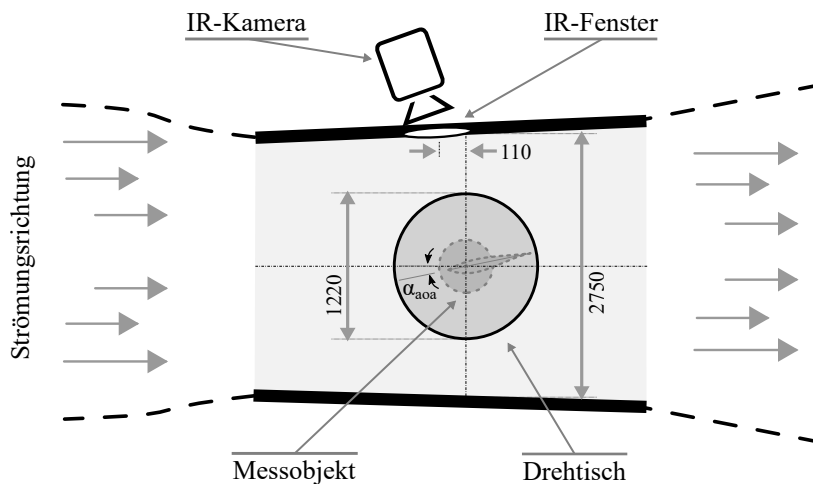


Abb. 2.13.: Skizze des experimentellen Aufbaus im geschlossenen Windkanal der *Deutschen WindGuard Engineering GmbH* in Bremerhaven. Die Infrarotkamera betrachtet die Grenzschichtströmung auf der Oberfläche des Messobjekts in der Messstrecke durch ein Infrarot-durchlässiges Fenster.

Für die Anwendung der Thermografie als Strömungsvisualisierungsverfahren, basierend auf unterschiedliche Wärmestromdichten, ist eine Temperaturdifferenz zwischen Strömung und Messobjekt erforderlich. Für eine Untersuchung der thermischen Effekte bei der thermografische Strö-

mungvisualisierung bedarf es daher eine Regelung der Strömungstemperatur während des Experiments. Da eine Temperaturregelung im verwendeten Windkanal nicht möglich ist, entsteht der Temperaturunterschied, der für die Anwendung der thermografische Strömungsvisualisierung erforderlich ist, nur durch eine passive Erwärmung aufgrund von Reibungseffekten an der Kanalinnenwand und Erwärmung der Turbineneinheiten. Der daraus entstehende Temperaturgradient hängt maßgeblich von der Strömungsgeschwindigkeit und damit der Reynoldszahl ab.

Abb. 2.14 zeigt den Temperaturverlauf der Strömung zum Zeitpunkt der in Abschnitt 4 vorgestellten Messungen. Der Zusammenhang zwischen dem Temperaturanstieg und der Reynoldszahl ist deutlich erkennbar. Der Unterschied der Anfangstemperatur hängt mit unterschiedlichen Startzeitpunkten der Messungen zusammen. Bei einer höheren Reynoldszahl, resultierend aus einer höheren Strömungsgeschwindigkeit, existiert also eine stärkere Erwärmung der Strömung und daraus resultierende Temperaturdifferenz zwischen der Strömung und der Objektoberfläche. Unterschiedliche Kontrast zwischen den Strömungsbereichen lassen sich also lediglich über die Regelung der Strömungsgeschwindigkeit erreichen. Dies ist besonders bei Messungen relevant, bei denen gezielt Strömungsvisualisierungen mit schlechtem Kontrast erzeugt werden sollen.

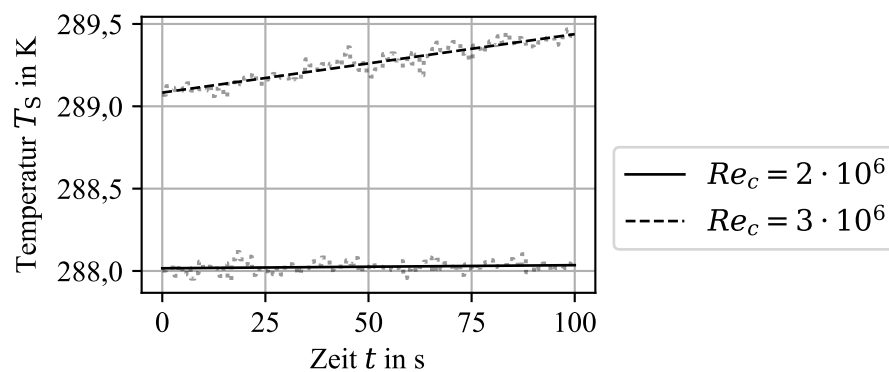


Abb. 2.14.: Unterschiedliche Erwärmung der Strömung im Windkanal in Abhängigkeit von der Reynoldszahl bei einem identischen Messobjekt. Eine erhöhte Strömungsgeschwindigkeit erzeugt aufgrund von Reibungen an den Kanalwänden und Wärmeproduktion der Turbinen eine stärkere Erwärmung der Strömung.

Eine Betrachtung der Messoberfläche mit einer Infrarotkamera wird durch Fenster in der Seite des Windkanals möglich. Um eine maximale Transmission der Infrarot-Strahlung durch das Fenster zu ermöglichen, stehen unterschiedliche Materialien für das Fenster zur Verfügung. Für den MIR-Bereich Calciumfluorid (CaF_2 , $\lambda_{\tau_{\max}} = 0,2 - 6 \mu\text{m}$) und für den LIR-Bereich Germanium (Ge , $\lambda_{\tau_{\max}} = 8 - 12 \mu\text{m}$). Der Abstand zwischen dem Drehzentrum der Drehteller und dem Fenster in der Kanalwand beträgt 1,375 m.

2.4.2. Freifeldexperiment

Der wesentliche Unterschied zwischen einer thermografischen Strömungsvisualisierung in einem Windkanal- und Freifeldexperiment sind der Messabstand und die nicht kontrollierbaren Witterungsbedingungen. Während im Windkanal Messabstände von wenigen Metern eine hohe geometrische Auflösung ermöglichen, führen zwei wesentliche Faktoren dazu, dass der Abstand in der Freifeldanwendung zwei Größenordnungen über dem in Windkanal liegt. Der primäre Grund ist, dass das Kamerasystem auf dem Boden positioniert wird, während die Nabenhöhe je nach Anlagentyp eine Höhe von 50 m - 100 m haben kann. Abhängig davon, in welcher Position das Rotorblatt untersucht werden soll, kann der Messabstand noch weiter ausfallen. Zusätzlich zu der Höhe des untersuchten Rotorblattabschnittes über dem Boden, wird der Messabstand weiter

erhöht, da ein gewisser Abstand des Kamerasystems vor der WEA erforderlich ist, um einen möglichst steilen Blickwinkel auf die Rotorblattfläche zu erreichen. Für eine Zuordnung der lokalisierten laminar-turbulente Transition entlang der Profelsehne ist ein steilerer Blick auf die Profelsehne erforderlich. Darüber hinaus muss oft auf eine Zugänglichkeit in der Umgebung des WEA geachtet werden. Insgesamt resultiert daraus ein Messabstand zwischen Infrarotkamera und Rotorblattoberfläche von 100 m - 500 m. Um dem hohen Messabstand entgegen zu wirken und die geometrische Auflösung zu erhöhen, kommt ein starkes 200 mm Teleobjektiv zum Einsatz.

Ein weiterer Faktor, der in Windkanalexperimenten unberücksichtigt bleiben kann ist das Verschmieren von Bilddetails aufgrund der Bewegungsunschärfe resultierend aus der Relativbewegung des Rotorblattes zum Kamerasystem. Bei Höchstgeschwindigkeiten von 80 m s^{-1} - 90 m s^{-1} an der Spitze des Rotorblattes entstehen trotz der geringen Integrationszeiten moderner Infrarotkameras Bewegungsunschärfen von einigen Pixel im Bild. Bei einer Blattspitzengeschwindigkeit von 85 m s^{-1} und einer Integrationszeit von $1600 \mu\text{s}$ bzw. $449 \mu\text{s}$ bewegt sich das Rotorblatt um 0,135 m bzw. 0,037 m. Abhängig von der Messentfernung resultiert dies in eine Bildunschärfe von mehreren Pixel.

Die Freifeldmessungen, die in dieser Arbeit verwendet werden wurden an einer Onshore-WEA des Typs *GE 1.5sl* des Herstellers *General Electric* durchgeführt. Die WEA hat eine Nennlast von 1,5 MW und eine Nabenhöhe von 62 m. Die Rotorblätter des Herstellers *LM Wind Power* sind vom Typ *LM 37.3p* und haben eine Länge von 37,3 m. Der Messaufbau in der Freifeldanwendung besteht aus der Infrarotkamera, dem zugehörigen Messrechner für die Datenaufnahme, ein zweites optisches Messsystem zur Dreherkennung der WEA und Triggerung der Infrarotkamera, sowie einer Stromversorgung. Die Infrarotkamera ist auf einem Stativ mit Drei-Wege-Neiger-Stativkopf befestigt, was eine freie Ausrichtung der Kamera erlaubt. Für die Dreherkennung der WEA wird ein zweites Stativ mit einer Industriekamera verwendet, dessen Bilder als Liveaufnahme von einem weiteren Messrechner ausgewertet werden und ein Triggersignal an die WEA schickt. Die Stromversorgung des Gesamtsystems ist über einen mobilen Akku mit einer Spannung von 230 V und einer Kapazität von 1500 Wh realisiert.

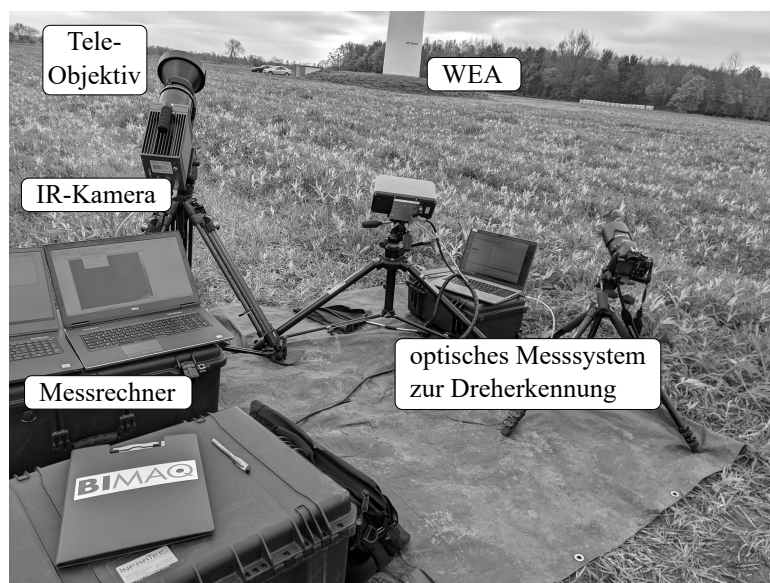


Abb. 2.15.: Messaufbau der thermografischen Strömungsvisualisierung an einer WEA in Betrieb.

2.4.3. Kamerasysteme

Zur thermografischen Detektion der Wärmestrahlung für die thermografische Strömungsvisualisierung kommen die beiden bereits zuvor eingeführten Quantendetektoren mit Photodiode des Herstellers *InfraTec GmbH* zum Einsatz, vgl. Abschnitt 2.3.2: Die „mittelwellige“ Infrarotkamera (*ImageIR 8300*) mit einem InSb-Detektor ist im mittleren Infrarotbereich zwischen $1,5\ \mu\text{m}$ - $5,7\ \mu\text{m}$ und die „langwellige“ Infrarotkamera (*ImageIR 8800*) mit einem MCT-Detektor im langen Infrarotbereich zwischen $7,7\ \mu\text{m}$ - $10,2\ \mu\text{m}$ sensitiv. Beide Systeme werden durch einen Stirlingkühler auf eine Betriebstemperatur von $77\ \text{K}$ gekühlt, um Rauscheinflüsse durch die eigene thermische Strahlung zu minimieren. Bei einer optimalen Ausnutzung der Ladungsspeicherkapazität quantifiziert der Hersteller die rauschäquivalenten Temperaturdifferenz (NETD) bei einer Temperatur von $30\ ^\circ\text{C}$ bei beiden Systemen mit $25\ \text{mK}$, vgl. Abschnitt 2.3.3. Beide Systeme haben eine Bildauflösung von (640×512) Pixels, eine Kantenlänge der Detektorpixel von $15\ \mu\text{m}$ und eine Blendenzahl von $K = 2$. Ein gleichzeitiges Auslesen aller Detektorpixel (global shutter) verhindert einen rolling-shutter Effekt und ermöglicht so eine artefaktfreie Bildserienaufnahme mit einer Frequenz von bis zu $100\ \text{Hz}$. Die Infrarotkameras werden in einem Temperaturmessbereich von $0\ ^\circ\text{C}$ - $60\ ^\circ\text{C}$ betrieben und haben einen 14 bit Dynamikbereich. Die Integrationszeit kann in beiden Systemen zwischen $10\ \mu\text{s}$ und $20.000\ \mu\text{s}$ gewählt werden. Für die Windkanalexperimente mit einem Messabstand von $0,18\ \text{m}$ wird ein $12\ \text{mm}$ Weitwinkelobjektiv verwendet, was in ein instantaneous field of view (IFOV) von ca. $1,725\ \text{mm}$ resultiert. Bei der Freifeldanwendung und Verwendung eines $200\ \text{mm}$ Objektivs und einem Messabstand von $150\ \text{m}$ liegt das IFOV um eine Größenordnung höher und beträgt ca. $11,25\ \text{mm}$. Die Datenanbindung an den Messrechner verwendet das GigaBit Netzwerk (Gigabit Ethernet, GigE). Eine Auswertung der Bilddaten erfolgt an einem externen PC unter der Verwendung der skriptbasierten Programmiersprache *Python*.

Da es sich bei dem Messaufbau in der Freifeldanwendung an sich in Betrieb befindlichen WEA um ein stationäres Messsystem handelt und sich das Rotorblatt in Bewegung befindet, ist ein Triggersystem erforderlich, dass ein positionsgenaues Triggersignal an das Infrarotsystem gibt, sobald ein Rotorblatt eine vollständige Umdrehung absolviert hat. Für das Dreherkennungssystem wird eine optische Kamera vom Typ *DMK 37BUX252* des Herstellers *The Imaging Source* verwendet. Die monochrome Kamera hat eine Bildauflösung von (2048×1536) Pixels und wird mit einem $8\ \text{mm}$ Objektiv betrieben und kann Aufnahmen mit bis zu einer Frequenz von $119\ \text{fps}$ aufnehmen. Dies erlaubt es für die gängigen Messentfernungen den gesamten Rotor der WEA in der Aufnahme zu erfassen. Ein über USB angeschlossener Auswerterechner wertet die Bilder *Python* in Echtzeit aus und lokalisiert die Drehbewegung des Rotors, um über eine weitere USB-Schnittstelle ein Triggersignal an die Infrarotkamera auszugeben, vgl. Abschnitt 3.2. Damit ist es möglich, eine Bildserie von Thermografieaufnahmen zu akquirieren, um erstmals zeitliche Fluktuationen in den Strömungsbereichen in-Prozess zu messen und auszuwerten. Dies ermöglicht die Anwendung von modernen Bildverarbeitungsmethoden zur Auswertung von zeitlichen Bildserien, vgl. Abschnitt 4.1.

2.5. Strömungsvisualisierung

Existiert eine Temperaturdifferenz $|T_W - T_S|$ zwischen der umströmten Oberfläche eines aerodynamischen Profils und dem Strömungsfluid, resultiert aufgrund der unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{h,x}$ ein unterschiedlicher konvektiver Wärmestrom $\dot{q}_{W,x}$ in Abhängigkeit von den Strömungsbereichen, vgl. Abschnitt 2.2. Da es sich bei der Umströmung von WEA um Strömungsgeschwindigkeiten unter $\text{Ma } 0,3$ handelt, wird die kompressible Erwärmung der oberflächennahen Strömungstemperatur vernachlässigt. Anhand der gemessenen Temperaturwerten \hat{T}_W der Oberfläche kann ein Rückschluss auf die Unterschiede der konvektiven Wärmestromdichten

und damit dem Wärmeübergangs- bzw. Reibungskoeffizienten getroffen werden. Eine quantitative Untersuchung der Oberflächentemperatur ist dabei nicht erforderlich. Die gemessene Temperatur \hat{I}_W weicht zudem von der tatsächlichen Oberflächentemperatur T_W ab, da für die qualitative Untersuchung der Temperaturen weder der materialabhängige Emissionsgrad noch Verluste durch die Wegstrecke korrigiert werden. Aus diesem Grund werden die Temperaturwerte der gemessenen Oberfläche in den thermografischen Strömungsvisualisierung in dieser Arbeit auf ein Intervall zwischen $[0, 1]$ normiert. Im restlichen Teil dieser Arbeit wird nicht mehr zwischen der gemessenen (\hat{I}_W) und tatsächlichen (T_W) Oberflächentemperatur unterschieden und oft nur die Bezeichnung der Temperatur (T) verwendet. In Abb. 2.16 ist eine exemplarische Strömungsvisualisierung aus einer Freifeldanwendung an einer sich in Betrieb befindlichen WEA mit Hilfe der Thermografie dargestellt. Die Strömungsrichtung ist von unten nach oben gerichtet. Der laminare und turbulente Strömungsbereich kann anhand der unterschiedlichen Intensität in der Aufnahme voneinander unterschieden werden. Zwischen den Strömungsbereichen ist der laminar-turbulente Übergang (Transition) durch einen scharf abgetrennten Gradienten in Strömungsrichtung erkennbar.

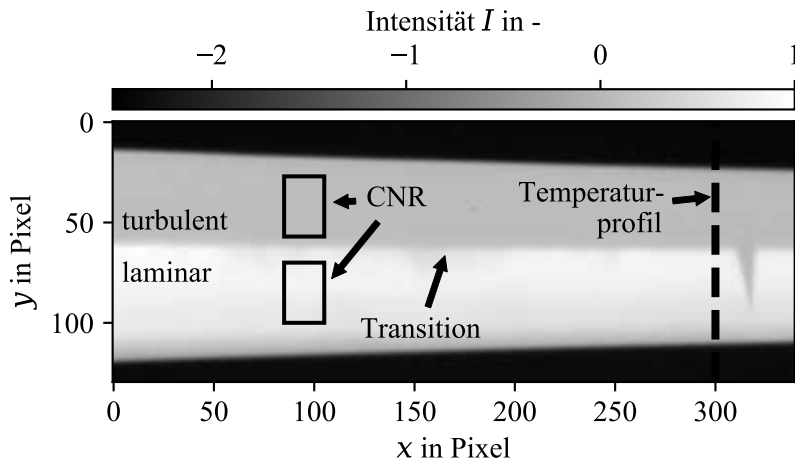


Abb. 2.16.: Thermografische Strömungsvisualisierung der Grenzschichtströmung auf der Rotorblattoberfläche einer WEA in Betrieb mit hohem Kontrast und einer Strömungsrichtung von unten nach oben. Die laminar-turbulente Transition kann deutlich bei $y \approx 60$ Pixel anhand eines hohen Temperaturgradienten in Strömungsrichtung detektiert werden. Die Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition entlang des markierten Temperaturprofils wird in Abschnitt 2.6 vorgestellt. Das CNR zwischen der laminaren und turbulenten Strömung beträgt basierend auf den markierten Auswertebereichen 10,48.

Mit dem Ziel, die globale Unterscheidbarkeit zwischen der laminaren und turbulenten Strömung zu steigern, wird eine Erhöhung der Wärmestromdichte \dot{q}_W angestrebt, da sich hieraus eine höhere Differenz der Wärmestromdichten zwischen den Strömungsbereichen ergibt. Da der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{h,x}$ nur durch die Strömung und das Material beeinflusst wird, muss zusätzlich eine Erhöhung der Temperaturdifferenz zwischen der Wand und des Fluids $|T_W - T_S|$ angestrebt werden, vgl. 2.3. Während die Temperaturdifferenz in Windkanalexperimenten durch aktive Erwärmung mit empfohlenen Heizleistungen von vielen Hundert bis wenigen Tausend W m^{-2} mehrere Kelvin betragen kann, sind die thermischen Bedingungen in Freifeldexperimenten nicht kontrollierbar und resultieren oft nur in einen Kontrast von ca. 1 K. Im Gegensatz zu Windkanalanwendungen, basiert die Erwärmung der Messoberfläche lediglich auf der Absorption der solaren Strahlungsenergie. Die für die thermografische Strömungsvisualisierung erforderliche Temperaturdifferenz entsteht daher nur aus der durch die Sonne erwärmten Oberfläche und

relativ dazu kalten Umgebungsluft. Das Maß der Erwärmung hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab. Die größten Einflussfaktoren sind die Jahres- und Tageszeit durch den unterschiedlichen Sonnenstand und die Bewölkung zum Zeitpunkt der Messung. Dollinger et al. führte eine Abschätzung der solaren Strahlungsleistung basierend auf einem Modell von [Mei1977] und [Mun2007] durch [Dol2018c]. Als Ergebnis unter optimalen Bedingungen bzgl. der Jahres- und Tageszeit für den Ort Bremen, Norddeutschland, ergab sich eine maximale Strahlungsleistung der Sonne von 700 W m^{-2} . Der Absorptionsgrad der Rotorblattoberfläche wurde basierend auf dem verwendeten Material und eigenen Messungen an einem demontierten Rotorblatt auf $\alpha = \varepsilon = 0.8$ geschätzt [Yu2009, Che2007]. Daraus ergibt sich eine maximale absorbierte Strahlungsleistung der Rotorblattoberfläche von 560 W m^{-2} und liegt damit deutlich unter den empfohlenen Werten aus der Windkanalanwendung [Jos2016, Lan2015, Sim2016]. Darüber hinaus gilt es zu erwähnen, dass diese Abschätzung für wolkenfreies Wetter gilt. In der realen Anwendung liegt die eingetragene Heizleistung deutlich unter dem abgeschätzten Maximalwert.

2.5.1. Kenngrößen

Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis

Bereits in Abschnitt 1.2 eingeführt ist das in dieser Arbeit gewählte Maß für die Unterscheidbarkeit zwischen verschiedenen Strömungsbereichen in einer Strömungsvisualisierung: Das Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis (engl.: contrast-to-noise ratio - CNR), vgl. Gleichung (1.2). Analog zur Definition des Signal-zu-Rausch-Verhältnis (engl.: signal-to-noise ratio - SNR) aus Gleichung (1.1) wird als Signalstärke die Differenz $|\bar{I}_a - \bar{I}_b|$ der räumlich mittleren Intensitäten in den Bereichen a und b gewählt und zu der kombinierten Standardabweichung $\sqrt{s_a^2 + s_b^2}$, die der Unterscheidbarkeit entgegen wirkt, ins Verhältnis gesetzt.

Angewandt auf die thermografische Strömungsvisualisierung in Abb. 2.16 ergeben sich für die markierten Auswertebereiche folgende Werte: Die mittlere Intensität des laminaren Strömungsbereichs beträgt $\bar{I}_{\text{lam}} = 0,76$ und im turbulenten Strömungsbereich $\bar{I}_{\text{turb}} = 0,08$. Die absolute Differenz der mittleren Intensitäten der Strömungsbereiche ergibt sich damit zu $0,68$. Die räumlichen Standardabweichungen der Auswahlbereiche betragen $s_{\text{lam}} = 0,06$ und $s_{\text{turb}} = 0,02$. Die kombinierte Standardabweichung errechnet sich somit zu $0,06$. Aus Gleichung (1.2) ergibt sich somit ein CNR zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich von $10,48$.

Unterscheidbarkeit und Inhomogenität

Eine Bewertung der Unterscheidbarkeit durch das CNR unterliegt, durch seine flächenhafte Betrachtung, dem Einfluss von nichthomogenen Intensitätsfeldern in den Auswertebereichen. Das CNR zwischen zwei Bildbereichen nimmt den gleichen Wert an, unabhängig davon, ob hohes räumliches Rauschen die Unterscheidbarkeit verringert, obwohl ein deutlicher Unterschied zwischen den Intensitätsniveaus existiert, oder ob rauschfreie Bildbereiche durch systematische Gradienten eine hohe kombinierte räumliche Standardabweichung aufweisen und somit das CNR reduzieren. Um die Auswirkung von zufälligem Rauschen und systematischen Gradienten auf das CNR zu separieren, werden folgend zwei zusätzliche Kenngrößen der Unterscheidbarkeit eingeführt. Die Definition der Kenngrößen geht über eine reine Quantifizierung des CNR hinaus und ermöglicht so einen näheren Einblick in die Inhomogenitäten der Bildbereiche. Die Inhomogenitäten in den Bildbereichen bewirken zufällige und systematische Messabweichungen bei der nachgestellten Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition, vgl. Abschnitt 2.6, weshalb eine separierte Betrachtung der Einflüsse einen nähere Untersuchung der globalen Unterscheidbarkeit und der Güte der Lokalisierung erlaubt.

Analog zum CNR wird aus der Differenz der mittleren Intensitäten der Auswertebereiche und

dem systematischen bzw. zufälligen Einfluss auf die räumlichen Standardabweichungen jeweils der Wert D_{syst} und D_{rand} definiert, der die Unterscheidbarkeit (engl.: distinguishability) definiert:

$$D_{\text{syst}} = \left| \frac{\bar{I}_a - \bar{I}_b}{\sqrt{s_{a, \text{syst}}^2 + s_{b, \text{syst}}^2}} \right| \quad (2.32) \quad D_{\text{rand}} = \left| \frac{\bar{I}_a - \bar{I}_b}{\sqrt{s_{a, \text{rand}}^2 + s_{b, \text{rand}}^2}} \right| \quad (2.33)$$

Die Standardabweichung des systematischen verlaufs sei definiert als s_{syst} und die des zufälligen verlaufs als s_{rand} . Ohne Berücksichtigung des zufälligen Rauschens haben zwei homogene Intensitätsfelder, die keinen systematischen Gradienten aufweisen, bei gegebener Differenz $|\bar{I}_a - \bar{I}_b|$ ein niedriges $\sqrt{s_{a, \text{syst}}^2 + s_{b, \text{syst}}^2}$ und weisen folglich eine hohe Unterscheidbarkeit D_{syst} auf. Beinhalten die Auswertebereiche bei gleicher Intensitätsdifferenz systematische Gradienten, egal in welche Richtung in der Bildebene, so resultieren diese in ein hohes $\sqrt{s_{a, \text{syst}}^2 + s_{b, \text{syst}}^2}$ und damit reduzierte Unterscheidbarkeit D_{syst} . Dasselbe gilt analog für die Unterscheidbarkeit D_{rand} , basierend auf dem räumlichen Rauschen in den Auswertebereichen und unabhängig von systematischen Gradienten.

Um den zufälligen Rauschanteil und systematische Gradienten zu separieren, wird das Intensitätsfeld mit einem zweidimensionalen Gauß-Filter geglättet und der resultierende Verlauf als systematische Gradienten angenommen. Der zufällige Anteil wird durch eine Subtraktion der unbearbeiteten Werte und dem geglätteten Verlauf ermittelt. In Abb. 2.17 ist das Vorgehen exemplarisch anhand eines eindimensionalen Intensitätsverlaufs dargestellt. Der Verlauf in Abb. 2.17 (a) entspricht dem real gemessenen Intensitätsverlauf einer Windkanalanwendung.

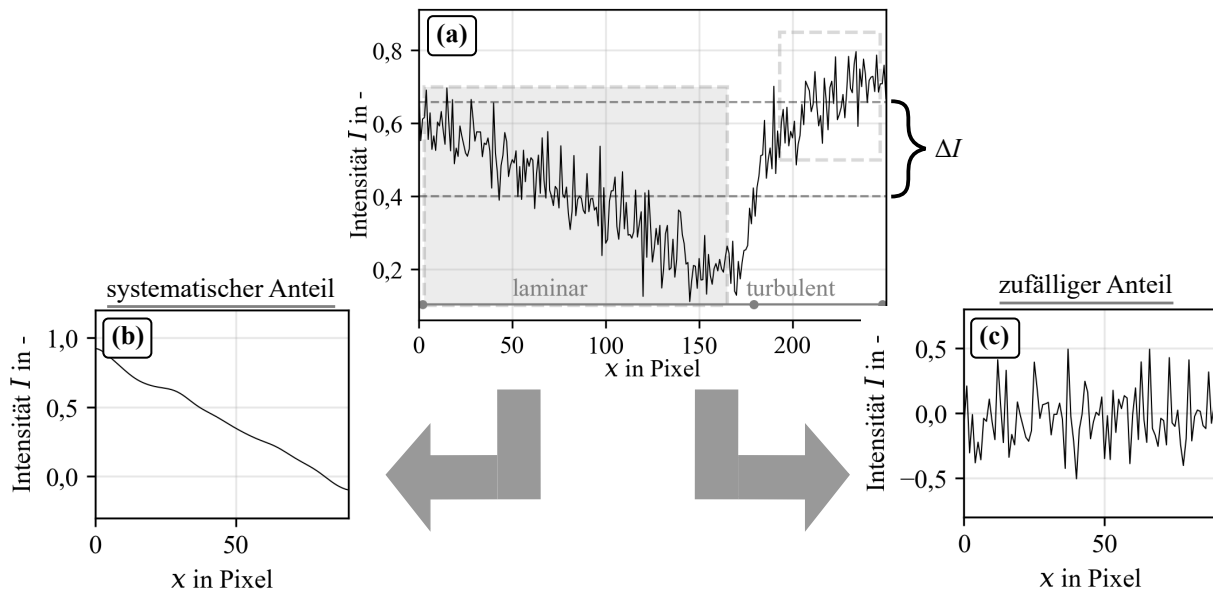


Abb. 2.17.: Separierung des systematischen verlaufs und zufälligem Rauschen eines Intensitätsverlaufs bei der thermografischen Strömungsvisualisierung. (a) Beispielhafter eindimensionaler Verlauf der Intensität einer thermografischen Strömungsvisualisierung in Strömungsrichtung. (b) Systematischer Verlauf des Auswertebereichs. (d) Zufälliges Rauschen im Auswertebereich.

Der geglättete Verlauf des laminaren Strömungsbereichs ist in Abb. 2.17 (b) dargestellt und wird als systematischer Anteil der räumlichen Standardabweichung definiert. Der zufällige Anteil, der sich aus der Subtraktion der Werte in (a) und (b) ergibt, ist in Abb. 2.17 (c) dargestellt. Es ist zu beachten, dass die Wahl der Standardabweichung des angewandten Gauß-Filters nicht anhand

der Datengrundlage automatisch ermittelt wurde, sondern durch eine Auswertung mehrerer Messergebnisse manuell gewählt wurde. Der optimale Wert wurde anhand einer Minimierung des Mittelwerts des zufälligen Anteils ermittelt und beträgt im angegebenen eindimensionalen Beispiel $\sigma = 4$. Die Berechnung der Standardabweichung s_{sys} im systematischen Anteil in Abb. 2.17 (b) quantifiziert folglich den Einfluss des systematischen Gradienten auf die gesamte räumliche Standardabweichung. Analog dazu ergibt die Standardabweichung im zufälligen Anteil in Abb. 2.17 (c) den Wert s_{rand} . Über die getrennten Anteile können die Kennzahlen der Unterscheidbarkeit D_{sys} und D_{rand} zwischen der laminaren und turbulenten Strömung berechnet werden und eine Unterscheidbarkeit aufgrund der verschiedenen Einflüsse, über das allgemeine Maß des CNR hinaus, bewertet werden. Bei der thermografischen Strömungsvisualisierung können so der Einfluss von räumlichem Temperaturrauschen aufgrund von Bildrauschen und Strömungsfluktuationen separat von systematischen Gradienten, die sich aus dem Verlauf des Wärmeübergangskoeffizienten und überlagerten Quereinflüssen ergeben, auf die Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche untersucht werden.

Bei vorhandener Temperaturdifferenz zwischen Fluid und Oberfläche ist eine Unterscheidung der laminaren und turbulenten Strömung aufgrund unterschiedlicher sich ausprägender Oberflächentemperaturen möglich, die in Form von normierten Intensitäten zum Zweck einer Visualisierung der Strömung interpretiert werden können. Die Unterscheidbarkeit kann basierend auf dem Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis CNR und eingeführten Unterscheidbarkeitsparametern D_{sys} und D_{rand} bewertet werden. Die Unterscheidbarkeitsparameter differenzieren dabei in zufällige und systematische Einflüsse, die einer vorhandenen Intensitätsdifferenz zwischen den Strömungsbereichen entgegen wirken.

Die globale Unterscheidbarkeit kann mit einer Steigerung der initialen Temperaturdifferenz zwischen Fluid und Oberfläche erhöht werden, da die Differenz der Wärmestromdichten der Bereiche proportional mit ansteigen. In Freifeldanwendungen können ungünstige Witterungsbedingungen jedoch eine geringe Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche bewirken. Da sowohl Oberflächeneigenschaften, als auch die thermischen Bedingungen zum Zeitpunkt der Messdatenaufnahme nicht beeinflusst werden können, ergibt sich die Fragestellung, wie Verfahren der Bildverarbeitung genutzt werden können, um die Unterscheidbarkeit in Messdaten mit initial geringer Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche zu erhöhen. Diese Fragestellung wird im Ergebnisteil dieser Arbeit in Kapitel 4 beantwortet.

2.6. Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition

Neben dem Ziel einer globalen Unterscheidbarkeit des laminaren und turbulenten Strömungsbereichs in thermografischen Strömungsvisualisierung an WEA, ist die Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition, also den Ort des Überganges von laminarer zu turbulenter Strömung, zur Beurteilung der aerodynamischen Effizienz eines Rotoblattes elementar, vgl. Abschnitt 2.1.2. Der Übergang zwischen laminarer und turbulenter Strömung ist durch eine sprungförmige Änderung des Wärmeübergangskoeffizienten und damit der Wärmestromdichte zwischen Strömung und Oberfläche gekennzeichnet, vgl. Abschnitt 2.2. Aufgrund des Anstieges zwischen den Bereichen ergibt sich ein räumlicher Temperaturgradient auf der Oberfläche, anhand der die laminar-turbulente Transition lokalisiert werden kann.

2.6.1. Natürliche Transition

Die auf natürliche Art und Weise auftretende Transition in Folge von Tollmien-Schlichting Wellen und ohne die Beeinflussung der Strömung durch Kontaminationen der Oberfläche wird fortlaufend als natürliche Transition bezeichnet [Sch2006]. Der Übergang prägt sich in Form einer

Transitionslinie parallel zur Vorderkante und quer zu Strömungsrichtung aus. Neben Verfahren der Kantenerkennung [Cra2015] wurden von Dollinger et al. [Dol2018b] verschiedene Methoden der Lokalisierung für die Anwendung an WEA vorgestellt. Hierbei wird der Ort der laminar-turbulenten Transition in der Thermografieaufnahme durch den maximalen Temperaturgradienten in Strömungsrichtung definiert. Aufgrund des hohen Messabstandes ist die räumliche Auflösung des Rotorblattes im Bereich der Blattspitze stark limitiert und kann unter Umständen nur ca. 1 Pixel cm^{-2} betragen. Um daher eine Subpixelauflösung zu erreichen, werden die von Dollinger vorgestellten Verfahren den Temperaturverlauf bzw. den Gradienten des Temperaturverlaufs für jede Bildzeile bzw. Bildspalte entlang der Strömungsrichtung mit Hilfe einer approximierten Modellfunktion aus [Dol2018b].

Eine Auswertung des Temperatur- bzw. Intensitätsprofils entlang der Bildspalte $x = 300$ in Abb. 2.16 zur Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition ist in Abb. 2.18 dargestellt. Die Wahl der durch Dollinger et al. [Dol2018b] verwendeten Approximationsmodelle basiert auf der heuristische Modellvorstellung zweier unterschiedlicher Niveaus der Intensität und einen steilen Anstieg zwischen den Bereichen. Demzufolge wird der Intensitätsverlauf, vgl. Abb. 2.18 (a), in Strömungsrichtung mit einer Verteilungsfunktion der Normalverteilung und der Intensitätsgradient, vgl. 2.18 (b), mit eine Dichtefunktion der Normalverteilung approximiert. Die Verteilungsfunktion wird hierbei über die Fehlerfunktion $\text{erf}(x)$ definiert:

$$\hat{I} = \hat{a} \operatorname{erf} \left(\frac{y - \hat{b}}{\sqrt{2} \hat{c}} + \hat{d} \right). \quad (2.34)$$

Der Ort der Transition kann nach einer Approximation mit der Methode der kleinsten Quadrate (MKQ) direkt aus den Modellparametern abgeleitet werden. Die lokalisierte Transitionsposition y_{tr} entspricht dabei dem Ort des Wendepunkts \hat{b} der Modellfunktion aus Gleichung (2.34). Analog dazu kann die Transitionsposition auch durch die Approximation des Intensitätsgradienten dI/dy mit der Dichtefunktion der Normalverteilung

$$\tilde{I} = \tilde{a} e^{-\left(\frac{y - \tilde{b}}{\sqrt{2} \tilde{c}}\right)^2} + \tilde{d}. \quad (2.35)$$

anhand des Parameters \tilde{b} , dem Ort des globalen Maximums, lokalisiert werden. Beide Verfahren vereinen den Vorteil einer selbstständigen Zentrierung der Approximationmodelle an dem Ort der laminar-turbulenten Transition, sowie eine durch die Funktionsparameter gegebene Subpixelauflösung bei der Lokalisierung. Neben dem strömungsbedingten Wärmeübergang durch Konvektion, existieren verschiedene Quereinflüsse auf das sich ausprägende Temperaturfeld einer umströmten Oberfläche. Hierzu zählen im Wesentlichen der Wärmeverlust durch Wärmestrahlung, sowie die Wärmeleitung im Material des umströmten Profils. Vorausgesetzt, die Oberflächenbeschaffenheit und Material sind isotrop, hat der Wärmeverlust durch Abstrahlung einen vernachlässigbaren Einfluss auf die qualitative Verteilung des Temperaturfeldes. Während in Windkanalexperimenten durch Veränderung der Oberfläche die Wärmeleitung in das Material und quer zur Oberfläche minimiert werden kann, ist eine Materialbeeinflussung der Rotorblätter von WEA nicht möglich. Da aufgrund lateraler Wärmeleitung der Temperaturgradient im Bereich der laminar-turbulenten Transition reduziert wird, hat dies speziell für die Anwendung mit geringem Kontrast zwischen den Strömungsbereichen eine große Auswirkung auf die Lokalisierung der Transitionsposition und erhöht die Messabweichungen.

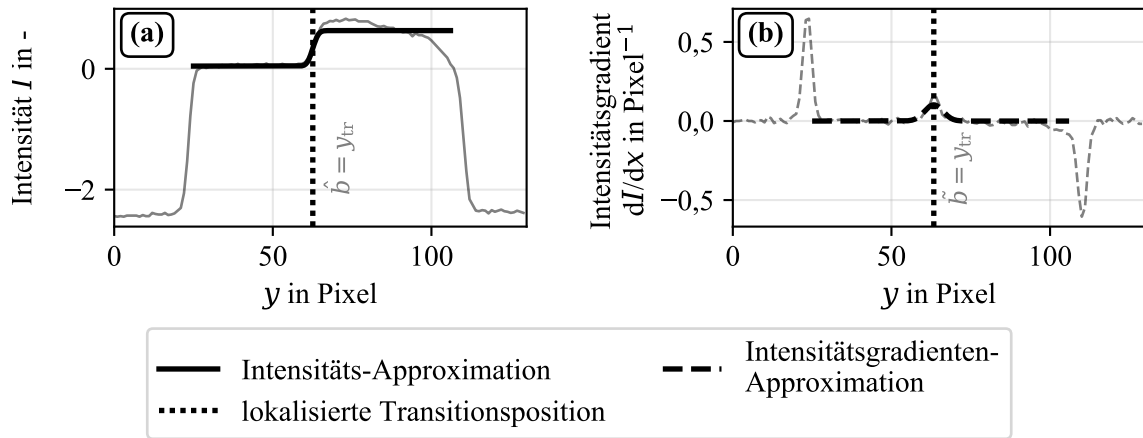


Abb. 2.18.: Zwei durch Dollinger et al. eingeführte Verfahren zur Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition entlang der Strömungsrichtung. (a) Die Approximation der Intensität mit der Verteilungsfunktion der Normalverteilung und (b) die Approximation des Intensitätsgradienten mit der Dichtefunktion der Normalverteilung. Die Position der laminar-turbulente Transition y_{tr} kann jeweils direkt anhand der Parameter \hat{b} bzw. \tilde{b} , der Position des Wendepunkts bzw. des absoluten Maxima, der approximierten Modellfunktion bestimmt werden [Dol2018a].

Zufällige Abweichungen

Mit einer Unsicherheitsfortpflanzungsrechnung schätzen Dollinger et al. die Unsicherheit der lokalisierten Transitionposition $\sigma_{y_{tr}}$ für verschiedene Unsicherheiten der Temperaturmessung eines einzelnen Bildpixels ab [Dol2018b]. Dabei wurde ein reziproker Zusammenhang zwischen der absoluten Temperaturdifferenz ΔT der beiden Strömungsbereiche und $\sigma_{y_{tr}}$ festgestellt. Des Weiteren sinkt $\sigma_{y_{tr}}$ mit der Unsicherheit der einzelnen Temperaturmessungen σ_{T_i} . Bei dem Vergleich der beiden eingeführten Lokalisierungsverfahren ergab sich zudem für die Approximation des Temperaturprofils eine geringere Unsicherheit, als bei der Approximation des Gradienten. Der Grund hierfür ist die Korrelation von benachbarten Werten bei der Bildung des Gradienten. Folglich schlussfolgern Dollinger et al., dass die Approximation des Temperaturverlaufs mit der Verteilungsfunktion der Normalverteilung die zu bevorzugende Methode zur Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition mit Subpixelaufösung ist [Dol2018b]. Für eine Temperaturunsicherheit auf dem Niveau des Temperaturrauschens von $\sigma_{T_i} = 0,034\text{K}$ und einem $\Delta T = 1\text{K}$ beträgt die geschätzte Messunsicherheit der Transition $\sigma_{y_{tr}} = 0,078\text{Pixel}$. Die Werte entsprechen einem CNR von ca. 20. Um die zufällige Abweichung der Lokalisierung der Transitionen zu bestimmen, werden die Lokalisierungen in den einzelnen Bildzeilen oder -spalten in der Strömungsvisualisierung als Wiederholungsmessungen behandelt und die Streuung der lokalisierten Positionen um die wahre Position bestimmt. Um eine nicht-orthogonale Lage der Transitionslinie zu der Auswerterichtung zu kompensieren, aus der in jeder Einzelauswertung einer anderen Position der Transition folgt, werden die gefundenen Transitionspalten der Einzelauswertungen zunächst durch eine Gerade approximiert. Voraussetzung hierfür ist die Annahme, dass die Transitionslinie geradlinig verläuft. Anschließend wird die zufällige Abweichung der Lokalisierung in der Aufnahme anhand der Standardabweichung der Einzelergebnisse um die Ausgleichsgerade bestimmt. In Windkanalexperimenten wurde eine tatsächliche zufällige Abweichung der lokalisierten Transitionspalten bei einer Temperaturdifferenz von $\Delta T = 0,6\text{K}$ und einer Transitionsbreite von 24 Pixel von $\sigma_{y_{tr}} = 0,56\text{Pixel}$ bestimmt. Grund für die höhere Abweichung in der realen Messung sind laut [Dol2018b] Fluktuationen der gemessenen Temperaturen T_i , die deutlich über dem Rau-

schen der Infrarotkamera liegen und natürliche Fluktuationen der Transitionsposition aufgrund von Turbulenzen und Unebenheiten auf der Rotorblattoberfläche.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die absolute Temperatur- bzw. Intensitätsdifferenz zwischen den Strömungsbereichen und die räumliche Fluktuation der gemessenen Werte kombiniert, um das CNR als Kennzahl zu bestimmen, vgl. Abschnitt 2.5.1. Eine Steigerung des CNR zwischen der laminaren und turbulenten Strömung tritt auf, wenn entweder die Intensitätsdifferenz erhöht oder die kombinierte räumliche Standardabweichung reduziert wird. Gemäß [Dol2018b] bewirkt ein höheres CNR somit eine geringere zufällige Abweichung bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition unter Verwendung der eingeführten Methoden. Neben dem CNR hat auch die Länge des Transitionsbereichs einen Einfluss auf die zufällige Abweichung der Lokalisierung. Demnach verursacht ein längerer Transitionsprozess bei gleichem CNR eine höhere zufällige Abweichung der Lokalisierungsverfahren [Dol2018a].

Systematische Abweichungen

Bisher unberücksichtigt bleibt die systematische Abweichung der von Dollinger et al. [Dol2018b] eingeführten Verfahren zur Lokalisierung der Transitionsposition. Es gilt die Annahme, dass der qualitative Verlauf der Intensität in Strömungsrichtung der Form der Approximationsmodelle entspricht. Ausgangspunkt für die Wahl der Approximationsmodelle ist der Verlauf des Wärmeübergangskoeffizienten. Wie in Abschnitt 2.2 eingeführt, entspricht der Verlauf des Wärmeübergangskoeffizienten dem des Reibungskoeffizienten. Ein Vergleich des exemplarischen verlaufs des Reibungskoeffizienten über einem aerodynamischen Profil in Abb. 2.6 und der verwendeten Modellfunktion der Intensitätsapproximation zeigt auf, dass die beiden Verläufe nicht identisch sind. Der Reibungskoeffizient nimmt sowohl im laminaren als auch im turbulenten Strömungsbereich mit der Lauflänge ab.

In Abb. 2.19 ist die thermografische Strömungsvisualisierung eines umströmten Tragflächenprofils aus einem Windkanalexperiment mit einer Strömungsrichtung von links nach rechts dargestellt. Aufgrund von Reibungen an den Kanalwänden liegt die Strömungstemperatur über der des Versuchsmodells. Als Resultat prägt sich das charakteristische Temperaturfeld auf der Oberfläche aus und erlaubt eine Unterscheidung der laminaren und turbulenten Grenzschichtströmung anhand eines sprunghaften Temperaturanstiegs im Bereich der laminar-turbulenten Transition. Die Lage der laminar-turbulenten Transition ist anhand eines deutlichen Anstiegs der Intensität bei $x_{tr} \approx 142$ Pixel zu erkennen. Innerhalb des laminaren Strömungsbereichs ist deutlich zu erkennen, dass kein homogenes Intensitätsniveau vorliegt, sondern ein systematischer Gradient entlang der Strömungsrichtung, analog zum Verlauf des Reibungskoeffizienten in Abb. 2.6, existiert.

In Abb. 2.20 (a) ist der Verlauf der Intensität I und in Abb. 2.20 (b) der Gradienten der Intensität dI/dx der mittleren Bildzeile in Abb. 2.19 entlang der Strömungsrichtung dargestellt. Des Weiteren ist in beiden Verläufen die jeweilige an die Messdaten approximierten Modellfunktion dargestellt. In Abb. 2.20 (a) ist eine deutliche Abweichung zwischen dem Verlauf der Intensität und dem Modell zu erkennen. Speziell im laminaren Strömungsbereich verläuft I nicht konstant, sondern nimmt stetig, näherungsweise linear, ab. Auch unmittelbar nach der laminar-turbulenten Transition prägt sich der turbulente Strömungsbereich nicht als konstantes Intensitätsniveau aus, sondern nimmt zunächst stetig zu. Diese Inhomogenitäten in den beiden Strömungsbereichen stellen eine Abweichung gegenüber der Verteilungsfunktion dar. Die Abweichung des realen Intensitätsverlaufs von der Modellfunktion vermindert das Potential einer automatischen Selbstzentrierung an dem Ort der laminar-turbulenten Transition. Als Resultat weist das Messergebnis der Transitionslokalisierung eine hohe systematische Abweichung auf, die in dem Beispiel von Abb. 2.20 (a) ca. 19 Pixel entspricht. Bezogen auf die dargestellte Sehnenlänge von $c = 250$ Pixel entspricht das einer relativen Abweichung von ca. 8 % c .

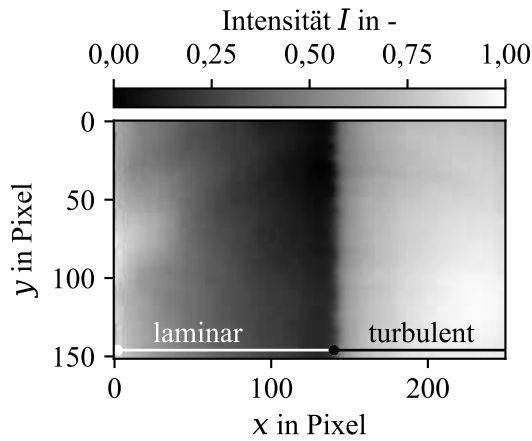


Abb. 2.19.: Beispiel einer thermografischen Strömungsvisualisierung der Grenzschichtströmung eines umströmten aerodynamischen Profils in einem Windkanalexperiment. Der laminare und turbulente Strömungsbereich kann anhand unterschiedlicher Intensitäten in der Aufnahme unterschieden werden. Eine Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition ist anhand des lokal begrenzten sprungartigen Anstiegs der Intensität in Strömungsrichtung möglich.

Die Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition durch die Approximation des Intensitätsgradienten mit der Verteilungsfunktion der Normalverteilung, dargestellt in Abb. 2.20 (b), ist dagegen deutlich robuster gegenüber einem nicht idealen Verlauf der Intensität bzw. Gradienten im Sinne der Modellfunktion. Das Merkmal eines globalen Maximums an dem Ort der laminar-turbulenten Transition ermöglicht eine Selbstzentrierung und somit Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition mit deutlich geringerer systematischer Abweichung von ca. 0,6 Pixel. Wird die natürliche laminar-turbulente Transition in mehreren einzelnen Auswertungen entlang der Bildzeilen oder -spalten in einer Strömungsvisualisierung lokalisiert, wird die systematische Abweichung aus der mittleren Entfernung der aus den Einzelergebnissen approximierten Gerade zur wahren Position der Transitionslinie berechnet.

Da eine Abweichung des verwendeten Approximationsmodells von dem Verlauf des Reibungskoeffizienten, vgl. Abb. 2.6, bzw. des tatsächlichen Intensitätsverlaufs, vgl. Abb. 2.20, existiert, hat ein komplexeres Modell das Potential eine Verringerung der Messabweichungen bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition zu bewirken. Für die zielgerichtete Parametrisierung eines komplexeren Modells auf Grundlage der strömungsphysikalischen und thermodynamischen Zusammenhänge ist zusätzliches, zum Teil schwer abzuschätzendes, Wissen erforderlich ist. Um das Potential eines komplexeren Modells hinsichtlich einer optimalen Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition auszunutzen, müssten Strömungsparameter zum Zeitpunkt der Messung berücksichtigt werden, um den Reibungskoeffizienten auf der Oberfläche abschätzen zu können. Hierzu zählen im Wesentlichen die momentane Strömungsgeschwindigkeit, der Angriffswinkel der Strömung, sowie die Geometrie des aerodynamischen Profils. Speziell in der Anwendung an WEA in Betrieb sind diese Parameter nicht bekannt oder nur mit erheblichen Aufwand zusätzlicher Messungen und Zugang zu Anlagendaten zu ermitteln. Sind die genannten Strömungsparameter und die Geometrie bekannt, wäre die Entwicklung eines Modellverlaufs auf Basis der Reynolds-Analogie denkbar. Der hierbei angenommene Zusammenhang zwischen Impuls- und Wärmetransport gilt jedoch für die Anwendung an gekrümmten Oberflächen mit Druckgradienten und einer Prandtlzahl $Pr \neq 1$ nur näherungsweise. Folglich stellt der Zusammenhang zwischen der Reibung und dem Wärmeübergangskoeffizienten in der Grenzschicht unter den gestellten Annahmen nur eine Näherung dar. Zusätzliche existieren weitere Querempfindlichkeiten, die eine Auswirkung

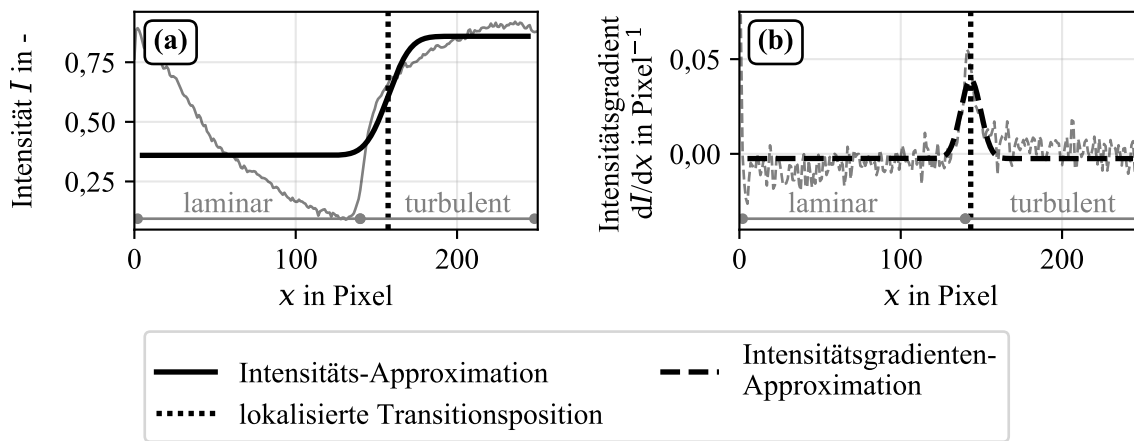


Abb. 2.20.: Beispiel der zwei eingeführten Lokalisierungsverfahren. (a) Approximation des Intensitätsverlaufs mit einer Verteilungsfunktion der Normalverteilung. (b) Approximation des Intensitätsgradienten mit einer Dichtefunktion der Normalverteilung. Bei der Approximation der Intensität ist eine hohe Abweichung der lokalisierten (senkrechter Strich) zur wahren Position der Transition $y_{tr} = 140$ Pixel zu erkennen. Grund hierfür ist eine hohe Abweichung des Intensitätsverlaufs von der Form der Approximationsfunktion. Die Lokalisierung basierend auf dem Intensitätsgradienten weist eine deutlich geringere Abweichung auf.

auf das sich ausprägende Temperaturfeld der Oberfläche haben. Turbulenzen in der Anströmung können variieren und im Freifeld nur schwer gemessen werden. Interne Wärmeleitung im Material des Messobjekts bewirkt speziell entlang der Strömungsrichtung in Bereichen mit einem hohen Gradienten des Wärmeübergangskoeffizienten zu einer Verwischung und resultieren in verringerte räumliche Temperaturgradienten. Abschließend kann die Oberflächenqualität in Form von geringen Rau- und Welligkeiten bei WEA in Betrieb nicht ohne Zusatzaufwand ermittelt werden. Eine weitere Möglichkeit zur Abschätzung des zu erwartenden Temperaturverlaufs in Strömungsrichtung ist eine numerischen Simulation der Strömungsmechanik (engl.: computational fluid dynamics, CFD). Neben einem sehr hohen rechnerischen Aufwand sind dafür ebenfalls die Parameter der Strömung und Geometrie erforderlich.

Um eine Anwendung der thermografischen Strömungsvisualisierung mit einer nur geringen Menge an erforderlichem Vorwissen in der Freifeldanwendung zu ermöglichen, wird daher zunächst der heuristische Ansatz mit den vorgestellten Approximationsmodellen weiter verfolgt. Dieser Ansatz basiert weiterhin auf dem lokalen Phänomen eines schlagartigen Temperaturanstieges an dem Ort der laminar-turbulenten Transition. So kann weiterhin eine robuste, automatisierte, sich selbst-zentrierende Lokalisierung ohne weiteres Vorwissen verfolgt und weiter entwickelt werden. Um die Abweichung bei der Lokalisierung ohne Änderung der Approximationsfunktion zu minimieren, wird folgende eine Erweiterung des Lokalisierungsverfahren vorgestellt.

Erweiterung des Lokalisierungsverfahrens

Es wurde gezeigt, dass eine Abweichung des Intensitätsverlauf von der Form des verwendeten Approximationsmodells zur systematischen Messabweichungen bei der Lokalisierung führt. Aus diesem Grund besteht der Bedarf, das Lokalisierungsverfahren auf Basis der heuristisch motivierten Approximationsmodelle zu erweitern, um systematische Messabweichungen bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition zu reduzieren.

Um den Einfluss des abweichenden Intensitätsverlaufs zu minimieren und die Transition als

lokales Phänomen zu betrachten, wird eine zweistufige Iteration des Lokalisierungsverfahrens eingeführt. Die erste Iteration verläuft wie bereits in Abschnitt 2.6 eingeführt: Der gesamte Intensitätsverlauf bzw. -gradient wird mit der jeweiligen Modellfunktionen approximiert, um ein erstes Ergebnis der Transitionslokalisierung mit den zu erwartenden Abweichungen zu erhalten. Trotz der systematischen Abweichungen wird angenommen, dass die laminar-turbulente Transition in einer ersten Annäherung korrekt lokalisiert wird, weshalb diese Position als Startparameter für die zweite Iteration des Lokalisierungsverfahrens verwendet wird. In der zweiten Iteration wird jedoch nicht das gesamte Intensitätsprofil, sondern nur ein ausgewählter Bereich um das Positionsergebnis der ersten Iteration approximiert. Als Größe des eingeschränkten Bereichs wird ca. $\frac{1}{3}$ der Sehnenlänge in der Aufnahme gewählt. Damit wird die Lokalisierung auf einen lokal begrenzten Bereich beschränkt und der Einfluss der Abweichungen des tatsächlichen Intensitätsverlaufs von den Approximationsmodellen minimiert.

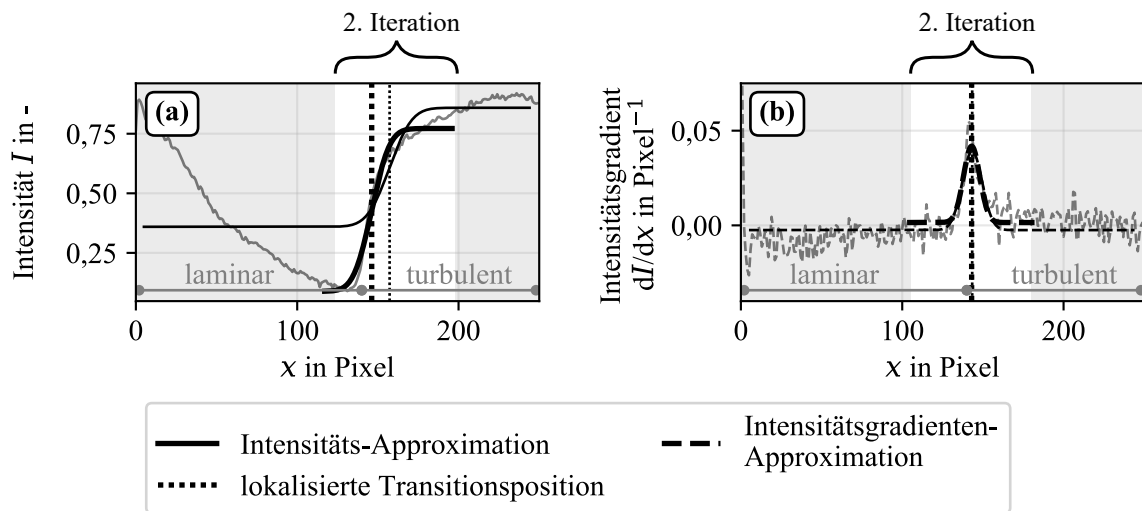


Abb. 2.21.: Zweistufiger Iterationsprozess der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition durch die Approximation des Intensitätsverlaufs (a) und Approximation des Intensitätsgradienten (b). 1. Iteration (dünne Approximation) approximiert den gesamten Verlauf und resultiert aufgrund der Abweichungen der Approximation und des Intensitätsverlaufs in eine hohe Abweichung der lokalisierten Transitionsposition (dünne vertikale Linie) von ca. 19 Pixel. 2. Iteration (dicke Approximation) in engerem Bereich (ca. $\frac{1}{3}c$) um das Lokalisierungsergebnis der 1. Iteration bei $x \approx 161$ Pixel. Die Abweichung der final lokalisierten Position (dicke vertikale Linien) ist gegenüber dem Ergebnis der 1. Iteration bei der Auswertung des Intensitätsverlaufs deutlich minimiert und beträgt nur 4 Pixel.

In Abb. 2.21 ist der gleiche Intensitätsverlauf wie in Abb. 2.20 dargestellt. Das bereits in Abschnitt 2.6 dargestellte Ergebnis der ersten Iteration des Approximationsverfahrens ist als dünne Linie dargestellte. Das Ergebnis der Transitionslokalisierung als dünne vertikale Linie. Basierend auf dieser Position wird in der eingeschränkte Bereich ausgewählt, in dem die zweiten Iteration der Apprximation der Intensität durchgeführt wird. Das Ergebnis der zweiten Approximation und daraus resultierendem Lokalisierungsergebnis ist als dicke Linie dargestellte. In Abb. 2.21 (a) ist zu erkennen, dass die Abweichung zwischen der zweiten Approximation und dem Intensitätsprofil deutlich verringert wurde. Die Abweichung der Lokalisierung beträgt nach der ersten Iteration ca. 19 Pixel und nach der zweiten Iteration ca. 4 Pixel. Zu beachten ist, dass der mehrstufige Iterationsprozess für die Approximation des Intensitätsgradienten keine signifikante Verbesserung aufgrund der schon zuvor hohen Robustheit gegenüber systematischen Gradienten im Intensitäts-

verlauf aufweist. Beide Iterationen resultieren in der gleichen lokalisierten Transitionsposition mit einer Abweichung von 0,6 Pixel.

In Kapitel 4 werden mit auf reale Messdaten basierende Simulationsdaten der Einfluss von Abweichungen des Intensitätsverlaufs von den Approximationsmodellen auf die zufällige und systematische Abweichung der Transitionslokalisierung untersucht. Hierfür werden zufälligen und systematischen Inhomogenitäten in den Thermografieaufnahmen erzeugt und die Abweichung der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition bewertet. Im Zentrum steht zudem die Fragestellung, wie spatio-temporale Bildauswertungen mit Verfahren der Merkmalsextraktion neben einer Steigerung der globalen Unterscheidbarkeit auch für eine Reduzierung der zufälligen und systematischen Abweichung der Transitionslokalisierung angewandt werden können.

2.6.2. Verfrühte Transition

Die eingeführten Lokalisierungsverfahren sind aus der Windkanalanwendung der thermografischen Strömungsvisualisierung motiviert, in der eine Kontamination der Oberfläche des Versuchsobjekts gezielt vermieden werden soll, die natürliche Transitionslinie ausprägt. Die Auswertungen des Intensitätsverlaufs entlang einer Bildzeile oder -spalte werden so orientiert, dass sie quer zu Transitionslinie verlaufen und sich ein maximaler Gradient am Ort der Transition ausprägt. Durch eine Approximation mit einer Modellfunktion sowie eine Erweiterung um eine mehrfache Iteration wird eine Subpixelauflösung und Reduzierung der systematischen Abweichungen erreicht.

An realen WEA kommt es aufgrund von lokalen Oberflächenstörungen und -kontamination jedoch oft zu einer verfrühten Transition, aus der sich sogenannten Turbulenzkeile ausprägen. In Abb. 2.22 ist eine schematische Skizze einer thermografischen Strömungsvisualisierung an einem Rotorblatt einer WEA dargestellt. Die Lage der natürlichen Transition ist als gestrichelte Linie in der Mitte der Oberfläche dargestellt. An mehreren Punkten auf der Oberfläche im laminaren Strömungsbereich sind Oberflächenimperfectionen dargestellt, die einen verfrühten Übergang von laminarer in turbulente Strömung bewirken. Hinter den Oberflächenstörungen prägt sich in Strömungsrichtung ein Turbulenzkeil aus, entlang dessen Flanken die Transitionslinie verläuft. Der tatsächliche Transitionsverlauf (schwarze Linie) beinhaltet somit neben Abschnitten der natürlichen Transition mehrere Bereiche mit verfrühten Transitionen.

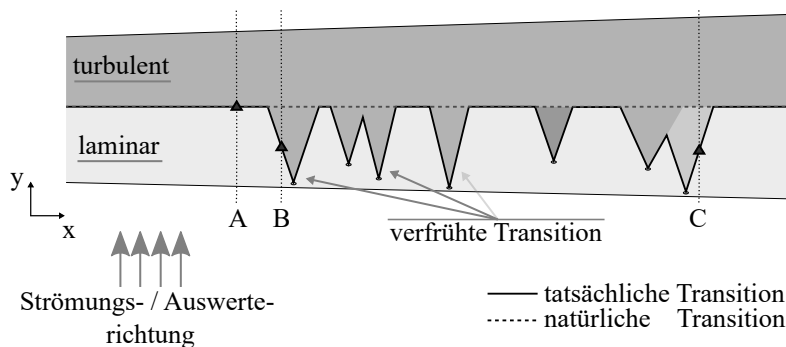


Abb. 2.22.: Skizze einer thermografischen Strömungsvisualisierung an einem WEA-Rotorblatt. Der laminare und turbulente Strömungsbereich ist aufgrund unterschiedlicher Intensitäten zu unterscheiden. Die natürliche Transition ist als geradlinige gestrichelte Trennlinie zwischen den Bereichen dargestellt. Mehrere Oberflächenstörungen lösen verfrühte Transitionen aus und erzeugen Turbulenzkeile im laminaren Strömungsbereich. Dadurch vergrößert sich der turbulente Oberflächenbereich. Die reale Transition inkl. den Turbulenzkeilen ist als schwarze Linie dargestellt.

Reduktion der laminaren Strömung

Da die turbulente Grenzschichtströmung einen höheren Reibungskoeffizienten als die laminare Strömung aufweist, verursacht sie einen größeren Anteil am Gesamtluftwiderstand des Rotorblatts und wirkt der erwünschten Auftriebskraft des aerodynamischen Profils entgegen, vgl. Abschnitt 2.1.2. Verfrühte Transitionen aufgrund von Oberflächenkontaminationen und die daraus resultierenden keilförmigen Flächenbereiche turbulenter Strömung innerhalb des laminaren Strömungsbereichs bewirken eine Reduktion der laminaren und Erhöhung der turbulenten Strömung. Die Quantifizierung der Reduktion der laminaren Strömung (engl.: laminar flow reduction - LFR) ist relevant für die Effizienzbewertung der WEA, da sie die Reduzierung des aerodynamischen Auftriebes und damit Effizienz der Energieumwandlung widerspiegelt. In Freifeldanwendungen konnte eine Reduktion der laminaren Strömung von ca. 60 % an einer 1,5 MW Anlage bei einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 6 ms^{-1} auf eine Reduzierung des jährlichen Energieertrages von ca. 5 % nachgewiesen werden [Dol2019].

Das LFR wird aus dem Verhältnis der theoretischen Position der natürlichen Transitionlinie $y_{\text{tr,nat}}$ ohne verfrühte Transitionen und der tatsächlich gemessenen Transitionlinie $y_{\text{tr,tats}}$ inklusive verfrühter Transitionen berechnet. Es wird der absolute Abstand zwischen der natürlichen Transition $y_{\text{tr,nat},i}$ und der tatsächlichen Transition $y_{\text{tr,tats},i}$ in jeder Bildspalte i betrachtet, vgl. Abb. 2.23. Dividiert durch den absoluten Abstand zwischen der sichtbaren Vorderkante (engl.: leading edge - LE) $y_{\text{LE},i}$ und der natürlichen Transition der jeweiligen Spalte ergibt sich der Parameter

$$\text{LFR}_i = \frac{|y_{\text{tr,tats},i} - y_{\text{tr,nat},i}|}{|y_{\text{LE},i} - y_{\text{tr,nat},i}|} \text{ in } [0, 1], \quad (2.36)$$

der die Reduktion der laminaren Strömung in der Spalte i im Vergleich zum Fall ohne verfrühte Transition quantifiziert. Wenn die Position der tatsächlichen Transition gleich der Position des natürlichen Transition ist, was bedeutet dass keine verfrühte Transition auftritt, gilt $\text{LFR}_i = 0$. Für eine verfrühte Transition in der Nähe der Vorderkante konvergiert LFR_i gegen 1.

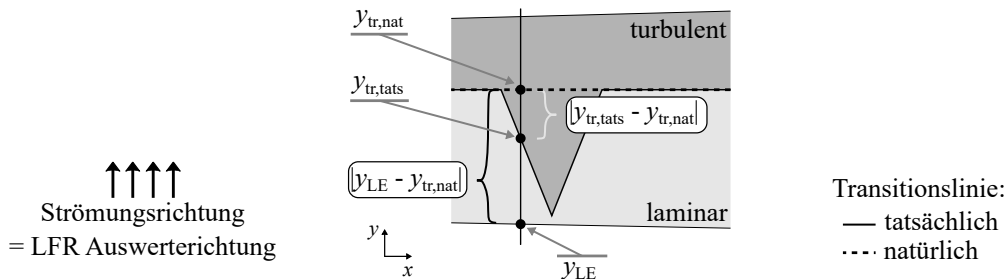


Abb. 2.23.: Skizze zur Berechnung der Reduktion laminaren Strömung LFR.

Zur Quantifizierung des durchschnittlichen LFR entlang des Rotorblattes bzw. des ausgewerteten Bildfeldes wird der Durchschnittswert des LFR über K Spalten betrachtet:

$$\overline{\text{LFR}} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \text{LFR}_i. \quad (2.37)$$

Eindimensionale Auswertung

Die eingeführten Methoden zur Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition verwenden einen eindimensionalen Ansatz, bei dem jede betrachtete Auswertelinie entlang der Strömungsrichtung individuell ausgewertet wird. Die Auswertung der Intensitätswerte wird senkrecht zur

Vorderkante durchgeführt, dargestellt in Abb. 2.22 als beispielhafte Auswertelinien A, B und C. Die Skizze stellt dar, dass der Strömungsübergang entlang der Flanken dieser Turbulenzkeile nicht mehr senkrecht zu den Auswertungslinien verläuft. In Kombination mit einem verlängerten Übergangsprozess [Sag2013] durch die erzwungene Transition aufgrund der Oberflächenstörung wird der Intensitätssprung zwischen den Strömungsbereichen im ausgewerteten Intensitätsverlauf abgeflacht.

Zur Veranschaulichung werden in Abb. 2.24 (a) und Abb. 2.24 (b) das Intensitätsprofil und der Intensitätsgradient der Auswertelinien A, B und C verglichen. Der Ort der Transition ist in allen Verläufen durch ein Dreieck dargestellt. Verlauf A ist ein Beispiel für einer natürlich Transition, die sich durch einen räumlich begrenzten, hohen Gradienten auszeichnet. Verlauf B weist dagegen eine verfrühte Transition auf. Durch den verlängerten Transitionsprozess und der nicht-orthogonalen Auswerterichtung zur Transition, erscheint der Bereich der Transition langgezogen und weist ein niedrigeren Gradienten auf, als die natürliche Transition in Verlauf A. Während der Temperaturgradient im Fall A an der Stelle des Temperaturgradientenmaximums ein räumlich enges Maximum bildet, ist das Gradientenmaximum im Fall B von einem konstanten Gradientenniveau umgeben. Zusätzlich kann eine schwächere Oberflächenverschmutzung wie ein Insekt, das vom Regen fast weggespült wird, oder ein winziger Oberflächendefekt einen weichen Turbulenzkeil mit einer Intensität erzeugen, die fast der des umgebenden laminaren Strömung entspricht, siehe den ganz rechten Turbulenzkeil in Abb. 2.22. Auch wenn der eigentliche Strömungsübergang verfrüht erfolgt, ist die stärkste Intensitätsstufe immer noch an der Stelle vorhanden, an der der Strömungsübergang ohne Oberflächenstörung stattfinden würde, siehe Verlauf C in Abb. 2.24.

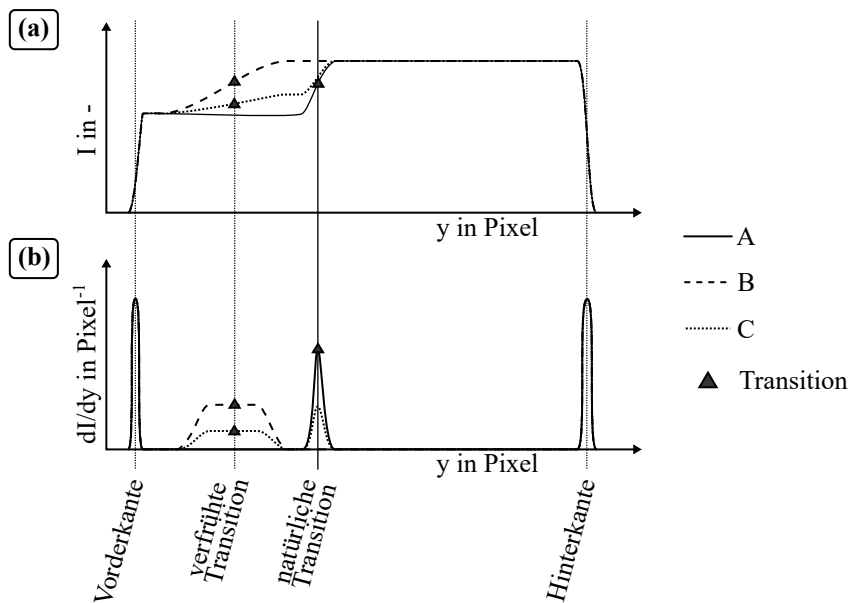


Abb. 2.24.: Verlauf der (a) Intensität und des (b) Intensitätsgradienten entlang der Bildspalten bzw. Auswertelinien A, B und C in Abb. 2.22. A: keine verfrühte Transition, B: verfrühte Transition mit starkem Turbulenzkeil und C: verfrühte Transition mit schwachem Turbulenzkeil. Der Lage der tatsächlichen Transition, definiert als der Ort des maximalen Gradienten würde in Fall C zu einer falschen Lokalisierung führen. In Fall B weist die Lokalisierung eine geringe Empfindlichkeit auf, da kein deutliches Maximum des Gradienten existiert.

Eine Anwendung der zuvor eingeführten Lokalisierungsverfahren auf die Intensitätsverläufe mit einer verfrühten Transition resultieren in erhöhte zufällige und systematische Abweichungen. Im

Fall eines starken Turbulenzkeiles (B), bewirkt der verlängerte Transitionsbereich im ausgewerteten Intensitätsprofil für beide Approximationsmethoden eine erhöhte zufällige Messabweichung bei der Lokalisierung [Dol2018a]. Für den Fall eines schwachen Turbulenzkeiles (C) ist zudem für beide Approximationsverfahren eine hohe systematische Abweichung zu erwarten, da der Verlauf wie im vorherigen Abschnitt dargestellt deutlich von der Modellfunktion des Approximation abweicht.

Eine Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition anhand des maximalen Gradienten resultiert folglich in Fall B in eine höhere Messunsicherheit, da sich, verglichen mit Fall A kein deutliches Maximum bildet. Infolgedessen erhöht sich die Messabweichung der Lokalisierung der Transitionslinie in Rotorblattabschnitten mit einer Oberflächenstörung und daraus resultierenden verfrühten Transitionen. Im Fall von schwachen Turbulenzkeilen resultiert eine Auswertung des maximalen Gradienten in eine hohe systematische Abweichung, da das Maximum des Gradienten an der Stelle der natürlichen Transition liegt und eine verfrühte Transition daher nicht detektiert wird.

In Abb. 2.25 ist eine thermografische Strömungsvisualisierung eines Rotorblattes einer WEA in Betrieb dargestellt. Aufgrund mehrere Oberflächenkontaminationen existieren mehrere unterschiedlich stark ausgeprägte Turbulenzkeile innerhalb des laminaren Strömungsbereichs. Das Lokalisierungsergebnis der zuvor eingeführten eindimensionalen Lokalisierungsverfahren der laminar-turbulenten Transition ist als gestrichelte Linie eingezeichnet. Es ist zu erkennen, dass die meisten verfrühten Transitionen nicht detektiert werden, sondern zum größten Teil die natürliche Transitionslinie lokalisiert wurde. Bei einer nachgestellten Quantifizierung der LFR würden die meisten turbulenten Flächenbereiche aufgrund von Turbulenzkeilen unberücksichtigt bleiben. Die Stand-der-Technik Methode zur Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition weist also in Bereichen mit verfrühten Transitionen eine hohe Abweichung gegenüber der tatsächlichen Transitionsposition auf.

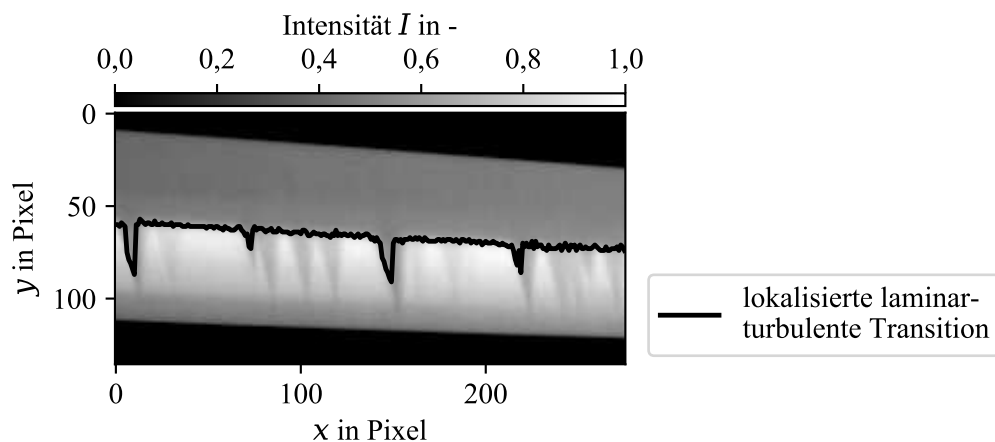


Abb. 2.25.: Thermografische Strömungsvisualisierung der Grenzschichtströmung auf einem Rotorblatt einer WEA in Betrieb. Mehrere Oberflächenkontaminationen lösen verfrühte Transitionen aus, aus denen Turbulenzkeile entstehen. Die Summe der Turbulenzkeilflächen stellt ein Maß für die Reduktion der laminaren Strömungsfläche aufgrund der Oberflächenkontaminationen dar. Die Stand-der-Technik Methode zur Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition erkennt die meisten Turbulenzkeile nicht oder nur mit hohen Abweichungen zur tatsächlichen Position der Transition.

Aus den hohen Abweichungen bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition in Bereichen von verfrühten Transitionen, resultiert eine Abweichung der quantifizierten Reduktion der laminaren Strömung aufgrund von Oberflächenkontaminationen. Daraus motiviert sich eine

Anpassung des Stand-der-Technik Methode zur Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition mit dem Ziel einer gesteigerten Empfindlichkeit gegenüber verfrühten Transitionen. Eine Reduzierung der Messabweichung bei der Lokalisierung von verfrühten Transitionen würde eine Senkung der Abweichung der LFR bewirken. Um dies zu erreichen, muss das Lokalisierungsverfahren an die Intensitätsverteilung in Bereichen verfrühter Transitionen bzw. Turbulenzkeilen angepasst werden. Im folgenden werden zwei neue Methoden zur Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition mit erhöhter Empfindlichkeit gegenüber verfrühten Transitionen vorgestellt. Die Verfahren basiert auf dem a priori Wissen über die Keilformen der Transitionslinie durch verfrühte Transitionen und einer Gradientenauswertung über beide Bilddimensionen.

Messprinzip zur Lokalisierung von verfrühten Transitionen

Um den Einfluss von Oberflächenstörungen auf die Grenzschichtströmung zu quantifizieren, kann der Messansatz in zwei Teile aufgeteilt werden: Die Lokalisierung der tatsächlichen Position der laminar-turbulente Transition inklusive verfrühter Transitionen in Abschnitt 2.6.2 und die Lokalisierung der natürlichen Transition, also die Lage der Transitionslinie ohne verfrüht auftretende Transitionen, in Abschnitt 2.6.2. Die aus beiden Auswertungen resultierenden Lageinformationen werden anschließend verwendet, um die LFR auf der Oberfläche des Rotorblattes zu quantifizieren, vgl. Gleichung (2.36).

Tatsächliche Transition

In einem ersten Schritt wird die tatsächliche Transition zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich durch die Identifizierung und Lokalisierung lokaler Maxima des Intensitätsgradienten in der Strömungsvisualisierung ermittelt. Wie in Abb. 2.22 dargestellt, kann die Transitionslinie entlang eines Rotorblattes bei Auftreten von verfrühten Transitionen in lineare Segmente mit drei verschiedenen Orientierungen ihrer Lage unterteilt werden, die der Steigung der einzelnen Segmente entspricht: Eine Orientierung folgt dem Verlauf der natürlichen Transitionslinie (nahezu parallel zur Vorderkante) und je eine Orientierung folgt den beiden Flanken der Turbulenzkeile, an denen verfrühte Transitionen auftreten. Aus der manuellen Analyse verschiedener thermografischer Strömungsvisualisierungen folgt, dass die beiden Winkel der Flanken der Turbulenzkeile in Bezug zur y -Achse unabhängig von der Größe oder dem Kontrast der einzelnen Keile sind. Im Folgenden werden zwei verschiedene Methoden der Gradientenauswertung vorgestellt, die a priori Wissen verwenden, um die lokalen Maxima der Intensitätsgradienten der tatsächlichen laminar-turbulente Transition mit maximaler Empfindlichkeit zu lokalisieren.

Methode A: Keine Bildrotation und 2D-Gradientenauswertung

Für jeden Bildpunkt werden die Temperaturgradientenkomponenten entlang der x - und y -Achse durch einen Gradientenfilter berechnet. Die Komponenten der Gradienten werden in Polarkoordinaten umgerechnet, sodass der Betrag und die Richtung jedes Gradienten erhalten wird. Anschließend werden diejenigen Gradienten ausgewählt, deren Richtung senkrecht zu einer der drei Orientierungen der Transitionslinie ist. Die so ausgewählten Gradienten werden dann nach ihrer Größe aussortiert, indem ein Schwellwert angewendet wird. Die Verwendung eines niedrigen Schwellenwerts ermöglicht die Erkennung von schwachen, kontrastarmen Turbulenzkeilen. Ein hoher Schwellenwert für die Auswahl von Gradienten, welche die natürlichen Übergängen repräsentieren, ermöglicht hingegen eine robuste Erkennung des natürlichen Transition in Bildspalten ohne verfrühte Transitionen. Das Ergebnis ist ein Lokalisierung derjenigen Gradienten, welche die tatsächliche Transitionslinie darstellen.

Methode B: Bildrotation und 1D-Gradientenauswertung

Eine direktere Nutzung des a priori Wissens wird durch eine Bilddrehung gemäß der Orientierungen der drei Transitionssegmente in Kombination mit einer 1D-Gradientenauswertung erreicht. Die Thermografieaufnahme wird so rotiert, dass die Richtungen der 1D-Gradientenauswertung senkrecht zu einer der Transitionssegmente ausgerichtet ist. Dadurch ist der Gradient der Intensität in der Auswertelinie für den Bildpunkt, an dem die Auswertung die Transitionlinie schneidet maximal. Diese Maximierung des Gradienten bewirkt eine maximale Empfindlichkeit und somit eine minimale Unsicherheit für die Lokalisierung des lokalen Maxima. Folglich wird die Originalaufnahme zwei gedreht, um jedes Übergangsliniensegment parallel zur x' -Achse der rotierten Aufnahme auszurichten, vgl. Abb. 2.26. In jeder Bildspalte wird der Gradienten in y' -Richtung berechnet und die lokalen Maxima lokalisiert. Die Ergebnisse sind die Positionen der lokalen Maxima der Gradienten in den drei rotierten Aufnahmen für die drei Orientierungen der verschiedenen Transitionssegmente. Die Verwendung unterschiedlicher Schwellenwerte ermöglicht die Erkennung von schwachen, kontrastarmen Turbulenzkeilen mit geringen Gradienten, welche die verfrühte Transition darstellen (niedriger Schwellenwert), und eine robuste Erkennung der natürlichen Transition in Bildspalten ohne verfrühte Transition (höherer Schwellenwert). Nach einer Rückrotation der Aufnahme und Kombination der Einzelergebnisse erhält man schließlich die tatsächliche Transitionslinie.

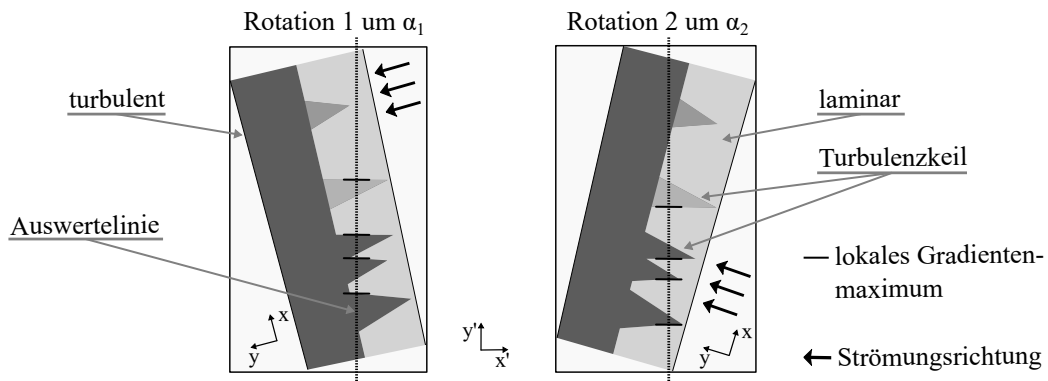


Abb. 2.26.: Rotation der Thermografieaufnahme um die Winkel α_1 und α_2 . Die vertikale Auswertelinie schneidet die Flanken der Turbulenzkeile, die Orte der verfrühten Transitionen, senkrecht und maximiert so das lokale Gradientenmaxima an diesen Positionen für eine maximale Empfindlichkeit bei der Lokalisierung.

Natürliche Transition

Neben Bereichen verfrühter Transition und einer Ausprägung von Turbulenzkeilen umfassen die tatsächlichen Transitionspositionen $y_{tr,tats,i}$ auch Bereiche, in denen die Transition auf natürliche Weise, also ohne Beeinflussung durch eine veränderte Oberfläche, auftritt. In diesen Transitionssegmenten bilden die Transitionen eine gerade Linie, die nahezu parallel zur Vorderkante verläuft. Aus diesem Grund wird die natürliche Transition aus den tatsächlichen Transitionspositionen $y_{tr,tats,i}$ mit Hilfe eines iterativen linearen Regressionsalgorithmus ermittelt, der sich robust gegenüber verfrühten Transitionen verhält. Es wird eine zufällige Teilmenge der $y_{tr,tats,i}$ -Positionen ausgewählt, aus der die anfängliche Regressionslinie berechnet wird. Auf der Grundlage ihrer Abstände zur Regressionslinie werden die $y_{tr,tats,i}$ -Positionen in die Neuberechnung der Regressionslinie einbezogen oder ausgeschlossen. Dieser iterative Prozess wird so lange fortgesetzt, bis der kumulative Abstandsfehler aller einbezogenen Positionen unter einem bestimmten Schwellenwert liegt. Anschließend wird der Algorithmus beendet und die endgültige Regressionslinie als

die Positionen $y_{\text{tr,nat},i}$ der natürlichen Transition über die Bildspalten $i = 1, \dots, J$ als Ergebnis ermittelt.

Die beiden eingeführten Verfahren zur mehrdimensionalen Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition mit erhöhter Empfindlichkeit bei verfrühten Transitionen besitzen das Potential, die Abweichung der Quantifizierung der LFR zu verringern. In Kapitel 5 werden daher die beiden Verfahren anhand Simulations- und echten Messdaten einer Freifeldmessung an einer WEA in Betrieb untersucht. Hierbei werden die Ergebnisse mit der Stand-der-Technik Methode der ein-dimensionalen Auswertung in Strömungsrichtung verglichen.

3. Erweiterung der Bildaufnahme

Diese Abschnitt umfasst die Beschreibung der hard- und softwareseitigen Erweiterungen der Bildaufnahme des thermografischen Messsystems für die Anwendung an WEA in Betrieb. In Abschnitt 3.1 werden die beiden im Theorieteil eingeführten Infrarotkamarasysteme experimentell verglichen und bzgl. des zu erreichenden SNR und CNR bei der thermografischen Strömungsvisualisierung untersucht. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Fragestellung, ob eine Veränderung des sensitiven Wellenlängenbereichs der Infrarotkamertechnik hin zu höheren Wellenlängen gewinnbringend für die thermografische Strömungsvisualisierung angewandt werden kann. Abschnitt 3.2 stellt das optische Messsystem zur Dreherkennung und positionsgenauen Triggerung der Infrarotkamera vor und bewertet, in wie fern damit Bildserien für die Anwendung von erweiterten Bildverarbeitungsmethoden zur Strömungsvisualisierung erzeugt werden können.

3.1. Infrarotkamera

Im folgenden Abschnitt werden die beiden Infrarotkamarasysteme verglichen. Einer experimentellen Rauschanalyse in Abschnitt 3.1.1 folgt ein direkter Vergleich des erreichbaren SNR und CNR zwischen einem laminaren und turbulenten Strömungsbereich bei der thermografischen Strömungsvisualisierung in einer Windkanal- und Freifeldanwendung, vgl. Abschnitt 3.1.2. Abschließend wird in Abschnitt 3.1.3 die Auswirkung auf die auftretende Bewegungsunschärfe in thermografische Strömungsvisualisierungen untersucht.

3.1.1. Messung des Temperaturrauschens

Detektorrauschen

Das zeitliche Detektorrauschen wird durch den Hersteller der Infrarotsysteme in Form des NETD auf 25 mK quantifiziert und bezieht sich auf eine Oberflächentemperatur von 30 °C. Da die Kamerasysteme in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen sensitiv sind, wirkt bei gleicher gemessener Oberflächentemperatur eine unterschiedlich hohe Strahlungsleistung auf den Detektor, vgl. Abschnitt 2.3.1. Aus diesem Grund weichen die vom Hersteller für eine optimale Ausnutzung der Auslesetechnik vorgeschlagenen Integrationszeiten voneinander ab, auf die sich auch die Angabe des NETD beziehen, vgl. Abschnitt 2.3.3. Um das zeitliche Detektorrauschen auch bei abweichender Oberflächentemperatur und die Auswirkung der Integrationszeit zu untersuchen, wird folgend eine experimentelle Untersuchung durchgeführt. Hierzu messen beide Infrarotkamaras eine gleichmäßig temperierte Oberfläche mit $T \approx 295,15\text{K} = 21,85\text{°C}$ und einem Emissionsgrad von $\varepsilon > 0,9$. Es wurden jeweils Bildserien von $K = 500$ Aufnahmen mit einer Frequenz von 100 Hz aufgenommen.

Zur Überprüfung der Herstellerangaben werden zunächst die vom Hersteller vorgegebenen optimalen Integrationszeiten für den Temperaturbereich von $t_{IT} = 1600\mu\text{s}$ für die mittelwellige und $t_{IT} = 449\mu\text{s}$ für die langwellige Infrarotkamera gewählt. Das zeitliche Detektorrauschen des Temperatursignals berechnet sich aus der Standardabweichung der Einzelwerte und beträgt bei einem ausgewählten exemplarischen Bildelement jeweils $\sigma_{T_{xy},\text{Detektor}} = 0,036\text{K}$ und $\sigma_{T_{xy},\text{Detektor}} = 0,022\text{K}$. Das arithmetische Mittel des Detektorrauschens über alle Detektorelemente beträgt

$\sigma_{T,\text{Detektor}} = 0,033\text{ K}$ und $\sigma_{T,\text{Detektor}} = 0,023\text{ K}$ für jeweils die mittelwellige und langweilige Infrarotkamera. Verglichen mit dem durch den Hersteller angegebenen $\text{NETD} < 0,025\text{ K @ } 30^\circ\text{C}$ und der Kenntnis eines ansteigenden Rauschanteils aufgrund des Photonenschrottauschs bei sinkenden Temperaturen, vgl. Abb. 2.12, liegt das gemessene zeitliche Rauschen der Temperaturmessung bei der langwelligen Infrarotkamera unter dem erwarteten Niveau. Das sich aus den Temperaturwerten $T_{xy}[j]$ und dem Detektorrauschen ergebene SNR, vgl. Gleichung (1.1), beträgt im Mittel über alle K Bilder $(\text{SNR})_{T_{xy}} = 9101$ für die mittelwellige Infrarotkamera. Für die langweilige Infrarotkamera ergibt sich ein Wert von $(\text{SNR})_{T_{xy}} = 13.165$ und ist damit um ca. 45 % höher. Da sich der Rauschanteil aufgrund des Photonenschrottauschs für die unterschiedlichen Integrationszeiten auf einem ähnlichen Niveau befindet, vgl. Abschnitt 2.3.3, ist die höhere Signalstärke aufgrund einer höheren Anzahl an detektierten Photonen sowie ein relativ dazu geringeres Dunkelstrom- und Ausleserauschen als Ursache für das höhere SNR zu vermuten.

Einfluss der Integrationszeit auf das SNR

Die experimentelle Ermittlung des SNR wurde für verschiedene Integrationszeiten t_{IT} wiederholt. Aufgrund der Begrenzung durch die maximale Ladekapazität der Auslesetechnik konnten nur in einem kleinen Bereich von $600\ \mu\text{s}$ bis $800\ \mu\text{s}$ mit identische Integrationszeit für beide Systeme gewählt werden. Abb. 3.1 stellt das mittlere SNR des Temperatursignals T_{xy} für verschiedene Integrationszeiten t_{IT} dar und vergleicht beide Infrarotkamerasysteme. Eine zu geringer Wert bei der Integrationszeit resultiert in ein schwaches Signal in der Thermografieaufnahme gegenüber den signalunabhängigen Rauscheinflüssen, während eine zu lange Integrationszeit eine Sättigung der Auslesetechnik zur Folge hat und das Maximum der detektierbaren Strahlungsenergie erreicht ist. Der Bereich für t_{IT} , der für beide Infrarotkameras gleichermaßen ausgewählt werden kann, ist in Abb. 3.1 grau markiert. Der jeweils vom Hersteller empfohlene, optimale Wert für t_{IT} bei einer Temperatur von 30°C ist durch den voll ausgefüllten Datenpunkt hervorgehoben.

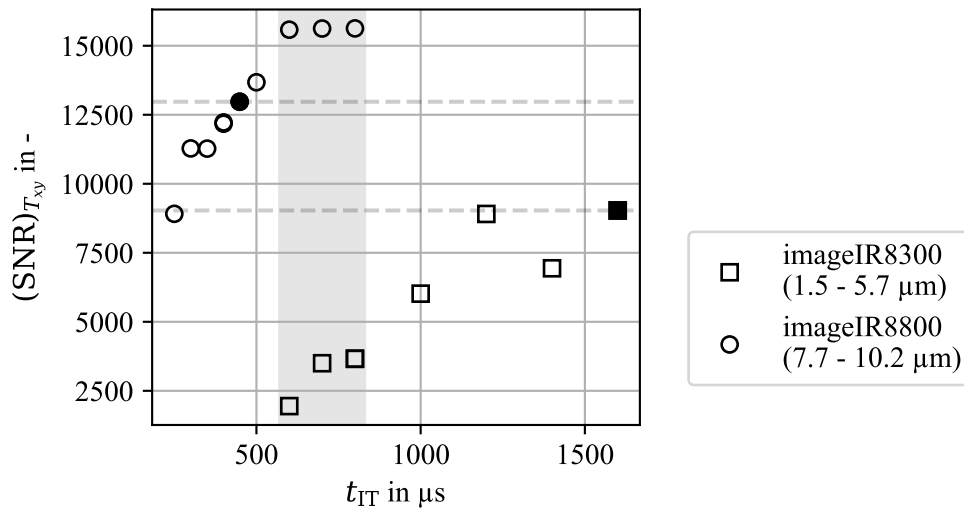


Abb. 3.1.: SNR bei der Messung einer konstanten Temperatur von $T \approx 295,15\text{ K} = 21,85^\circ\text{C}$ für verschiedene Integrationszeiten t_{IT} . Für den gegebenen Temperaturbereich vom Hersteller vorgegebene optimale Werte für von t_{IT} sind jeweils in schwarz ausgemalt dargestellt.

Für beide Infrarotkameras ist zunächst ein linearer, ansteigender Zusammenhang zwischen Integrationszeit und resultierendem SNR zu erkennen, bevor der SNR-Verlauf abflacht und ein Plateau erreicht. Der unterschiedliche Anstieg des SNR resultiert aus dem Unterschied der Steigung

der absorbierten Strahlungsenergie bzw. Anzahl an Photonen, die für beide Wellenlängenbereiche unterschiedlich hoch ist, vgl. Abschnitt 2.3.1. Die langwellige Infrarotkamera erreicht selbst für die kleinsten Integrationszeiten ein höheres SNR als die mittelwellige Kamera. Bei gleichen Integrationszeiten, z.B. $t_{IT} = 700\mu\text{s}$ erreicht die langwellige Kamera Infrarotkamera ein 4,5-fach höheres SNR. Die Anzahl an detektierten Photonen ist hingegen für die langwellige Infrarotkamera nur 3-Fach höher. Es resultiert eine höhere Signalstärke und geringeres relatives Rauschen gegenüber der Signalstärke. Darüber hinaus wurde bereits theoretisch erläutert, dass das Rauschen aufgrund des Photonenschrottrauschens bei gleicher Integrationszeit für die mittelwellige Infrarotkamera höher ausfällt, vgl. Abschnitt 2.3.3. In Abb. A in Anhang A ist exemplarisch der Verlauf des Temperaturrauschens aufgrund des Photonenschrottrauschens für die verschiedene Anzahl an emittierten Photonen bei verschiedenen Integrationszeiten dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Anzahl der emittierten Photonen mit der Integrationszeit linear verändert, das resultierende Temperaturrauschen jedoch nicht. Dies liefert einen weiteren Anhaltspunkt, dass der lineare Zusammenhang zwischen dem SNR und der Integrationszeit aus der ansteigenden Signalstärke aufgrund der Anzahl an emittierten bzw. detektierten Photonen entsteht und nicht aus Reduzierung des Photonenschrottrauschens begründeten Temperaturrauschens.

Bildrauschen

Um Inhomogenitäten zwischen den einzelnen Detektorelementen zu minimieren, wurde vor den Messungen eine NUC durchgeführt. Das in der Thermografieaufnahme verbleibende Bildrauschen T_{Bild} kann abgeschätzt werden, indem die Bildserie von $K = 500$ Bildern gemittelt wird. Die zeitliche Abweichung, also das Detektorrauschen jedes Temperaturwertes T_{xy} wird dadurch um den Faktor $1/\sqrt{J}$ reduziert. Verbleibende Unterschiede in den Signalwerten der Detektorelemente können durch den vernachlässigbaren Einfluss des Detektorrauschens folglich als das Bildrauschen aufgefasst werden. Ausgewertet werden erneut die Bildserien mit den optimalen Integrationszeiten $t_{IT} = 1600\mu\text{s}$ für die mittelwellige und $t_{IT} = 449\mu\text{s}$ für die langwellige Infrarotkamera. Das Detektorrauschen eines aus der Mittelung über die Bildserie errechneten Temperaturwertes \bar{T}_{xy} ergibt sich zu $\sigma_{\bar{T}_{xy},\text{Detektor}} = (1/\sqrt{J}) \cdot \sigma_{T_{xy},\text{Detektor}} = 0,0015\text{K}$ für die mittelwellige und $0,0010\text{K}$ für die langwellige Infrarotkamera. Da die Abweichung der gemessenen Temperaturwerte durch die Mittelung deutlich reduziert wurde, kann die räumliche Standardabweichung des aus der zeitlichen Mittelung entstehenden Bildes als Bildrauschen angenommen werden und beträgt $\sigma_{T,\text{Bild}} = 0,004\text{K}$.

Aus dem ermittelten Detektorrauschen $\sigma_{T_{xy},\text{Detektor}}$ und dem ermittelten Bildrauschen $\sigma_{T,\text{Bild}}$ ergibt sich das Gesamtrauschen der Temperaturmessung eines Detektorelements i gemäß Gleichung (2.29):

$$\sigma_{T_i} = \sqrt{(0,023\text{K})^2 + (0,004\text{K})^2} = 0,0233\text{K}. \quad (3.1)$$

Das vorhandene räumliche Rauschen in der Thermografieaufnahme wird folglich durch das zeitliche Detektorrauschen dominiert, was selbst bei unterschiedlichen Integrationszeiten unter dem Niveau des mittelwelligen Infrarotkamera liegt.

Die Möglichkeit bei einem für die thermografische Strömungsvisualisierung relevanten Temperaturbereich durch eine Detektion im langwelligen Infrarotbereich ohne eine Verringerung des SNR eine deutlich geringere Integrationszeit verwenden zu können, ermöglicht die Reduzierung von Bewegungsunschärfen bei der Bildaufnahme. Die Auswirkung auf die Bildgebung bei der thermografischen Strömungsvisualisierung wird in Abschnitt 3.1.3 untersucht.

3.1.2. SNR und CNR bei der thermografischen Strömungsvisualisierung

Um die zuvor betrachteten Ergebnisse bzgl. eines geringeren SNR der Temperaturmessung bei der langwelligen Infrarotkamera und die Auswirkung auf das CNR bei der Betrachtung unterschiedlicher Bildbereiche für die Anwendung zu validieren, wird eine thermografische Strömungsvisualisierung anhand von zwei Beispielmessung untersucht. Die erste Messung wird im Windkanal des BIMAQ an einem Model eines aerodynamischen Profils durchgeführt. Die zweite Messung ist eine Freifeldmessung an einer sich in Betrieb befindlichen WEA. In beiden Messungen wird das CNR zwischen der laminaren und turbulenten Oberflächenströmung untersucht und zwischen den eingeführten Infrarotkamarasystemen verglichen.

Windkanal

Die erste Untersuchung des CNR wird an einem Model eines aerodynamischen Profils des Typs *NACA0012* in einem Demonstrationswindkanal durchgeführt. Beide eingeführten Kamerasysteme werden simultan betrieben und betrachten den selben Oberflächenbereich des Models in Querströmung. Auf eine Angabe der Strömungsgeschwindigkeit v , der resultierenden Reynoldszahl Re_c sowie Anstellwinkel α_{aoa} des Profils wird an dieser Stelle verzichtet. Dies liegt zum einen an der Unbestimmtheit des Windkanals aufgrund von fehlender Messtechnik und zum anderen, da das Augenmerk dieser Untersuchung lediglich auf dem Unterschied des CNR zwischen verschiedenen Temperaturbereichen bei der Verwendung der unterschiedlichen Infrarotkamarasysteme liegt. In Abb. 3.2 sind die beiden thermografischen Strömungsvisualisierungen dargestellt. Abb. 3.2 (a) zeigt das Ergebnis der mittelwelligen Infrarotkamera und Abb. 3.2 (b) das der langwelligen Infrarotkamera.

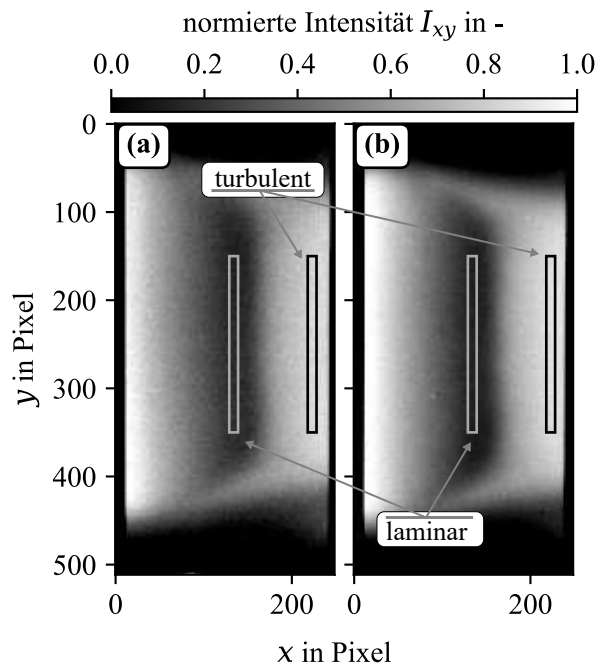


Abb. 3.2.: Vergleich zweier synchron aufgenommener Thermografieaufnahmen mit der (a) mittelwelligen und (b) langwelligen Infrarotkamera. Bereits eine visuelle Inspektion verdeutlicht ein geringeres Temperaturrauschen in (b) und daraus resultierendes höheres SNR der Bildgebung und CNR zwischen den Strömungsbereichen. Die Strömungsrichtung ist von links nach rechts gerichtet.

Beide Systeme sind mit der jeweils optimalen, vorgegebenen und im vorherigen Kapitel eingeführten Integrationszeiten von (a) $i_{IT} = 1600 \mu\text{s}$ und (b) $i_{IT} = 449 \mu\text{s}$ betrieben. Die Strömungsrichtung ist von links nach rechts gerichtet und die Strömungstemperatur wird für einen ausreichenden thermischen Kontrast über interne Heizmatten aufgewärmt. Als Resultat ist in beiden Aufnahmen ein deutlicher Temperaturanstieg in Strömungsrichtung an dem Ort der laminar-turbulenten Transition bei $x \approx 160$ Pixel zu erkennen. Da lediglich ein Vergleich des laminaren und turbulenten Strömungsbereichs in der Visualisierung angestrebt ist, werden die Pixelwerte separat für jede Aufnahme jeweils auf das Intervall $[0, 1]$ normiert. Zudem ist für jede Aufnahme jeweils ein Auswertebereich für die laminare (niedrige Intensität) und ein Bereich für die turbulente (hohe Intensität) Strömung markiert, welche die Grundlage für die Quantifizierung der Kennzahlen bietet. Hierbei gilt zu beachten, dass die Normierung beider Aufnahmen getrennt vorgenommen wird. Daher können die Angaben zur räumlichen Standardabweichung nicht zwischen den Aufnahmen verglichen werden, da diese mit der Spannweite des kleinsten und größten Intensitätswertes mit skaliert wird.

Die für die jeweiligen Auswertebereiche quantifizierten Kennzahlen sind in Tab. 3.1 aufgelistet. Für die jeweiligen Bereiche wird gemäß Gleichung (1.1) aus der mittleren Intensität \bar{I} und der räumlichen Standardabweichung s das SNR berechnet. Bei dem Vergleich zwischen den Infrarotkameras ist zu erkennen, dass das SNR erwartungsgemäß in beiden Auswertebereiche bei der langwelligeren Infrarotkamera größer ist. Als Konsequenz ergibt sich für die langwellige Infrarotkamera zwischen laminarem und turbulentem Strömungsbereich mit $\text{CNR}_{a-b} = 11,90$ ein um ca. 50 % höheres CNR, als für die mittelwellige Infrarotkamera mit $\text{CNR}_{a-b} = 8,05$.

In Abb. 3.3 ist das CNR zwischen den beiden Auswertebereichen a und b des Windkanal-Experimentes in Abhängigkeit von der Integrationszeit t_{IT} dargestellt. Der Verlauf des CNR zwischen den Auswertebereichen ist analog zum Verlauf des SNR der beiden Infrarotkameras im vorherigen Abschnitt. Das CNR steigt stetig in einem linearen Zusammenhang mit der Integrationszeit an. Dabei ist zu erkennen, dass der Anstieg des CNR-verlaufs für die langwellige Infrarotkamera größer ausfällt. Dies lässt sich, wie zuvor beim SNR, durch den stärkeren Anstieg der mittleren, emittierten Photonenzahl im höheren Wellenlängenbereichen der Infrarotkamera, vgl. Abb. 2.9

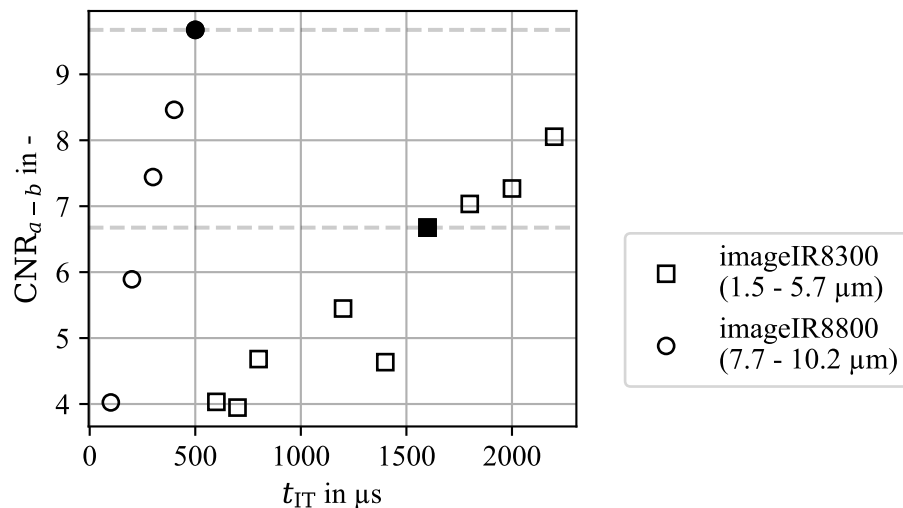


Abb. 3.3.: CNR zwischen den beiden markierten Strömungsbereichen in Abb. 3.2 bei verschiedene Integrationszeiten t_{IT} . Für den Temperaturbereich vom Hersteller vorgegebene idealer Wert für t_{IT} ist jeweils in schwarz ausgemalt dargestellt.

Tab. 3.1.: Kennwerte der thermografischen Strömungsvisualisierung in Abb. 3.2. Die langwellige Infrarotkamera erreicht ein höheres SNR und CNR zwischen den Strömungsbereichen.

	Bereich a/b	\bar{I}	s	SNR	$\Delta\bar{I}$	s_{a-b}	CNR_{a-b}
(a) mittelwellige Infrarotkamera	laminar	0,17	0,06	2,70	0,68	0,08	8,05
	turbulent	0,84	0,06	14,56			
(b) langwellige Infrarotkamera	laminar	0,13	0,04	3,05	0,74	0,06	11,90
	turbulent	0,88	0,04	19,99			

Freifeld

In Abb. 3.4 ist beispielhaft eine thermografische Strömungsvisualisierung einer sich in Betrieb befindlichen WEA dargestellt. In den beiden Aufnahmen (a) und (b) wurde jeweils die mittelwellige bzw. langwellige Infrarotkamera mit den vom Hersteller vorgegebenen optimalen Integrationszeiten von 1600 μs und 449 μs verwendet. Die Aufnahmen sind jeweils zwischen den minimal und maximalen Intensitätswerten der abgebildeten Rotorblattoberfläche normiert. Der Wertebereich zwischen laminarer und turbulenter Oberfläche liegt in beiden Aufnahmen zwischen 0 und 1. Die relative Strömungsrichtung ist von unten nach oben und die natürliche laminar-turbulente Transition ist anhand eines deutlichen Temperaturabfalles in Strömungsrichtung zu erkennen. Die thermischen Verhältnisse sind invers zu der thermografischen Strömungsvisualisierung in dem Windkanalexperiment, da im Freifeld die Strömung eine geringer Temperatur aufweist als die durch die Sonne erwärmte Oberfläche.

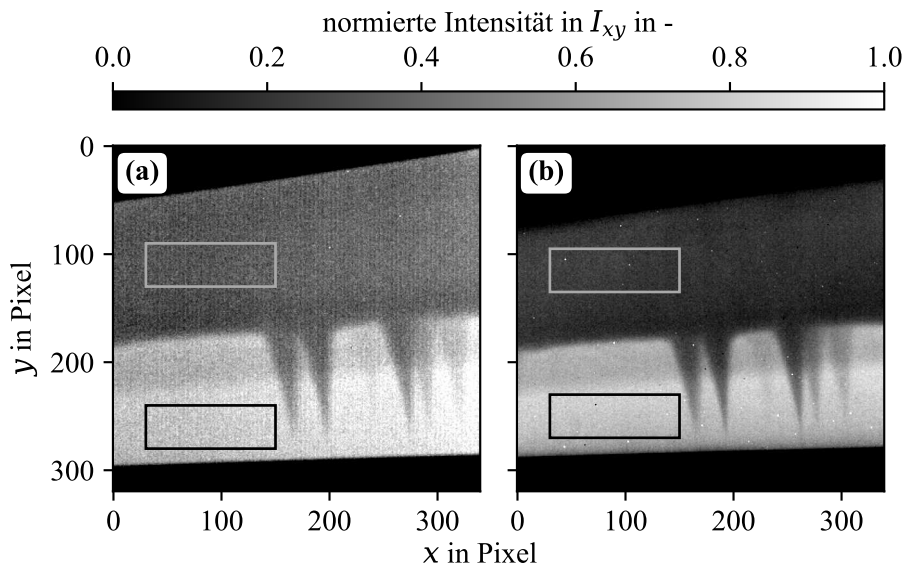


Abb. 3.4.: Beispielaufnahmen einer thermografische Strömungsvisualisierung mit der (a) mittelwelligen und (b) langwelligen Infrarotkamera. Die Wertebereiche der Pixelintensitäten I_{xy} sind jeweils zwischen $[0, 1]$ normiert. Das SNR in den markierten Auswahlbereiche, sowie das CNR zwischen den Auswahlbereichen ist in (b) höher aus. Durch die Verwendung der langwelligen Infrarotkamera konnte eine Steigerung des CNR um den Faktor 2 erreicht werden.

Im Bereich der rein laminaren und rein turbulenten Strömung ist jeweils ein Auswertebereich markiert, anhand derer das CNR zwischen den Strömungsbereichen quantifiziert wird. Für die

mittelwellige Infrarotkamera ergibt sich ein $\text{CNR}_{a-b} = 3,80$ und für die langwellige Infrarotkamera mit 7,58 eine Verdoppelung des CNR. Der Grund für eine Verdoppelung des CNR gegenüber der ca. 50 % Steigerung in dem Windkanalexperiment ist auf die höhere Transmissivität im langwelligeren Infrarotbereich zurück zu führen, vgl. Abschnitt 2.3.1.

Tab. 3.2.: SNR des laminaren und turbulenten Strömungsbereichs, sowie CNR zwischen den Strömungsbereichen in der thermografische Strömungsvisualisierung in Abb. 3.4. In der Aufnahme der langwelligen Infrarotkamera ist das SNR der Strömungsbereiche und das resultierende CNR gesteigert.

	Bereich a/b	SNR	CNR_{a-b}
(a) mittelwellige Infrarotkamera	laminar	9,29	3,80
	turbulent	4,40	
(b) langwellige Infrarotkamera	laminar	13,81	7,58
	turbulent	5,30	

Es konnte gezeigt werden, dass die zuvor in Abschnitt 2.3 vorgestellten Vorteile einer Detektion im langwelligeren Infrarotbereich bei der Anwendung der thermografischen Strömungsvisualisierung in einem Windkanalexperiment eine 50 %-ige Steigerung und in einem Freifeldexperiment einer Verdoppelung des CNR zwischen der laminaren und turbulenten Strömung ermöglicht.

3.1.3. Bewegungsunschärfe

Durch die größere detektierte Energiemenge im langwelligeren Infrarotbereich, besteht die Möglichkeit bei gleicher Objekttemperatur eine geringere Integrationszeit zu verwenden, um ein gleiches SNR zu erreichen. Eine geringere Integrationszeit bewirkt bei existierenden Relativbewegungen des Messobjekt und Messsystems, wie es bei der thermografischen Strömungsvisualisierung der Fall ist, dass die Bewegungsunschärfe verringert wird. Die die Abb. 3.4 dargestellten thermografischen Aufnahmen wurden mit den jeweils vom Hersteller als optimal angegebenen Zeiten von $1600 \mu\text{s}$ bzw. $449 \mu\text{s}$ für die jeweils mittel- und langwellige Infrarotkamera betrieben. Eine nähere Untersuchung des Transitionsbereichs ermöglicht eine Betrachtung der Unterschiede bei der Bewegungsunschärfe. In Abb. 3.5 sind die Intensitätsverläufe im Bereich der laminar-turbulenten Transition aus beiden Aufnahmen in Abb. 3.4 entlang der Bildspalte $x = 100$ dargestellt. Für beide Verläufe ist analog zu den Lokalisierungsverfahren in Abschnitt 2.6 eine Approximation mit der Verteilungsfunktion der Normalverteilung durchgeführt. Es ist zu erkennen, dass die Intensitätsstufe zwischen den Strömungsbereichen im Fall der mittelwelligen Infrarotkamera mit einer Integrationszeit von $t_{IT} = 1600 \mu\text{s}$ früher beginnt und später endet, als der Verlauf mit der kürzeren Integrationszeit bei der langwelligen Infrarotkamera. Da beide Aufnahmen zum gleichen Zeitpunkt aufgenommen wurden, ist die momentane Umdrehungsgeschwindigkeit des Rotorblattabschnittes identisch. Die unterschiedliche Breite der Strömungsübergänge ist folglich nur auf die resultierende Bewegungsunschärfe zurückzuführen. Als Quantifizierung für die Transitionsbreite wird das vierfache des Parameters \hat{c} verwendet, der die zweifache Sigma-Umgebung der Verteilungsfunktion der Normalverteilung beschreibt. In diesem Bereich wird das untere bzw. obere Niveau des Intensitätsverlaufs zu 95,45 % erreicht. Für die dargestellte Messung ergibt sich so eine Transitionsbreite von 14 Pixel für die mittelwellige Infrarotkamera und 12 Pixel für die langwelligen Infrarotkamera mit der geringeren Integrationszeit. Dollinger et al. [Dol2018a] analysierten die Auswirkung der dargestellten Transitionsbreite in der Thermografieaufnahme auf die Unsicherheit der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition. Das Ergebnis ist, dass ein län-

gerer Übergang eine Steigerung der Lokalisierungsunsicherheit zur Folge hat. Aus diesem Grund ist eine möglichst kurze Darstellung der laminar-turbulenten Transition erstrebenswert. Die Bewegungsunschärfe wirkt dieser Zielsetzung entgegen, weshalb die Bewegungsunschärfe aufgrund der verwendeten Integrationszeit minimiert werden sollte.

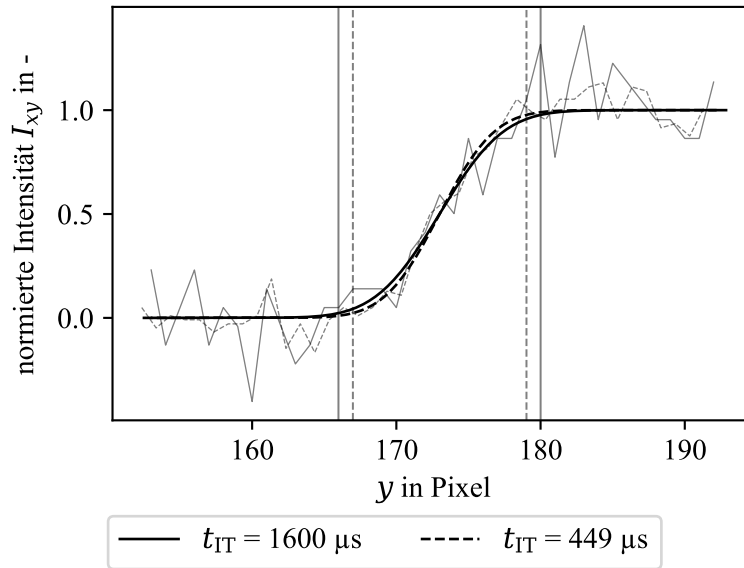


Abb. 3.5.: Vergleich des Transitionsbereichs in der Bildspalte $x = 100$ der beiden Thermografieaufnahmen aus Abb. 3.4. Der Transitionsbereich wurde jeweils mit der Verteilungsfunktion der Normalverteilung approximiert. Die unterschiedliche Steigung der approximierten Verläufe im Bereich der Transition ist auf die unterschiedlich große Bewegungsunschärfe aufgrund der unterschiedlichen Integrationszeiten der Infrarotkamerasysteme zurückzuführen. Vertikale Linien markieren die 2σ Grenzen um den Wendepunkt der Verteilungsfunktion.

Für eine Temperatur von $T = 21,85^\circ\text{C}$ wurde exemplarisch dargestellt, dass die Verwendung der langwelligen Infrarotkamera der mittelwelligen zu bevorzugen ist. Bei gleichen optischen Parametern aber den verwendeten unterschiedlichen optimalen Integrationszeiten liegt der Einfluss des Photonenschrottauschs auf das zeitliche Detektorrauschen bei der langwelligen Infrarotkamera zwar über dem des mittelwelligen Systems, vgl. Abschnitt 2.3.3, jedoch lässt sich ein eindeutig höheres SNR nachweisen. Das höhere SNR der langwelligen Infrarotkamera lässt sich folgend nur durch die höhere Signalstärke bzw. Anzahl an Photonen der detektierten Strahlung im längerwelligen Infrarotbereich erklären. Voraussetzung hierfür ist, dass dominante Anteil am zeitlichen Detektorrauschen signalunabhängig sind oder nicht proportional mit der Signalstärke ansteigen. Für die unterschiedlichen Integrationszeiten, entsprechend der optimalen Werte zur Ausnutzung des Dynamikbereichs, ist das SNR der langwelligen Infrarotkamera trotz geringere Integrationszeit 45 % höher. Vorteile neben dem besseren SNR sind hierbei eine 3,6-fach schneller Bildaufnahme, die zu reduzierten Bewegungsunschärfen führt, vgl. Abschnitt 3.1.3.

3.2. Rotorposition-Trigger

Die Aufnahme einer Serie von Thermografieaufnahmen einer statischen Grenzschichtströmung ermöglicht eine Vielzahl an Vorteilen gegenüber der Auswertung von Einzelaufnahmen. Durch eine zeitliche Mittelwertbildung können zufällige Abweichungen der einzelnen gemessenen Tem-

peraturen und damit das räumliche Rauschen in den Aufnahmen reduziert werden. Da die räumlich mittlere Intensität davon unberührt bleibt, resultiert dies in eine Steigerung des CNR zwischen unterschiedlichen Strömungsbereichen. Des Weiteren können zeitliche Fluktuationen durch Berechnung der Standardabweichung oder harmonische Schwingungen mit Hilfe einer Fourier-Transformation ausgewertet werden [Dol2018c]. Darüber hinaus ermöglicht eine Bildserie eine Auswertung mit Verfahren der Merkmalsextraktion, da Varianzen unterschiedlicher Bildbereiche zeitlich aufgelöst werden.

Die Aufnahme einer Bildserie einer unveränderlichen Grenzschichtströmung ist in Windkanal-experimenten trivial, da keine Relativbewegung zwischen Messobjekt und Infrarotkamera existiert und die Strömungsparameter näherungsweise konstant sind. In Freifeldexperimenten an WEA in Betrieb ist aufgrund der Relativbewegung der am Boden positionierten Infrarotkamera und dem Rotorblatt ein Triggersystem erforderlich, welche das Neuauslösen der Infrarotkamera nach einer vollständigen Umdrehung des Rotors ermöglicht, sodass die sichtbare Rotorblattoberfläche immer die gleiche Position in der Serie von Aufnahmen einnimmt.

Für diesen Zweck wurde ein optisches Messsystem entwickelt, welches die Drehbewegung einer WEA in Betrieb in Echtzeit detektiert und bei einer bestimmten Rotorblattposition ein Triggersignal an die Infrarotkamera ausgibt. Die Anforderung an das Triggersystem für eine typische Messsituation der thermografischen Strömungsvisualisierung ergibt sich aus dem IFOV, dem Messabstand und der Umdrehungsgeschwindigkeit des Rotors. Die Winkelabweichung des Rotorblattes zum Zeitpunkt zweier aufeinanderfolgender Aufnahmen darf hierbei nicht den Wert überschreiten, bei dem das Rotorblattabschnitt in der Folgeaufnahme nicht mehr vollständig abgebildet wird. Abgeschätzt für typische Parameter einer Freifeldanwendung und der maximalen Umlaufgeschwindigkeit an der Spitze eines Rotorblattes, ergibt sich eine maximal zulässige Winkelabweichung von ca. 3° . Die restliche Positionsabweichung der Rotorblattoberfläche zwischen den Einzelaufnahmen wird anschließend mit Hilfe eines Bildausrichtungsverfahrens, basierend auf einer enhanced correlation coefficient (ECC)-Maximierung, korrigiert [Eva2008].

3.2.1. Methodik

Die Kernaufgabe bei der optische Dreherkennung des Rotors einer WEA ist die Transformation der Drehbewegung des Rotors im dreidimensionalen Raum in die zweidimensionale Kameraebene. Sofern die Drehachse des Rotors und die Normale der Kameraebene nicht koaxial zueinander stehen, bildet die Kreisbewegung in der zweidimensionalen Projektion auf der Kameraebene eine Ellipse [He2012]. Bei bekannter Brennweite und Sensorgröße der Kamera und Radius des Rotors kann so die Transformation zwischen Kamera- und Rotorebene algebraisch berechnet werden (siehe Anhang B). Mit der berechneten Transformation kann jeder zu den Blattspitzen konzentrische Kreis mit beliebigem Radius zurück in die Kameraebene projiziert werden. Da ein Rotorblatt naher der Nabe die größte Stabilität und damit die geringste Verbiegung während des Betriebes aufweist, wird ein Kreis mit kleinem Radius definiert. Durch die bekannte Transformation wird der Kreis in die Kameraebene projiziert und mit den in der Kamera sichtbaren Vorderkante der drei Rotorblätter geschnitten. Diese Schnittpunkte auf der Ellipse in der Kameraebene werden anschließend zurück in die Rotorebene transformiert und ihr Position relativ zum Drehpunkt der Rotorebene ausgewertet. So wird für jedes Rotorblatt eine momentane Lage in der Rotorebene und damit im dreidimensionalen Raum bestimmt. Aus der Differenz zweier aufeinanderfolgender ausgewerteten Positionen wird die momentane Umdrehungsgeschwindigkeit des Rotors berechnet. Aus der Geschwindigkeit und aktuellen Winkelposition eines Rotorblattes wird schlussendlich die Bewegung des Rotorblattes extrapoliert, um gezielt Triggersignale bei definierten Winkelpositionen eines Rotorblattes zu erzeugen, die an die Infrarotkamera weiter gegeben werden und eine Aufnahme auslösen. Eine Definition der Winkelposition des Rotors einer WEA kann Anhang B entnommen werden.

3.2.2. Implementierung

Transformation der Rotorebene in die Kameraebene

Um die Transformation zwischen dem Bezugssystem in der Rotorebene und dem Bezugssystem in der Kameraebene zu berechnen, ist zunächst die Detektion der elliptischen Drehbewegung des Rotors in den Kameraaufnahmen erforderlich. Wolken im Hintergrund der WEA, sowie andere Objekte im Bild erschweren die Wahl eines Grenzwertes für eine Binarisierung zur Freistellung des Rotors. Zudem müsste der Grenzwert für jede neue Mess- und Wettersituation dynamisch angepasst werden, um eine zuverlässige Segmentierung zu ermöglichen. Aus diesem Grund wird sich die Bewegung des Rotors zu Nutze gemacht, indem die Differenz aufeinanderfolgender Aufnahmen gebildet wird [Nis2011]. In dem resultierenden Differenzbildern sind nur die Bildbereiche, in denen sich die Vorder- und Hinterkante des sich bewegenden Rotorblattes bewegt haben mit einer positiver bzw. negativen Amplitude dargestellt. Werden negative Werte ignoriert, so bildet das Differenzbild den Bereich ab, in dem sich die Vorderkante zwischen den beiden Einzelaufnahmen voranbewegt hat. Die Aufsummierung der so erzeugten Differenzbilder stellt nach ca. $\frac{1}{3}$ -Umdrehung des Rotors die auf der Kameraebene abgebildete Rotorfläche in Form einer Ellipse dar.

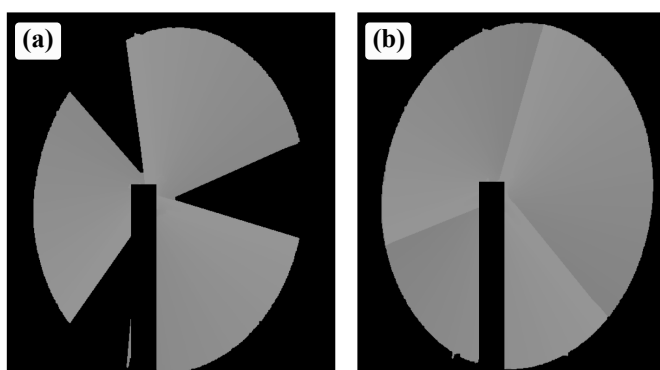


Abb. 3.6.: Differenzbildbildung bei der optischen Dreherkennung an einer WEA. Nach ca. $\frac{1}{3}$ -Umdrehung des Rotors bildet die Aufsummierung der Differenzbilder (b) eine vollständige Ellipse anhand deren Kontur die perspektivische Projektion der kreisförmigen Rotorfläche auf der Kameraebene detektiert werden kann.

Mit Hilfe des in Anhang B beschriebenen Verfahren nach Dhome et al. [Dho1990] kann aus dem so ermittelten projizierten Kreis in Form einer dargestellten Ellipse in der Kameraebene die Lage der Rotationsebene bestimmt werden. Eine Voraussetzung für die korrekte Berechnung der Entfernung des Rotors ist hierbei, dass der Radius bekannt ist. Für die Lokalisierung der momentanen Winkelposition eines Rotorblattes ist hingegen die absolute Entfernung des Rotors vom Kamerasystem nicht relevant. Daher wird als Radius eine Länge von 1 m angenommen. Ein weiteres Ergebnis der Transformationsberechnung zwischen Rotor- und Kameraebene ist die Berechnung des projizierten Drehmittelpunktes des Rotors in der Kameraaufnahme, da dieser vom Mittelpunkt der erkannten Ellipse abweicht [He2012] und für nachfolgende Arbeitsschritte relevant ist.

Detektion der Rotorblattposition

Durch die bekannte Transformation zwischen Rotor- und Kameraebene können nun Kreisbahnen um das Drehzentrum der Rotorebene mit beliebigen Radien definiert und auf die Kameraebene projiziert werden. Hierfür wird der starre, von Verformungen größtenteils unbeeinflusste Teil

der Rotorblätter nahe der Blattwurzel gewählt. Auf der Kameraebene Ellipsen bildend werden diese Bahnen mit dem letzten Differenzbild der Rotorblattvorderkanten geschnitten, um so die Position der Rotorblätter auf diesen Ellipsenbahnen in der Kameraebene zu bestimmen. Zurück auf die Rotorebene projiziert, können diese lokalisierten Vorderkantenpunkte der Rotorblätter genutzt werden, um den Rotationswinkel der Blätter zu bestimmen. Hierzu wird aus den lokalisierten Vorderkantenpunkte und dem Drehzentrum eine Geraden gebildet, deren Winkel zur Senkrechten berechnet wird. Der mittlere Winkel dieser Geraden pro Rotorblatt wird als momentane Winkelposition definiert und folgt der Definition in Abb. B.1. Der positive Drehsinn ist hierbei im Uhrzeigersinn definiert, wenn man auf die Druckseite des Rotors, also in Windrichtung blickt. Beginnend bei der senkrechten Position nach oben wird die Kreisbewegung der Rotorblätter in Radien als Blattposition abgespeichert. Aus der Differenz der Winkelpositionen kann unter Berücksichtigung der Zeitdifferenz die Winkelgeschwindigkeit des Rotors berechnet werden. Ein exemplarisches Ergebnis ist in Abb. 3.7 dargestellt.

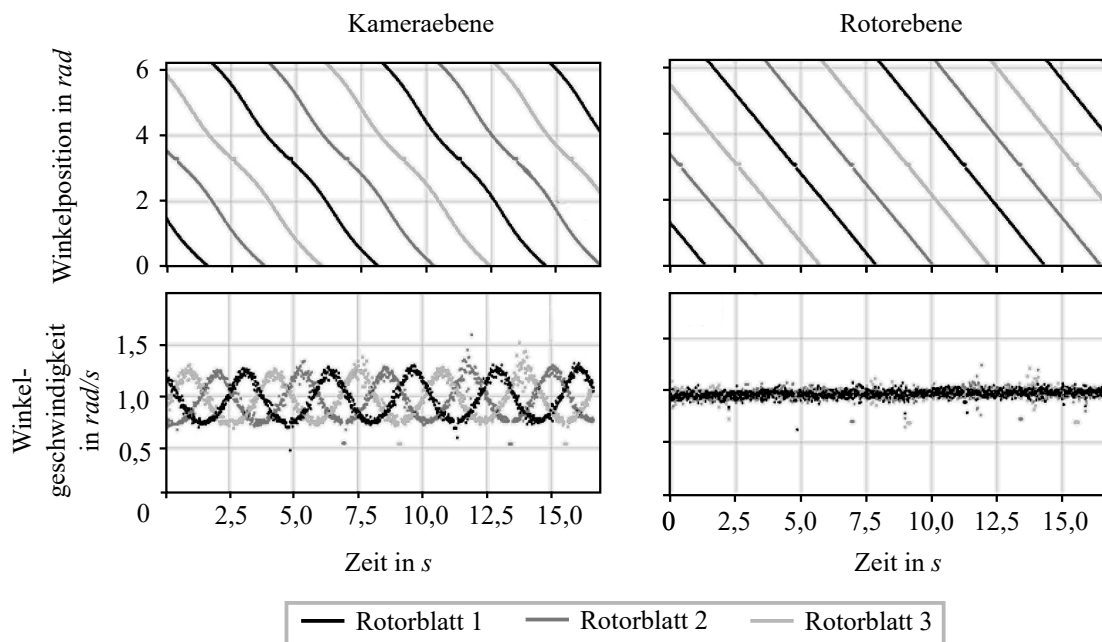


Abb. 3.7.: Beispiel einer detektierten Drehbewegung eines Rotors einer WEA mit drei Rotorblättern. Links: Im Bild (Kameraebene) und rechts: transformiert in die Rotorebene. Aufgrund der perspektivischen Projektion ändert sich die Winkelposition in der Kameraebene nicht linear und die Geschwindigkeit oszilliert. Eine korrekte Transformation ergibt eine lineare Änderung der Winkelposition mit konstanter Winkelgeschwindigkeit der drei Rotorblätter in der Rotorebene.

Filterung und Extrapolation

Ein weiterer Bearbeitungsschritt behandelt das Ausfiltern von Ausreißern und die Interpolation der Rotorposition beim Turmdurchlauf. Um einen Phasenversatz der oszillierenden Geschwindigkeit in der Kameraebene durch einen zeitlichen Tiefpassfilter zu vermeiden, werden die Messdaten der Winkelposition und -geschwindigkeit in der projizierten Rotorebene gefiltert. Aus den letzten über alle drei Rotorblätter gemittelten Geschwindigkeiten werden die niedrigsten und höchsten Werte herausgefiltert und die zeitlich mittlere Geschwindigkeit der übrigen Messwerte berechnet. Die aktuelle Winkelposition eines Rotorblattes wird anhand einer Extrapolation der letzten Position und der momentanen Winkelgeschwindigkeit bewertet und bei zu großer Abweichung als

Ausreißer behandelt und ebenfalls ausgefiltert. Auf diese Art und Weise wird auch die fehlende Rotorposition beim Turmdurchlauf eines Rotorblattes behandelt.

Das finale Ergebnis der Auswertung ist die Erzeugung eines Triggersignals zum Zeitpunkt einer definierten Rotorblattposition. Die momentane Winkelposition und -geschwindigkeit und ermöglicht hierbei die Kompensation von Verzögerungszeiten der zu triggernden Systeme. So kann das Triggersignal um genau den Zeitabstand vor Erreichen der Soll-Position des Rotorblatts erzeugt werden, um das Auslösen der Aufnahmen zum Zeitpunkt des Erreichens der Soll-Position zu erreichen.

3.2.3. Validierung

Zur Validierung des Messsystems wurden Messungen an einer realen WEA in Betrieb durchgeführt. Für die Geschwindigkeitsmessung wurde an einer WEA vom Typ *RePower* gemessen, welche die Winkelgeschwindigkeit $\omega_{\text{Rotor, Referenz}}$ des Rotors mit einer Abtastrate von 1 Hz aufzeichnet. Der Zugang zu den Daten wurde mit freundlicher Unterstützung der *Deutschen Wind-Guard GmbH* ermöglicht. Die 1 Hz-Messdaten wurden mit einem Gaussfilter ($\sigma = 3$) geglättet und zwischen den Messpunkten linear interpoliert. Die optische Geschwindigkeitsmessung wurde mit einer *Canon EOS650D* und einem 135 mm Objektiv durchgeführt, die in einem Abstand von 80 m vor der WEA positioniert wurde. Über einen Zeitraum von ca. 10 min wurde die Winkelgeschwindigkeit des Rotors mit dem optischen System gemessen und die Differenz zwischen gemessener und Referenzmessgröße $\Delta v_{\perp, \text{Rotor}}$ berechnet. In Abb. 3.8 ist die Abweichung aus (schwarz) gemessenem und Referenzwert über die Zeit dargestellt. Zusätzlich ist die Referenzwinkelgeschwindigkeit (grau) aus der Anlagensteuerung der WEA aufgetragen. Für die dargestellte Messung ergibt sich eine mittlere, als systematisch anzusehende, Abweichung von $0,005 \text{ rad s}^{-1}$ oder $0,05 \text{ min}^{-1}$ Umdrehungen. Eine zufällige Abweichung, berechnet aus der Varianz der Einzelabweichungen zu jedem Zeitpunkt, ergibt sich zu $0,0018 \text{ rad s}^{-1}$ bzw. $0,017 \text{ min}^{-1}$ Umdrehungen.

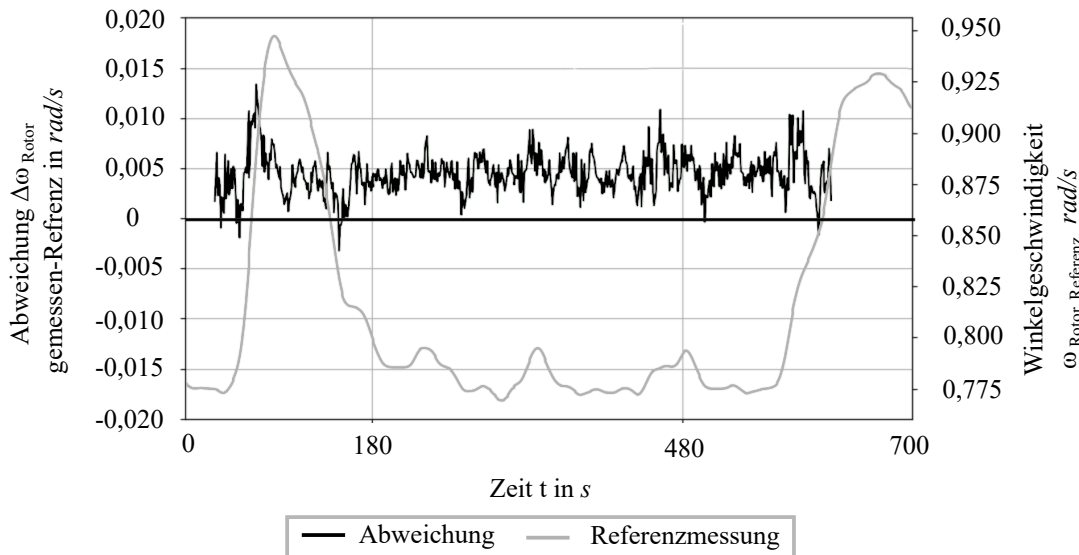


Abb. 3.8.: Abweichung $\Delta\omega_{\text{Rotor}}$ der gemessenen Winkelgeschwindigkeit des Rotors zur Referenzmessung einer WEA in Betrieb. Systematische Abweichung $0,005 \text{ rad s}^{-1}$ und zufällige Abweichung $0,0018 \text{ rad s}^{-1}$.

Es ist zu erkennen, dass die Abweichung in Bereichen positiver Beschleunigungen, z.B. $45\text{ s} < t < 90\text{ s}$ ansteigt und bei negativer Beschleunigung sinkt. Dies ist auf den Tiefpasscharakter der Messung zurückzuführen, der sich durch die zuvor beschriebenen Filterungs- und Mittelungsmethoden ergibt. Eine starke Geschwindigkeitsänderung wird mit einem gewissen Zeitversatz erkannt. Die gemessene Winkelposition und -geschwindigkeit soll dazu genutzt werden, Bildserien des Rotors mit identischer Lage in den Aufnahmen zu erzeugen. Die zufällige Unsicherheit der gemessenen Position und Geschwindigkeit resultiert folglich in Aufnahmen, in denen die Ausrichtung des Rotorblattes Abweichungen zueinander aufweisen. Um die Messung der Winkelposition eines Rotorblattes zu validieren, werden optische Aufnahmen des Rotorblattes getriggert und die Lage der abgebildeten Rotorblattabschnitte bewertet.

Abb. 3.9 zeigt drei übereinander gelegte Aufnahmen einer Messreihe aus 34 Einzelaufnahmen. Für die Darstellung wurden die Aufnahmen ausgewählt, bei denen das Rotorblatt bzgl. der Lage die extremsten Positionen einnimmt. Die dritte Aufnahme ist eine Aufnahme der mittleren Position. Besonders im Bereich der Blattspitze kann erkannt werden, dass eine Unsicherheit bei der gemessenen Winkelposition in eine Abweichung der Lage des abgebildeten Rotorblattes in der Bildserie resultiert. Für eine Quantifizierung wurde jede Einzelaufnahme bzgl. des Winkels der Vorderkante des Rotorblattes zur Horizontalen der Aufnahme berechnet und für jede Einzelaufnahme verglichen. Die Standardabweichung der Lagewinkel beträgt für den vorgestellten Versuch $0,0078\text{ rad} = 0,45^\circ$. Die für einen typischen Messaufbau der thermografische Strömungsvisualisierung an einer WEA in Betrieb vorgegebene Maximalabweichung zwischen den Lagewinkeln in der Bildserie beträgt ca. 3° . Die maximale Abweichung zwischen Einzelaufnahmen im vorgestellten Versuch beträgt $0,0163\text{ rad}$, was $0,93^\circ$ entspricht. Damit liegt die maximale Abweichung der Winkellage bei ca. $\frac{1}{3}$ der maximal zulässigen Abweichung. Die maximal gemessene Abweichung von $0,0163\text{ rad}$ resultiert für die in dieser Arbeit untersuchte WEA mit einer Distanz von Drehmittelpunkt des Rotors bis zur Blattspitze von ca. 40 m in eine vertikale Abweichung von 65 cm . Bei einem IFOV von $11,25\text{ mm}$ resultiert dies in eine maximale Verschiebung der Rotorblattoberfläche von 58 Pixel .



Abb. 3.9.: Überlagerung von drei Bildern einer Bildserie mit den Maximalabweichungen von der mittleren Rotorblattposition.

3.2.4. Bildausrichtung

Die verbleibende Lageabweichung der abgebildeten Rotorblattoberfläche in der Bildserie wird im Rahmen einer Vorverarbeitung korrigiert. Mit Hilfe eines Bildausrichtungsverfahrens, basierend auf einer ECC-Maximierung [Eva2008], werden die Einzelaufnahmen translatorisch und rotatorisch transformiert und verzerrt, bis die gleichen Pixel-Koordinaten aller Bilder den gleichen Oberflächenbereich des Rotorblattes darstellen. In vielen Anwendungen mit dem Vorwissen, dass eine Bildausrichtung durchgeführt werden soll, werden eindeutige, spezifische Marker auf der Oberflä-

che verwendet, anhand derer der Algorithmus die nötigen Parameter der Bildkorrektur berechnen kann. Eine Markierung der Oberfläche der Rotorblätter ist bei der thermografische Strömungsvisualisierung nicht ohne Zusatzaufwand möglich, weshalb der Bildausrichtungsalgorithmus ohne diese auskommen muss. In den Thermografieaufnahmen existieren eindeutige Merkmale die in den Strömungsvisualisierungen, welche sich aus der laminar-turbulenten Transition, der Dicke der abgebildeten Oberfläche, Turbulenzkeilen (vgl. Abschnitt 2.6.2) oder Schadstellen ergeben. Eine Berechnung des Winkels, den die annähernd geradlinige Vorderkante des Rotorblattes in der Aufnahme mit der x -Achse bildet, ermöglicht zunächst die Auswahl des Referenzbildes, an dem alle weiteren Aufnahmen ausgerichtet werden. Damit wird eine möglichst horizontale Ausrichtung des Rotorblattes in der finalen Bildserie erreicht.

Eine Validierung des Bildausrichtungsalgorithmus wurde an einer WEA in Betrieb durchgeführt. Die Oberfläche wurde mit Markern versehen, die einen hohen Kontrast in den Thermografieaufnahmen erzeugen und eine scharfe Abtrennung zur umgebenen Fläche darstellen. Die Position der Marker ist möglichst weit verteilt gewählt, um fast die gesamte Spannweite einer Aufnahme zu erreichen. Nach erfolgreicher Durchführung der Bildausrichtung konnte die verbleibende räumliche Verschiebung zwischen zwei Einzelaufnahmen auf ca. 0,2 Pixel quantifiziert werden.

Es wurde ein optisches System entwickelt, welches die Rotordrehposition einer sich in Betrieb befindlichen WEA in Echtzeit auswertet und abhängig von der momentanen Position ein Triggersignal für das Infrarotkamarasystem generiert. Damit ist die Aufnahme von Bildserien bei einer definierten Rotorblattposition möglich, in denen die Rotorblattoberfläche deckungsgleich übereinander liegen. Die verbleibende Positionsabweichung der Oberfläche liegt für typische Parameter des Messaufbaus in einem Bereich von 0,2 Pixel. Dadurch wurde die Auswertung von Einzelaufnahmen hin zu einer Auswertung von Zeitreihen der einzelnen Pixel bzw. Oberflächenbereiche ermöglicht. Durch Anwendung einer zeitlichen Mittelwertbildung kann zum Beispiel eine Reduzierung des zeitlichen Temperaturschwankens erreicht werden, während andere Verfahren die Möglichkeit haben Fluktuationen in der Bildserie auszuwerten. Voraussetzung ist dabei, dass die Grenzschichtströmung hinreichend stationär ist, was für die in dieser Arbeit ausgewerteten Messdaten für die gewählten Zeiträume der Bildserien angenommen werden kann. Die Anwendung von verschiedenen Bildverarbeitungsmethoden besitzen das potential, zusätzliche Informationen aus den thermografischen Aufnahmen zu verwenden, um neue Strömungsvisualisierungen zu erzeugen, in denen die globale Unterscheidbarkeit der laminaren und turbulenten Strömungsbereiche höher ist, als in den Einzelaufnahmen.

4. Spatio-temporale Bildverarbeitung

Bisher wurden in Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen der thermografischen Strömungsvisualisierung dargelegt und in Kapitel 3 die Erweiterung des Messsystems vorgestellt, um das CNR zwischen der laminaren und turbulenten Strömung in Strömungsvisualisierungen durch eine geeignete Gerätetechnik zu steigern. Zusätzlich wurde die Messtechnik hinsichtlich der Bildaufnahme erweitert, um Bildserien der statischen Grenzschichtströmung von Rotorblättern in Freifeldanwendungen an sich in Betrieb befindlichen WEA aufnehmen zu können. Die Auswertung von Bildserien ermöglicht gegenüber der Einzelbildauswertung die Untersuchung von zeitlichen Temperaturfluktuationen und der Verwendung von erweiterten Bildverarbeitungsmethoden. In diesem Kapitel wird untersucht, wie diese neuen Möglichkeiten der Bildauswertung verwendet werden können, um Strömungsvisualisierungen zu erzeugen, in denen das CNR zwischen der laminaren und turbulenten Strömung gegenüber den Einzelaufnahmen gesteigert ist, vgl. Abb. 4.1. Ausgewertet werden hierfür insbesondere Thermografieaufnahmen, in denen aufgrund der thermischen Bedingungen zum Zeitpunkt der Messung eine Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche gering ausfällt. Damit wird das Potential bewertet, aus niedrig-CNR Visualisierungen Strömungsvisualisierungen mit hohem CNR zwischen der laminaren und turbulenten Strömung zu erzeugen. Darüber hinaus wird die Auswirkung dieser neu erzeugten Strömungsvisualisierungen auf die Messabweichung bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition durch die in Kapitel 2.6 vorgestellten Methoden betrachtet.

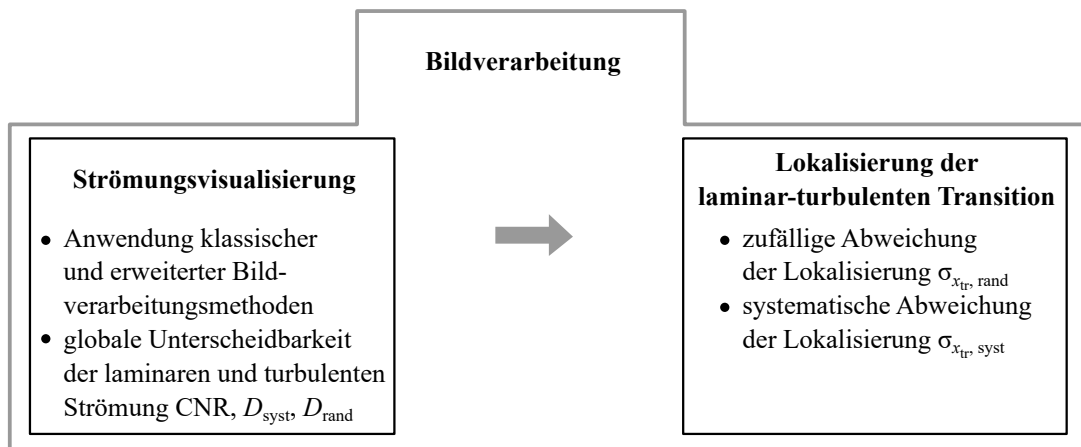


Abb. 4.1.: Unterteilung der Bildverarbeitung bei der thermografische Strömungsvisualisierung. Zunächst werden verschiedene Bildverarbeitungsmethoden angewandt und die globale Unterscheidbarkeit zwischen der laminaren und turbulenten Strömung untersucht. Anschließend werden die zu erreichende systematische und zufällige Abweichung bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition in den erzeugten Strömungsvisualisierungen bestimmt.

In Abschnitt 4.1 werden die spatio-temporalen Bildverarbeitungsmethoden eingeführt, die Anwendung finden, um aus der Serie von thermografischen Aufnahmen Bilder zu erzeugen, die als Strömungsvisualisierungen interpretiert werden können. In Abschnitt 4.2 wird die Auswirkung verschiedener Bildeigenschaften auf die Messabweichung bei der Lokalisierung der laminar-

turbulenten Transition untersucht. In simulierten Strömungsvisualisierungen werden nacheinander systematische und zufällige Einflüsse auf die Inhomogenität in den Aufnahmen verändert, anhand der zuvor in Abschnitt 2.5.1 eingeführten Kenngrößen quantifiziert und die Abweichung bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition bestimmt. Somit wird die Auswirkung von Inhomogenitäten in der Strömungsvisualisierung auf die Messabweichung der Lokalisierung näher untersucht. In Abschnitt 4.3 werden die Ergebnisse der spatio-temporalen Bildverarbeitung vorgestellt. Es werden sortiert nach den Experimenten zunächst die in Abschnitt 4.1 eingeführten Bildverarbeitungsmethoden angewandt und die daraus resultierenden Strömungsvisualisierungen bezüglich des CNR, D_{sys} und D_{rand} zwischen der laminaren und turbulenten Strömung bewertet. Anschließend werden jeweils die eingeführten Verfahren zur Lokalisierung der natürlichen laminar-turbulenten Transition mit Subpixelauflösung, vgl. Abschnitt 2.6.1, angewandt und die erreichte Messabweichung ermittelt. Abschnitt 4.4 behandelt die Frage, wie sich die Anzahl der Einzelaufnahmen und die Messfrequenz der ausgewerteten Bildserien auf die Kenngrößen der Unterscheidbarkeit und die Messabweichung bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition auswirken. Das Kapitel schließt in Abschnitt 4.5 mit einer Zusammenfassung der präsentierten Ergebnisse.

4.1. Strömungsvisualisierung

4.1.1. Klassische Bildverarbeitungsmethoden

Zeitliche Mittelwertbildung

Die Auswertung von Bildserien, also zeitlichen Abfolge von thermografische Strömungsvisualisierungen anstelle von Einzelaufnahmen, ermöglicht die Berechnung eines zeitlichen Mittelwerts (MW). Für einen homogenen Bildausschnitt gleicher Temperatur T bzw. Intensität I gilt, dass das zeitliche Rauschen eines Pixels aufgrund des Detektorrauschens oder durch Fluktuationen der gemessenen Oberflächentemperatur eine direkte Auswirkung auf das räumliche Rauschen in dem Bildausschnitt hat. Dies wurde bereits in Abschnitt 3.1.1 dargestellt. Bei einer zeitlichen Mittelung von N Intensitätswerte $I_{xy,i}$ für $i = 1, \dots, N$ mit

$$\bar{I}_{xy} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N I_{xy,i} \quad (4.1)$$

ist das Rauschen des Mittelwertes \bar{I}_{xy} um einen Faktor von $1/\sqrt{N}$ gegenüber dem Rauschen der Einzelwerte reduziert. Das Bildrauschen im resultierenden Mittelwertbild, also das räumliche Rauschen eines homogenen Bildausschnittes, ist damit ebenfalls reduziert. Verbleiben die räumlichen Mittelwerte zweier Bildausschnitte nach der zeitlichen Mittelung der Bildserie auf dem gleichen Niveau wie in den Einzelaufnahmen, weil keine zeitlichen Gradienten vorhanden sind, bewirkt diese Reduzierung des Bildrauschens eine Steigerung des CNR, bzw. Erhöhung von D_{rand} im Mittelwertbild gegenüber den Einzelaufnahmen. Für die thermografische Strömungsvisualisierung kann das Verfahren so angewandt werden, um die Unterscheidbarkeit des laminaren und turbulenten Strömungsbereichs zu erhöhen.

Zeitliche Standardabweichung

Ein Nachteil der Mittelung einer Bildserie ist der Verlust der Information, die in den strömungsbedingten Fluktuationen stecken. Weisen unterschiedliche Strömungsbereiche aufgrund der strömungsphysikalischen Gegebenheiten der Grenzschichtströmung zeitliche Fluktuationen auf, die sich in der gemessenen Temperatur in der thermografischen Strömungsvisualisierung widerspie-

geln, werden diese bei einer zeitlichen Mittelung herausgefiltert. Eine gezielte Auswertung dieser zeitlichen Fluktuationen kann über die Berechnung der zeitlichen Standardabweichung (STA) der einzelnen Temperaturwerte, bzw. Intensitätswerte $I_{xy,i}$ erfolgen:

$$\sigma_{I_{xy}} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (I_{xy,i} - \bar{I}_{xy})^2} \quad (4.2)$$

Der Unterschied zweier Bildbereiche mit unterschiedlichen zeitlichen Fluktuation der Einzelwerte kann durch die Berechnung der zeitlichen Standardabweichung ausgewertet werden. Bei der thermografische Strömungsvisualisierung kann diese Auswertung unterschiedliche Fluktuationen der gemessenen Temperatur eine Steigerung der Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche bewirken. Darüber hinaus besitzt die STA das Potential, räumliche systematische Gradienten zu reduzieren, bzw. heraus zu filtern, da diese nicht auf die zeitlichen Fluktuation einzelner Bildpunkte einwirken.

4.1.2. Erweiterte Bildverarbeitungsmethoden der Merkmalsextraktion

Hauptkomponentenanalyse

Die Hauptkomponentenanalyse (principal component analysis (PCA)) ist ein multivariates statistisches Verfahren mit dem Ziel, die wichtigen Informationen eines Datensatzes zu extrahieren und sie als unkorrelierte Variablen, so genannte Hauptkomponenten (engl.: principal component, PC), darzustellen [Hot1933, Abd2010]. Die PC sind durch ihre orthogonale Ausrichtung zueinander gekennzeichnet und werden nach ihrer Varianz sortiert. Daher enthält der erste PC die am stärksten ausgeprägte Information des Datensatzes und repräsentiert somit die größte Vielfalt des gesamten Datensatzes. Infolgedessen können die ersten N PC linear kombiniert werden, um jede einzelne Eingabe des Datensatzes ausreichend zu approximieren, während N viel kleiner bleibt als die Anzahl der einzelnen Eingabedaten. Dies kann als Dimensionsreduktion interpretiert werden, wobei der größte Teil der Informationen zur Unterscheidung zwischen den einzelnen Eingaben erhalten bleibt.

Wenn der vollständige Datensatz in einer Matrix X mit den Dimensionen $N_{\text{Beobachtungen}} \times N_{\text{Variablen}}$ mit $N_{\text{Beobachtungen}}$ Beobachtungen von $N_{\text{Variablen}}$ einzelnen Variablen angeordnet ist, erhält man die PC mit einer Matrixfaktorisierung, der Singulärwertzerlegung. Die Singulärwertzerlegung von X ist definiert als

$$X = P\Delta R^T, \quad (4.3)$$

wobei die Spalten in P die linken Singulärvektoren von X und auch die Eigenvektoren der Matrix XX^T sind. Die Spalten von R sind die rechten Singulärvektoren von X und die Eigenvektoren der Matrix $X^T X$. Δ ist die Diagonalmatrix der Singulärwerte, die auch die Diagonalmatrix der Eigenwerte der Matrix XX^T ist. Die PC F werden anschließend durch $F = P\Delta$ berechnet [Abd2010]. Indem man nur die ersten O größten Singulärwerte und ihre Singulärvektoren erhält, kann eine abgeschnittene Matrix F_L mit Rang O berechnet werden, während die Frobenius-Norm zwischen F und F_L minimal ist. Da O kleiner als $N_{\text{Variablen}}$ ist, wird die Dimension des Datensatzes reduziert, während der größte Teil seiner Varianz erhalten bleibt. Im Falle dreidimensionaler Daten ergibt eine dimsreduzierende PCA die orthogonale Basis, unter der die maximale Varianz der Daten erhalten bleibt, d.h. die Daten auf eine neuen, nur zweidimensionalen Basis mit maximaler Streuung projiziert. Dreidimensionale Daten werden mit minimalem Informationsverlust in zwei Dimensionen dargestellt.

Die PCA wurde schon früh auf eine Vielzahl von Problemen zur Behandlung multivariater Daten in verschiedenen Bereichen der Wissenschaft angewandt, um die Unterscheidung zwischen Messungen zu verbessern [Wol1987]. Da die berechneten PC nach absteigender Varianz der Daten

sortiert sind, kann die PCA zur Reduktion von Rauschen verwendet werden, indem die PC mit geringer Varianz einfach ignoriert werden und der ursprüngliche Datensatz nur auf der Basis der hohen Varianz rekonstruiert wird [Doe2019, Chi2019].

Eine weitere Anwendung der PCA, die die Motivation für diese Arbeit lieferte, ist die Berechnung von Eigengesichtern [Tur1991], ein Begriff für die PC eines Datensatzes von Gesichtsbildern, der üblicherweise bei Aufgaben der Gesichtserkennung im Bereich *machine learning* verwendet wird. Durch die Projektion der Gesichtsbilder auf einen Merkmalsraum werden die signifikanten Unterschiede zwischen diesen Gesichtern als Merkmale extrahiert. Die Reduktion eines großen Datensatzes von vielen Bildern auf einen kleineren Satz von Bildern, die Merkmale darstellen, führt zu der Hypothese einer nützlichen Anwendung der Hauptkomponentenanalyse bei der thermografische Strömungsvisualisierung. Die Strömungseigenschaften verschiedener Strömungszustände tragen in den jeweiligen Bildregionen zu unterschiedlichen Varianzbeträgen in der Bildserie bei und werden daher als unterschiedliche Merkmale extrahiert. In der resultierenden PC können diese hervorgehobenen Merkmale eine erhöhte Unterscheidbarkeit zwischen den Strömungsbereichen aufweisen.

Nicht-negative Matrixfaktorisierung

Die nicht-negative Matrixfaktorisierung (non-negative matrix factorization (NNMF)) ist eng mit anderen Faktorisierungsmethoden wie der Hauptkomponentenanalyse (PCA) oder der Vektorquantisierung verwandt und folgt demselben Prinzip mit zusätzlichen Einschränkungen für die faktorisierten Matrizen [Lee1999]. Alle drei Methoden folgen der Grundidee einer Annäherung eines gegebenen Datensatzes durch zwei Matrizen, wobei die Anzahl der Dimensionen reduziert wird, ohne dass elementare Informationen des Datensatzes verloren gehen. Eine gegebene $N_{\text{Beobachtungen}} \times N_{\text{Variablen}}$ -Matrix V wird durch eine Faktorisierung von zwei Matrizen W und H der Form

$$X_{ij} \approx (WH)_{ij} = \sum_{k=1}^r W_{ik} H_{kj} \quad (4.4)$$

mit $i = 1 \dots n$, $j = 1 \dots m$ und den Dimensionen von W und H $N_{\text{Beobachtungen}} \times O$ bzw. $O \times N_{\text{Variablen}}$. Um eine hohe Dimensionsreduktion zu erreichen, wird der Rang O so gewählt, dass $O < \frac{mn}{m+n}$ erfüllt ist. Die optimale Wahl von O ist problemabhängig [Ber2007] und muss durch Versuche ermittelt werden, mit dem Ziel, den kleinstmöglichen Wert zu finden, um die höchste Kompression der in den Daten gegebenen Informationen zu erreichen. Die Matrizen W und H werden iterativ aktualisiert, wobei der von Berry et al. [Ber2007] vorgestellte Algorithmus der alternierenden kleinsten Quadrate verwendet wird:

```

W = W0
für i = 1 bis maxIteration
  Löse nach H in der Matrix W^T W H = W^T V
  Setze alle negativen Elemente in H auf 0
  Löse nach W in der Matrix H H^T W^T = H V^T
  Setze alle negativen Elemente in W auf 0
Ende

```

Der anfängliche Startpunkt W_0 wird durch mehrfache Durchläufe des schnelleren multiplikativen Update-Algorithmus [Ber2007]

```

W = rand(N_{Beobachtungen}, O)
H = rand(O, N_{Variablen})
für i = 1 bis maxIteration
  H = H \cdot (W^T A) / (W^T W H + 10^{-9})
  W = W \cdot (A H) / (W H H^T + 10^{-9})
Ende

```

bestimmt, wobei 10^{-9} verwendet wird, um eine Division durch Null zu vermeiden. Nach jedem Iterationsschritt wird die Wurzel aus dem mittleren Quadrat der Residuen

$$K_{\text{res}} = \frac{\|X - WH\|_F}{\sqrt{N_{\text{Beobachtungen}} \cdot N_{\text{Variablen}}}} \quad (4.5)$$

berechnet. $\|\cdot\|_F$ ist die Frobenius-Norm, die für die Elemente a_{ij} einer gegebenen $n \times m$ Matrix A definiert ist durch

$$\|A\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |a_{ij}|^2}. \quad (4.6)$$

Beide Algorithmen werden beendet, wenn die maximale Anzahl von Iterationen *maxIteration* erreicht ist oder K_{res} kleiner als ein bestimmtes Grenzwert ist. Aufgrund der Existenz lokaler Minima beim Minimierungsprozess von Gleichung (4.4) können W und H bei mehrfacher Ausführung des NNMF-Algorithmus unterschiedliche Lösungen erreichen. Daher können sich die resultierenden non-negative component (NNC)-Bilder bei jeder Berechnung unterscheiden.

Da V die beobachteten Signale enthält, kann es als sichtbare Variablen bezeichnet werden. Die berechnete Matrix H kann als versteckte Variablen beschrieben werden, die eine Teilmenge neuer sichtbarer Variablen, die Basis W , aktivieren, um die ursprünglichen Daten X [Lee1999] zu approximieren. Da die Dimension O viel kleiner ist als die Dimensionen von X , wird die Größe des gesamten Dateninhalts reduziert, während alle elementaren Signalinformationen erhalten bleiben. Eine typische Anwendung der NNMF-Methode aufgrund der grafischen Darstellungsmöglichkeit ist die Darstellung von Gesichtsmerkmalen [Lee1999]. Während eine Menge von Bildern von Gesichtern spaltenweise in der Matrix X angeordnet ist, werden die Matrizen W und H nach der Gleichung (4.4) berechnet und enthalten Bilder mit Gesichtsmerkmalen bzw. Gewichtungsfaktoren. Eine lineare Kombination der Bilder in W mit den Faktoren in einer Spalte von H ergibt eine Approximation des ursprünglichen Gesichts in X .

Der Hauptunterschied zwischen NNMF und anderen Merkmalsextraktionsalgorithmen wie PCA ist die Nicht-Negativitätsbeschränkung für die Matrizen W und H [Lee1999]. Da die PCA negative Werte in H zulässt, enthalten die Basisbilder Informationen über alle Merkmale eines Gesichts: Dies ist möglich, weil einige dieser Basisbilder subtraktiv kombiniert werden können, wodurch sie sich gegenseitig aufheben. NNMF lässt diese negativen Faktoren in der Linearkombination nicht zu, sodass keine Auslöschung möglich ist. Daher enthalten die Basisbilder nur einzelne Merkmale eines Gesichts, die beim Zusammensetzen eines vollständigen Gesichtsbildes hinzugefügt oder weggelassen werden können. Diese Nicht-Negativitäts-Beschränkung ermöglicht eine intuitivere Darstellung der Basisbilder in W , die in diesem Beispiel Teile eines realen Gesichts sind, anstatt abstrakte Bilder, die einzeln kaum interpretiert werden können. Angewandt auf thermografische Strömungsvisualisierungen besitzt die NNMF das Potential neue Visualisierungen zu erzeugen, die Informationen über die räumliche Verteilung der Strömungszustände beinhalten und ausgewertet werden können.

Die aus den eingeführten Bildverarbeitungsmethoden resultierenden Bilder müssen bezüglich ihrer Eignung als Strömungsvisualisierung bewertet werden. Hierzu muss die globale Unterscheidbarkeit zwischen der laminaren und turbulenten Strömung quantifiziert und verglichen werden. Speziell bei den Verfahren der Merkmalsextraktion besteht die Fragestellung, ob strömungscharakteristische Eigenschaften aus einer Bildserie extrahiert werden können, um Visualisierungen mit einer gesteigerten Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche zu erzeugen. Die resultierenden Strömungsvisualisierungen müssen diesbezüglich mit den Ergebnissen der klassischen Verfahren der zeitlichen Mittelwertbildung und der zeitlichen Standardabweichung verglichen werden.

4.2. Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition

Um zu untersuchen, welche Auswirkungen zufällige und systematische Inhomogenitäten in den Bildbereichen einer Strömungsvisualisierung auf die zufällige und systematische Abweichung bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition haben, werden in diesem Abschnitt simulierte Strömungsvisualisierungen erzeugt. Anschließend werden die beiden in Abschnitt 2.6.1 eingeführten Lokalisierungsverfahren der natürlichen laminar-turbulenten Transition mit Subpixelauflösung und der zweifachen Iterationsschleife angewandt und die zufällige und systematische Abweichung der Lokalisierung bestimmt. Das Ziel der Untersuchung ist es, den im Stand der Technik dargestellten Zusammenhang zwischen zufälligen Inhomogenitäten im Bild auf die zufällige Messabweichung der Lokalisierung nachzuempfinden. Demnach steigt die Messabweichung mit steigenden zufälligen Inhomogenitäten im Bild [Dol2018b]. Über den Stand der Technik hinaus soll auch die Auswirkung auf die systematische Abweichung der Lokalisierung untersucht werden. Insbesondere wird der bisher unberücksichtigte Einfluss von systematischen Gradienten auf die Messabweichung betrachtet. Zusätzlich soll die eingeführte Erweiterung des Lokalisierungsverfahrens durch eine zweite Iteration der Approximation in einem räumlich eingeschränkten Bereich nahe der laminar-turbulenten Transition mit dem Stand der Technik verglichen werden.

Die Simulations-Strömungsvisualisierungen werden aus zwei konstanten, homogenen Intensitätsfeldern erzeugt, die zwei aneinander angrenzende Strömungsbereiche a und b repräsentieren. Die mittlere Intensität der beiden Strömungsbereiche beträgt $\bar{I}_a = 0$ und $\bar{I}_b = 1$, woraus eine absolute Differenz von 1 entsteht. Die Dimensionen des Simulationsbildes beträgt (200×300) Pixels, womit eine mit realen Experimenten vergleichbare räumliche Auflösung entsteht. Der Bereich der laminar-turbulenten Transition wird gemäß dem heuristisch motivierten Approximationsmodell einer Verteilungsfunktion der Normalverteilung an der Stelle $x = 179,22$ Pixel simuliert. Die Transitionsbreite beträgt 12 Pixel und liegt damit in der aus realen Messungen zu erwartenden Größenordnung.

In Abschnitt 4.2.1 wird das Simulationsbild mit zufälligem Rauschen unterschiedlicher Amplitude überlagert, um zufällige Inhomogenitäten im Bild zu erzeugen. Die so entstehenden Simulationsbilder werden bezüglich des CNR, D_{rand} und D_{sys} zwischen den beiden Bereichen quantifiziert. Die Inhomogenitäten simulieren damit sowohl räumliche Fluktuationen der Temperatur aufgrund von Strömungsfluktuationen, als auch das bei der Bildgebung entstehende Bildrauschen. In den so erzeugten Simulationsbildern werden die beiden vorgestellten und um eine zweite Iteration erweiterten Verfahren der Lokalisierung der natürlichen laminar-turbulenten Transition angewandt und die zufällige sowie systematische Abweichung bestimmt. In Abschnitt 4.2.2 werden die rauschfreien Bildbereiche der Simulations-Strömungsvisualisierung mit systematischen Gradienten überlagert, deren Verlauf aus einem realen Experiment übernommen wurde. Somit werden systematische Inhomogenitäten simuliert um erneut die Auswirkung auf die Messabweichung der darauf durchgeführte Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition untersucht. Neben der Messabweichung bei der Lokalisierung dient die Simulation zur Verdeutlichung der in Abschnitt 2.5.1 eingeführten Kenngrößen zur Quantifizierung der Unterscheidbarkeit zwischen Strömungsbereichen und einer getrennten Betrachtung von zufälligen und systematischen Einflüssen, die einer Unterscheidbarkeit entgegen wirken.

4.2.1. Zufälliges Rauschen

In diesem Abschnitt soll die Auswirkung von zufälligen Inhomogenitäten in den Simulations-Strömungsvisualisierungen auf die Abweichung bei der Lokalisierung der natürlichen laminar-turbulenten Transition untersucht werden. In Abb. 4.2(a) bis (c) sind drei Simulationsbilder dargestellt, die mit einem unterschiedlichen Rauschen mit einer Standardabweichung von 0,71, 0,47 und 0,24 überlagert sind. Für die drei Simulationsbilder ergeben sich die in Tab. 4.1 aufgelisteten

teten Werte für das CNR zwischen den Bildbereichen von 1, 1,5 und 3. Neben dem CNR sind auch die in Abschnitt 2.5.1 definierten Kenngrößen für die Bewertung der Unterscheidbarkeit basierend auf zufälligem Rauschen (D_{rand}) und systematischen Gradienten (D_{syst}) in den Strömungsbereichen aufgelistet. Ebenfalls eingezeichnet in die Simulationsbilder sind die Ergebnisse gemäß der in Abschnitt 2.6.1 eingeführten Verfahren zur Lokalisierung der natürlichen laminar-turbulenten Transition.

Gemäß der Erwartung spiegelt der Kennwert D_{rand} die Unterscheidbarkeit basierend auf dem Rauschen im Bild wider und nimmt die gleichen Zahlenwerte wie das CNR an, da dieser nur durch das Bildrauschen und nicht durch systematische Gradienten beeinflusst wird. Theoretisch müsste bei der Berechnung der systematischen Gradienten gemäß des Vorgehens in Abschnitt 2.5.1 ein konstanter Verlauf ohne Gradient extrahiert werden und somit zu einer kombinierten Standardabweichung des systematischen Gradientenverlaufs zu 0 quantifiziert werden und D_{syst} gegen Unendlich konvergieren. Bei der Glättung des Intensitätsverlaufs verbleibt jedoch ein Restanteil an systematischem Verlauf, aus dem sich die in Tab. 4.1 aufgelisteten Werte für D_{syst} ergeben.

In Abb. 4.2 (d)-(f) ist der Intensitätsverlauf und in Abb. 4.2 (g)-(i) der Gradient des Intensitätsverlaufs der mittleren Bildzeile der Simulationsbilder in Abb. 4.2 (a)-(c) dar.

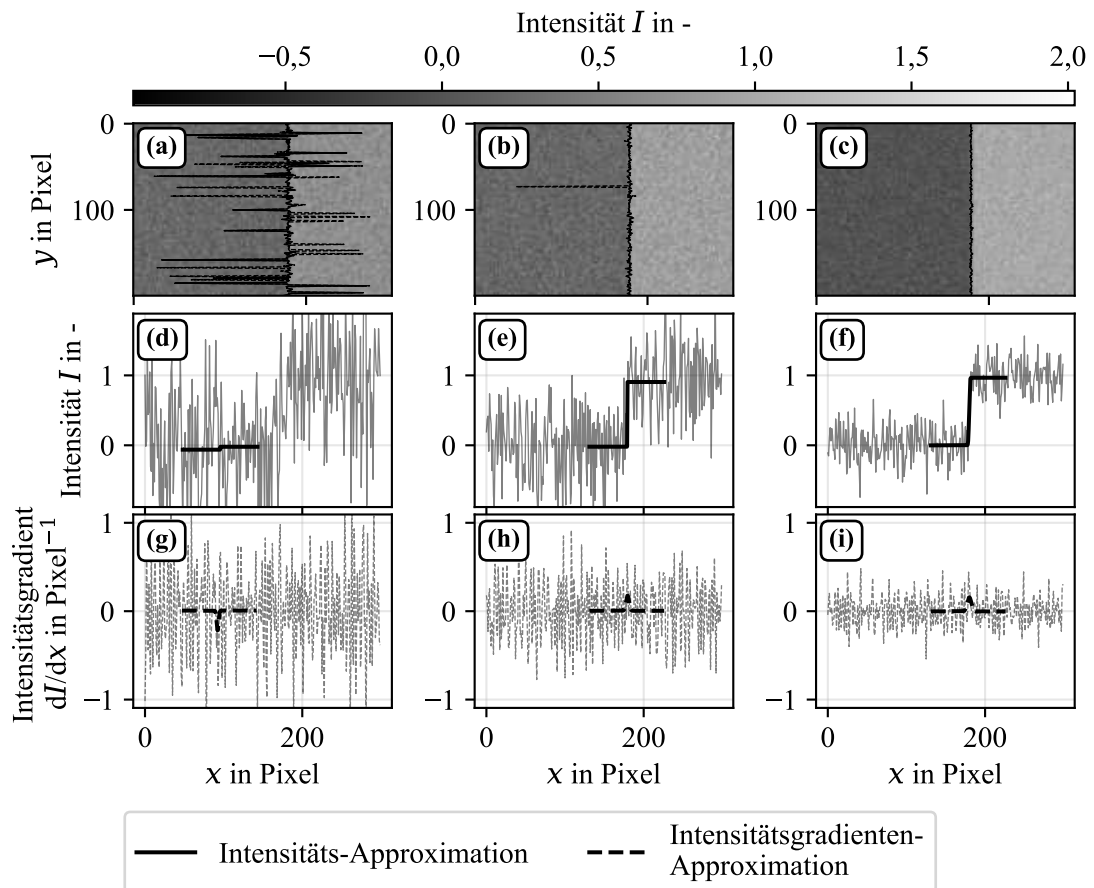


Abb. 4.2.: (a)-(c) Simulierte Strömungsvisualisierungen mit zwei Bereichen und einer Differenz der mittleren Intensitäten von 1, sowie unterschiedlichem zufälligem Rauschen, welches ein CNR von jeweils 1,0, 1,5 und 3 ergibt. Lokalisierte natürliche Transition zwischen den Bereichen entsprechend der eingeführten Verfahren durch Approximation der Intensität bzw. des Intensitätsgradienten, vgl. Abschnitt 2.6. (d)-(f) Zugehörige Intensitätsverlauf der mittleren Bildzeile in (a)-(c) und Approximationsmodell. (g)-(i) Verlauf des Intensitätsgradienten analog zu (d)-(f). Ergebnis der Unterscheidbarkeiten in Tab. 4.1 und der Lokalisierung der Transition in Tab. 4.2. Die wahren Position der Transition ist bei $x_{\text{tr,ist}} = 179,22$ Pixel.

In allen Verläufen ist die Approximation mit der Verteilungsfunktion bzw. der Dichtefunktion der Normalverteilung als schwarze Linie dargestellt, mit der die Position der laminar-turbulenten Transition lokalisiert wird, vgl. Abschnitt 2.6. Bereits durch eine visuelle Inspektion ist zu erkennen, wie die beiden Intensitätsniveaus über die drei Bilder hinweg bei steigendem CNR deutlicher zu unterscheiden sind. Anhand der Approximation in (d) und (g) ist zu erkennen, dass die Lokalisierung der Transition in eine Abweichung von ca. 50 Pixel gegenüber der wahren Position bei $x = 179,22$ Pixel resultiert.

Tab. 4.1.: CNR und Kennwerte der Unterscheidbarkeit basierend auf dem Rauschen im Bild (D_{rand}) und systematischen Gradienten im Bild (D_{syst}) der Simulationsbilder in Abb. 4.2.

	CNR	D_{rand}	D_{syst}
(a)	1,0	1,0	14,1
(b)	1,5	1,5	20,6
(c)	3,0	3,0	41,2

Zwischen den lokalisierten Transitionspositionen in den Bildzeilen in Abb. 4.2 (a) treten hohe Abweichungen voneinander bis zu 150 Pixel auf, aus denen eine zufällige Abweichung der Lokalisierungsverfahren von $\sigma_{x_{\text{tr,rand}}} = 27,54$ Pixel für die Approximation der Intensität und $\sigma_{x_{\text{tr,rand}}} = 39,47$ Pixel für die Approximation des Intensitätsgradienten resultieren, vgl. Tab. 4.2. Die systematische Abweichung der lokalisierten Transition für die beiden Verfahren ist $\sigma_{x_{\text{tr,syst}}} = 2,85$ Pixel bzw. $\sigma_{x_{\text{tr,syst}}} = 4,44$ Pixel, vgl. Tab. 4.2. Die entsprechenden Zahlen für die simulierten Bilder in (b) und (c) sind ebenfalls in Tab. 4.2 aufgelistet.

Tab. 4.2.: Ergebnis der Lokalisierung der Transition in den simulierten Strömungsbildern Abb. 4.2 (a)-(c). Zufällige Abweichung $\sigma_{x_{\text{tr,rand}}}$ berechnet anhand der Standardabweichung zwischen zeilenweise lokalisierten Positionen der Transition und systematische Abweichung $\sigma_{x_{\text{tr,syst}}}$ anhand der mittleren Entfernung zur wahren Position der Transition $x_{\text{tr,ist}} = 179,22$ Pixel.

	\bar{x}_{tr} in Pixel			$\sigma_{x_{\text{tr,rand}}}$ in Pixel			$\sigma_{x_{\text{tr,syst}}}$ in Pixel		
	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)
	Abb. 4.2								
Approximation	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)
Intensität	176,37	179,08	179,26	27,54	1,40	0,75	2,85	0,14	0,05
Intensitätsgradient	174,78	178,49	179,25	39,47	9,44	0,77	4,44	0,73	0,03

Es konnte gezeigt werden, dass ein direkter Zusammenhang zwischen steigendem D_{rand} und der sinkenden, zufälligen Abweichung $\sigma_{x_{\text{tr,rand}}}$ der Lokalisierung besteht. Darüber hinaus wird bei niedrigem D_{rand} eine um ca. 30 % niedrigere zufällige Abweichung der Lokalisierung erreicht, wenn das Verfahren der Intensitätsapproximation anstatt dem der Gradientenapproximation angewandt wird. Auch die systematische Messabweichung der Lokalisierung sinkt mit steigendem D_{rand} , bzw. sinkendem Rauschanteil im Bild. Sie liegt jedoch in allen Fällen um einer Größenordnung unter der zufälligen Abweichung. Damit konnte das Ergebnis aus dem Stand der Technik bestätigt werden, dass zufälliges Rauschen in der Strömungsvisualisierung einen direkten Einfluss auf die zufällige Abweichung bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition hat. Hierbei spielt

es keine Rolle, ob die zufälligen Inhomogenitäten durch räumliche Temperaturfluktuationen, dem Bildrauschen des Infrarotdetektors oder durch Strömungsfluktuationen auftreten.

4.2.2. Systematische Gradienten

Die zweite Untersuchung mithilfe der Simulationen behandelt den Einfluss der systematischen Gradienten in den Strömungsbereichen. Wie bereits in Abschnitt 2.6.1 beschrieben, beeinflussen systematische Gradienten des Intensitätsverlaufs die Lokalisierungsalgorithmen der laminar-turbulenten Transition negativ. Abweichungen der Intensität und des Gradienten von den Modellfunktionen, vgl. 2.6, bewirken eine systematische Abweichung der lokalisierten Transitionposition. Dieser Zusammenhang soll in der folgenden Simulationsauswertung näher untersucht werden.

Um Strömungsvisualisierungen mit verschiedenen starken systematischen Gradienten innerhalb der zu unterscheidenden Strömungsbereiche zu simulieren, werden die folgenden Simulationsbilder aus einer Überlagerung von zwei Intensitätsverläufen erzeugt. Der erste Verlauf entspricht der Idealisierung gemäß der heuristischen Modellvorstellung einer Verteilungsfunktion der Normalverweilung, vgl. 2.6, und besitzt zwei konstante Intensitätsniveaus ohne systematische Gradienten. Als zweiter Verlauf wird die reale Messung in Abb. 2.20 (a) verwendet und beinhaltet den charakteristischen Verlauf der Intensität mit starken systematischen Gradienten in dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich. Aus einer Überlagerung der beiden Verläufe mit unterschiedlicher Gewichtung entstehen Intensitätsverläufe mit unterschiedlich starken Gradienten, vgl. Abb. 4.3. Eine Gewichtung von 0 beschreibt dabei einen Verlauf ohne und eine Gewichtung von 1 einen Verlauf mit starkem systematischen Gradienten.

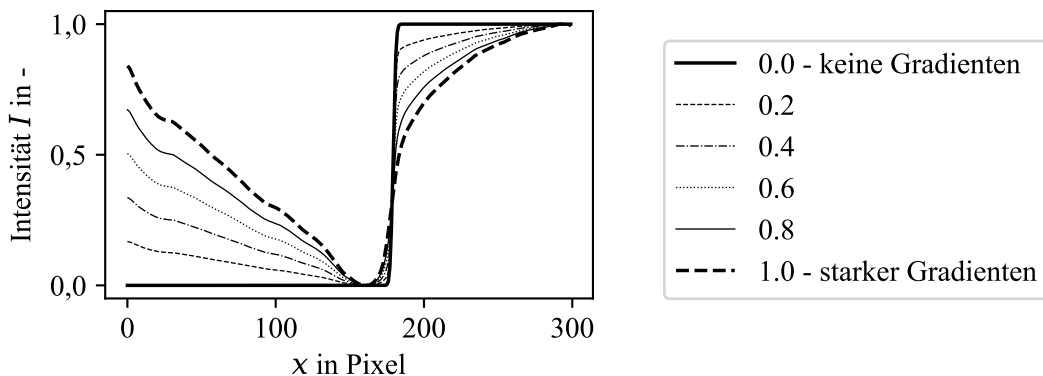


Abb. 4.3.: Simulierte Intensitätsverläufe bestehend aus einer gewichteten Überlagerung der Verteilungsfunktion der Normalverteilung (keine Gradienten) und einem real gemessenen Verlauf (starker Gradienten).

Analog zum vorherigen Abschnitt sind in Abb. 4.4 (a)-(c) drei Simulationsbilder einer Strömungsvisualisierung basierend auf unterschiedlich hohen systematischen Gradienten im Intensitätsverlauf in Strömungsrichtung dargestellt. Abb. 4.4 (a) entspricht hierbei der Gewichtung 1, Abb. 4.4 (b) der Gewichtung 0,7 und Abb. 4.4 (c) der Gewichtung 0 aus Abb. 4.3. Die systematischen Gradienten in den Strömungsbereichen nehmen also über die Bildserie hinweg ab.

Die Werte für das CNR und den Parametern der Unterscheidbarkeit sind Tab. 4.3 zu entnehmen. Da die Intensitätsverläufe der Simulationsbilder kein Rauschen aufweisen, entspricht der Kennwert der Unterscheidbarkeit basierend auf systematischen Gradienten, D_{sys} , dem CNR. Analog zur Untersuchung des Rauscheinflusses, müsste der theoretische Wert von D_{rand} aufgrund eines kombinierten Rauschens von 0 gegen Unendlich konvergieren, vgl. Gleichung (2.32). In der Praxis verbleibt nach Berechnung des systematischen Gradienten im Verlauf ein minimaler als

Rauschen interpretierter Anteil zurück, weshalb sich die Werte in Tab. 4.3 ergeben.

Analog zur vorherigen Auswertung sind in Abb. 4.4 (d)-(f) die Intensitätsverläufe und in Abb. 4.4 (g)-(i) der zugehörige Gradient dargestellt. Ebenfalls ist in jeden Verlauf auch die zugehörige Approximation der Lokalisierungsverfahren eingezeichnet. Hierbei fällt auf, dass die Approximation der Intensität mit der Verteilungsfunktion der Normalverteilung Abweichungen vom Intensitätsverlauf aufweist, sofern systematische Gradienten in einem der Strömungsbereiche vorhanden sind, vgl. Abb. 4.4 (d). Daraus resultiert eine Abweichung der lokalisierten Transition von ca. 3 Pixel. Bei der Lokalisierung der Transition anhand des Intensitätsgradienten ist die Abweichung deutlich reduziert und beträgt in Abb. 4.4 (d) nur 0,02 Pixel.

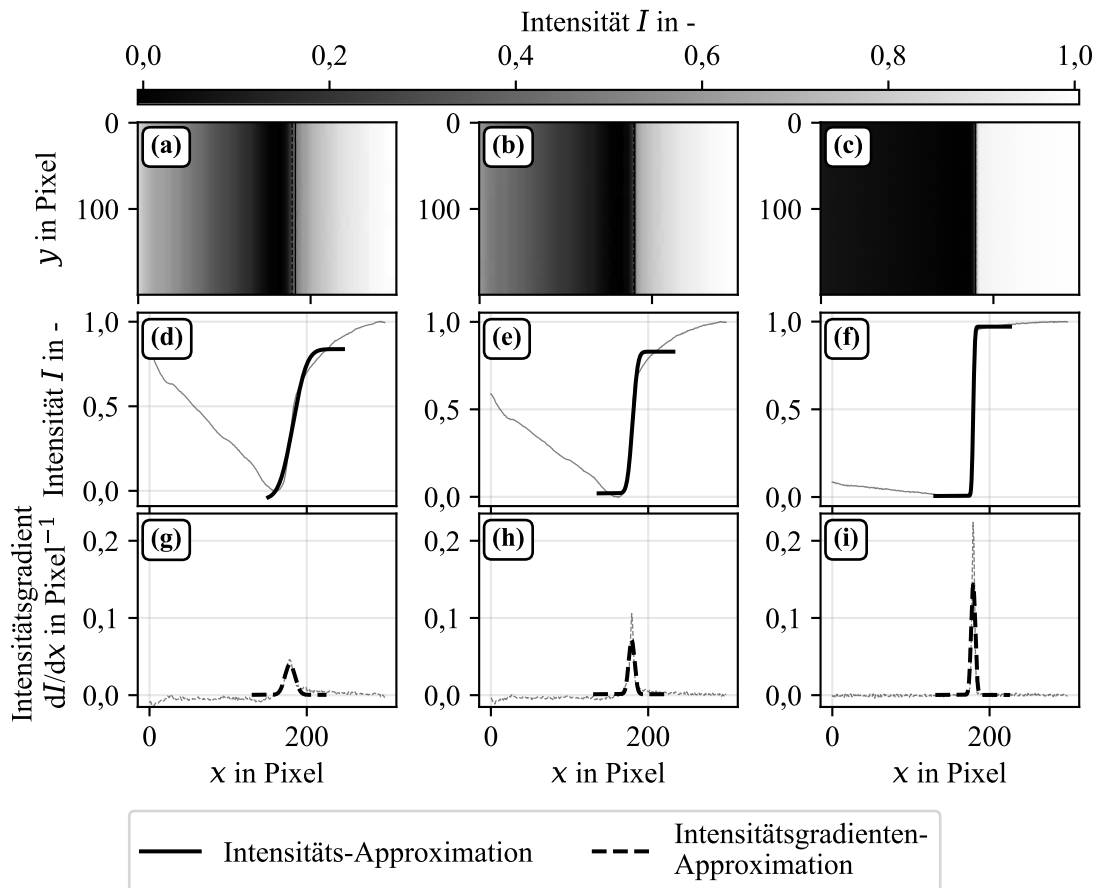


Abb. 4.4.: (a)-(c) Simulierte Strömungsvisualisierungen mit zwei Bereichen und einer Differenz der mittleren Intensitäten von 1, sowie unterschiedlich starken systematischen Gradienten in den Intensitätsverläufen der Strömungsbereiche. Die Höhe des Gradienten sinkt über die Bildserie von (a) bis (c). Lokalisierte natürliche Transition zwischen den Bereichen entsprechend der eingeführten Verfahren durch Approximation der Intensität bzw. des Intensitätsgradienten, vgl. Abschnitt 2.6. (d)-(f) Zugehörige Intensitätsverlauf der mittleren Bildzeile in (a)-(c) und Approximationsmodell. (g)-(i) Verlauf des Intensitätsgradienten analog zu (d)-(f). Ergebnis der Unterscheidbarkeiten in Tab. 4.3 und der Lokalisierung der Transition in Tab. 4.4. Die wahren Position der Transition ist bei $x_{tr,ist} = 179,22$ Pixel.

Das Ergebnis der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition ist jeweils in Abb. 4.4 (a)-(c) dargestellt. Ohne überlagertes Zufallsrauschen, sind die Intensitätsverläufe in jeder Bildzeile der Simulationsbilder identisch, weshalb auch die Lokalisierung keine zufällige Abweichung von-

einander aufweist. Eine sinkende systematische Abweichung der Lokalisierung ist jedoch deutlich zwischen den Bilder (a) bis (c) zu erkennen. Die quantifizierte zufällige Abweichung σ_{rand} und systematische Abweichung σ_{syst} ist der Tab. 4.4 zu entnehmen. Die Werte für die systematische Abweichung sinken entsprechen der Erwartung über die Bildserie (a) bis (c) für beide Approximationsverfahren, da die im Intensitätsverlauf vorhandenen Gradienten kleiner werden. Zudem ist zu erkennen, dass die Approximation des Intensitätsgradienten eine deutlich geringere Querempfindlichkeit gegenüber dem Auftreten der systematischen Gradienten in den Bildbereichen aufweist und damit als robustere Lokalisierungsverfahren mit geringeren systematischen Abweichungen aufzufassen ist.

Tab. 4.3.: CNR und Kennwerte der Unterscheidbarkeit basierend auf dem Rauschen im Bild (D_{rand}) und systematischen Gradienten im Bild (D_{syst}) der Simulationsbilder in Abb. 4.4.

	CNR	D_{rand}	D_{syst}
(a)	1,9	86,6	1,9
(b)	3,6	151,3	3,6
(c)	36,2	464,0	36,5

In Abb. 4.5 ist die zufällige (a)-(c) und systematische (d)-(f) Abweichung $\sigma_{x_{\text{tr}},\text{rand}}$ und $\sigma_{x_{\text{tr}},\text{syst}}$ der Transitionslokalisierung über D_{syst} aufgetragen. In jedem Graph ist das Ergebnis für beide Lokalisierungsverfahren, der Approximation des Intensitätsverlaufs und der Approximation des Gradienten der Intensität, dargestellt. Die für die Lokalisierung erzeugten Simulationsbildern wurden mit zufälligem Rauschen überlagert, für das eine Standardabweichung σ_{noise} von 0,01, 0,03 und 0,06 gewählt wurde. Als Referenz für eine realistisches Rauschen dient die gemessene Standardabweichung in realen Beispielmessungen, bei denen jeweils eine maximales Rauschen von $\sigma_{\text{noise}} = 0,06$ ermittelt wurde. Für einen direkten Vergleich mit dem Stand der Technik ist auch das Ergebnis der einfachen Iteration der Approximation über den gesamten Verlauf als graue Linie eingezeichnet. Der Verlauf von $\sigma_{x_{\text{tr}},\text{rand}}$ in Abb. 4.5 (a)-(c) fällt mit steigendem D_{syst} zunächst stark ab und nähert sich dann asymptotisch der minimal zu erreichenden zufälligen Messabweichung an. Die Höhe des gesamten Verlaufs, sowie der asymptotische Grenzwert steigt mit der Amplitude des Bildrauschens σ_{noise} . Die Ergebnisse sind hierbei in Übereinstimmung mit

Tab. 4.4.: Ergebnis der Lokalisierung der Transition in den simulierten Strömungsbildern Abb. 4.4(a)-(c). Zufällige Abweichung $\sigma_{x_{\text{tr}},\text{rand}}$ ist in allen Auswertungen ca. 0, da kein zufälliges Rauschen über die simulierten Bilder gelegt wurde und alle Bildzeilen identisch sind. Die systematische Abweichung $\sigma_{x_{\text{tr}},\text{syst}}$ wurde anhand der mittleren Entfernung zur wahren Position der Transition $x_{\text{tr,ist}} = 179,22$ Pixel berechnet.

Approximation	x_{tr} in Pixel			$\sigma_{x_{\text{tr}},\text{rand}}$ in Pixel			$\sigma_{x_{\text{tr}},\text{syst}}$ in Pixel		
	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)
	Abb. 4.4								
Intensität	182,37	180,08	179,24	0,08	0,01	0,00	3,15	0,86	0,02
Intensitätgradient	178,61	178,92	179,20	0,02	0,01	0,00	0,61	0,30	0,02

den analytischen Untersuchungen von Dollinger et al. [Dol2018b] für eine Differenz der beiden Strömungsbereichen $\Delta T = 1\text{K}$, sowie einer Breite des Transitionsbereichs von 12 Pixel. Die von Dollinger et al. ermittelten Abweichungen von $\sigma_{x_{\text{tr},\text{rand}}} = 0,078\text{ Pixel}$ bzw. $\sigma_{x_{\text{tr},\text{rand}}} \approx 0,15\text{ Pixel}$ für die Rauschamplituden $\sigma_{\text{noise}} = 0,034\text{K}$, bzw. $\sigma_{\text{noise}} = 0,06\text{K}$ befinden sich in der Größenordnung von $\sigma_{x_{\text{tr},\text{rand}}}$ in Abb. 4.5 (b) und (c) für $D_{\text{sys}} \rightarrow \infty$.

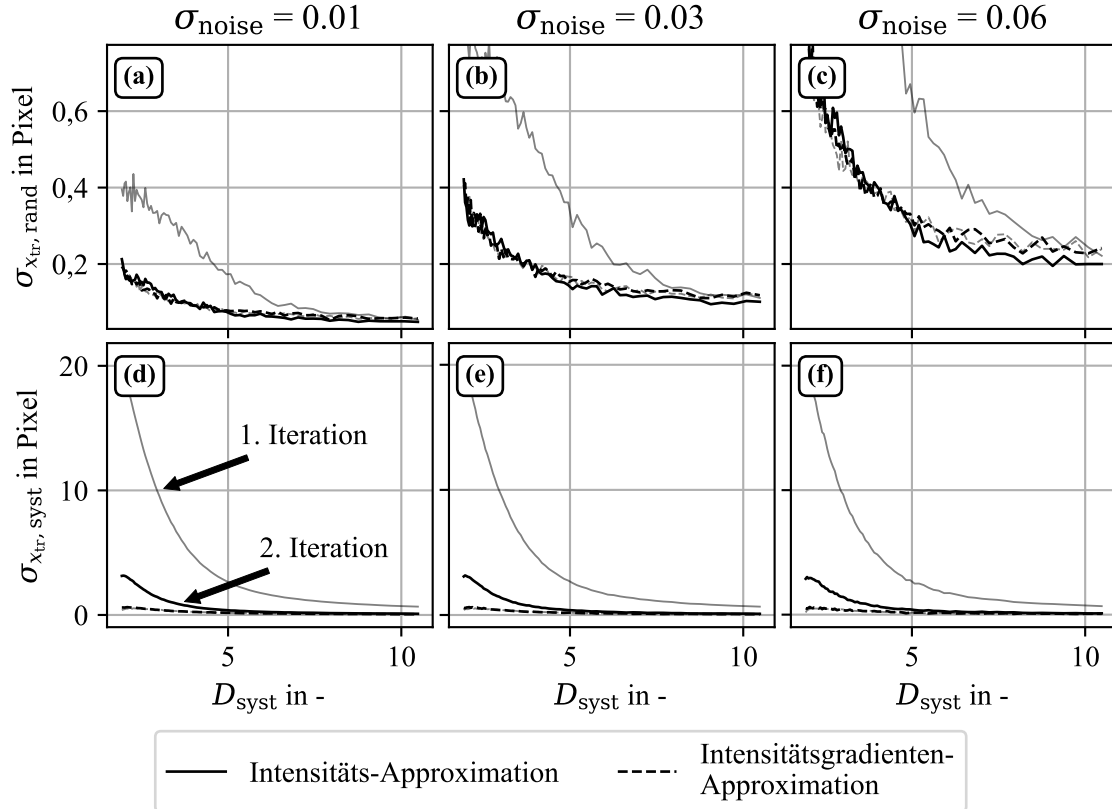


Abb. 4.5.: Zufällige (a)-(c) und systematische (d)-(f) Abweichung $\sigma_{x_{\text{tr},\text{rand}}}$ und $\sigma_{x_{\text{tr},\text{syst}}}$ der Lokalisierung der Transition in den Simulationsbildern in Abhängigkeit von der systematischen Unterscheidbarkeit D_{sys} für beide Lokalisierungsverfahren. Von links nach rechts steigende Standardabweichung σ_{noise} des überlagerten Rauschens im Simulationsbild.

Bei dem Vergleich der beiden Lokalisierungsverfahren fällt auf, dass die zufällige Abweichung ab einem $D_{\text{sys}} > 5$ bei der Approximation der Intensität geringer ist. Dies ist ebenfalls im Einklang mit dem Resultat von Dollinger et al. [Dol2018b], demnach die Intensitäts-Approximation der Gradienten-Approximation zu bevorzugen sein, um die zufällige Messabweichung zu minimieren. Jedoch gilt dies nur für ein ausreichend hohes D_{sys} , also ohne das Auftreten von systematischen Gradienten in der Strömungsvisualisierung. Dies wurde bisher nicht berücksichtigt und stellt einen Erkenntnisgewinn gegenüber den Ergebnissen von Dollinger et al. dar. Der Grenzwert von D_{sys} , ab welchem eine geringere zufällige Abweichung durch die Approximation der Intensität zu erreichen ist, wurde zudem durch die Erweiterung des Lokalisierungsverfahrens um eine zweite Iteration und eingeschränktem Approximationsbereich deutlich reduziert. Für ein $D_{\text{sys}} < 10$ liegt die zufällige Abweichung bei einer einfachen Iteration und Approximation des gesamten Intensitätsverlaufs deutlich über dem Ergebnis der Intensitätsgradienten-Approximation. Der Einfluss der systematischen Inhomogenitäten in der Strömungsvisualisierung können folglich auch bei der Beurteilung der minimal zu erreichenden zufälligen Messabweichung der Lokalisierung nicht

unberücksichtigt bleiben. Die zufällige Abweichung bei der Intensitätsgradienten-Approximation wird durch die Erweiterung der zweifachen Iteration mit eingeschränktem Approximationsbereich nicht signifikant beeinflusst.

Unberücksichtigt von Dollinger et al. blieb bis dato die Auswirkung der systematischen Gradienten auf die systematische Abweichung der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition. Der Verlauf von $\sigma_{x_{tr}, syst}$ in Abb. 4.5 (d)-(f) spiegelt die in Abschnitt 2.6.1 vorgestellten Auswirkung von systematischen Gradienten im Intensitätsverlauf ($D_{syst} \rightarrow 0$) auf die systematische Messabweichung der Transitionslokalisierung $\sigma_{x_{tr}, syst}$ wider. Auffällig ist hierbei, dass die Methode der Intensitäts-Approximation eine deutlich geringere Robustheit gegenüber den systematischen Gradienten aufweist und in eine höhere systematische Abweichung resultiert. Für einen Intensitätsverlauf mit starken Gradienten entsprechend der realen Beispielmessung ($D_{syst} = 1,9$) beträgt die Differenz der systematischen Abweichung zwischen den beiden Lokalisierungsverfahren $\Delta\sigma_{tr, syst} \approx 2,5$ Pixel. Mit steigendem D_{syst} fällt die systematische Abweichung bei beiden Verfahren zunächst stark ab und nähert sich dann dem Wert 0 asymptotisch an. Verglichen mit dem Ergebnis der einfachen Iteration wird die systematische Abweichung bei der Intensitäts-Approximation durch die Begrenzung des Approximationsbereichs deutlich um ca. 90 % reduziert. Die verschiedenen Rauschamplituden haben keinerlei Auswirkung auf die systematische Abweichung der Lokalisierungen.

Für eine geringe Rauschamplitude liegt die zufällige Abweichung bei beiden Verfahren unter der systematischen. Für eine steigende Rauschamplituden ($\sigma_{noise} = 0,03$) ist ein D_{syst} größer 5 für die Approximation des Gradienten und größer 10 für die Approximation der Intensität erforderlich, damit die systematische Abweichung unter das Niveau der zufälligen sinkt. Für ein starkes Rauschen von $\sigma_{noise} = 0,06$ und damit hohe zufällige Abweichung der Lokalisierung übersteigt die zufällige Abweichung die systematische bei der Approximation des Gradienten. Die deutlich höhere systematische Abweichung bei der Approximation der Intensität für geringe D_{syst} bewirkt, dass erst ab einem $D_{syst} > 6$ das Niveau der zufälligen Abweichung unterschritten wird.

Schlussfolgerung

Die zufällige Abweichung $\sigma_{x_{tr}, rand}$ der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition sinkt mit steigendem D_{rand} und D_{syst} . Entgegen der bisherigen Erwartung aus der Literatur, ist jedoch nicht immer mit der Approximation der Intensität eine geringere zufällige Abweichung zu erreichen. Stattdessen gilt, dass die Wahl der Approximation für geringe D_{syst} , also beim Auftreten von starken systematischen Gradienten, keine Auswirkung hat. Dies gilt unabhängig von D_{rand} . Der Einfluss der systematischen Gradienten auf die zufällige Abweichung kann mit der Begrenzung des Approximationsbereiches und zweifachen Iteration des Lokalisierungsverfahrens entgegen gewirkt werden und ist daher zwingend erforderlich, um eine minimale zufällige Abweichung zu erreichen. Unter der Verwendung dieser erweiterten Lokalisierung liegt die zufällige Abweichung bei der Intensitäts-Approximation für höhere D_{syst} unter der der Intensitätsgradienten-Approximation. Der Vorteil einer geringeren zufälligen Abweichung bei der Intensitäts-Approximation für höhere D_{syst} ist bei geringen D_{rand} größer.

Die systematische Abweichung $\sigma_{x_{tr}, syst}$ der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition sinkt mit steigendem D_{syst} , während D_{rand} keinen Einfluss hat. Für geringe D_{syst} ist die Approximation des Intensitätsgradienten zu bevorzugen, da diese robuster gegenüber dem Auftreten systematischer Gradienten in der Intensität ist. Für größere D_{syst} erreichen beide Verfahren ein ähnliches Niveau der systematischen Abweichung.

Zusammenfassend lässt sich aussagen, dass grundsätzlich D_{rand} und D_{syst} zu maximieren ist, um die zufällige und systematische Abweichung der Lokalisierung zu minimieren. Das zu bevorzugende Approximationsverfahren für verschiedene D_{rand} und D_{syst} ist der Tab. 4.5 zu entnehmen.

In der Anwendung an realen thermografische Strömungsvisualisierungen muss also das Ziel verfolgt werden, systematische Gradienten und zufälliges Rauschen in auszuwertenden Strömungsvisualisierung zu reduzieren, um eine Approximation der Intensitäts für eine Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition mit minimaler systematischer und zufälliger Abweichung zu erreichen. Bildverarbeitungsmethoden zur Erzeugung von Strömungsvisualisierungen müssen daher das Ziel haben Bildbereiche mit möglichst geringen zufälligen und systematischen Inhomogenitäten zu erzeugen. Zu erreichende Werte für D_{rand} und D_{syst} können nicht allgemeingültig bestimmt werden, da ihre Quantifizierung stark von den Bilddimensionen und damit Anzahl an Werten, die in die Quantifizierung eingehen, und der räumlichen Auflösung der Visualisierung abhängen. Die Kenngrößen dienen hingegen dem direkten Vergleich der Ergebnisse verschiedener Bildverarbeitungsmethoden zur Visualisierung der Strömung.

Tab. 4.5.: Zu bevorzugendes Approximationsverfahren hinsichtlich einer minimalen zufälligen $\sigma_{x_{\text{tr}},\text{rand}}$ und systematischen Abweichung $\sigma_{x_{\text{tr}},\text{syst}}$ bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition in Abhängigkeit von den Kennzahlen der Unterscheidbarkeit D_{syst} und D_{rand} in den Simulationsbildern zur thermografische Strömungsvisualisierung.

		D_{syst}	
		D_{rand}	
			niedrig hoch
minimale zufällige Abweichung $\sigma_{x_{\text{tr}},\text{rand}}$	niedrig	keine Präferenz	Intensität
	hoch	keine Präferenz	Intensität
minimale systematische Abweichung $\sigma_{x_{\text{tr}},\text{syst}}$	niedrig	Intensitätsgradient	keine Präferenz
	hoch	Intensitätsgradient	keine Präferenz

4.3. Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der spatio-temporalen Bildverarbeitung von thermografischen Bildserien vorgestellt und bewertet. Zunächst werden die in Abschnitt 4.1 eingeführten Methoden angewandt, um Bilder zu erzeugen, die anschließend bezüglich ihrer Eignung als Strömungsvisualisierung untersucht werden. Hierzu finden die in Abschnitt 2.5.1 eingeführten Kenngrößen des CNR, D_{syst} und D_{rand} Anwendung, um die globale Unterscheidbarkeit zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich zu bewerten. Hierbei spiegeln die beiden letzteren wieder, inwiefern die erzeugten Bilder verringerte zufällige Inhomogenitäten und systematische Gradienten gegenüber dem vorherrschenden absoluten Kontrast zwischen den Strömungsbereichen aufweisen. Es werden die Ergebnisse der klassischen Methoden der Mittelwertbildung (MW) und zeitlichen Standardabweichung (STA) und die erweiterten Verfahren der Merkmalsextraktion Hauptkomponentenanalyse (PCA) und nicht-negative Matrixfaktorisierung (NNMF) verglichen.

In einem zweiten Schritt werden die erzeugten und als Strömungsvisualisierungen interpretierten Bilder bezüglich der Messabweichung bei der Lokalisierung der natürlichen laminar-turbulenten Transition ausgewertet. Die Lage der Transition wird hierfür durch die in Abschnitt 2.6.1 eingeführten Verfahren der Approximation der Intensität bzw. des Intensitätsgradienten lokalisiert und die Abweichung gegenüber einer Referenzposition quantifiziert. Für die direkte Bewertung des Zusammenhanges von der Strömungsvisualisierung und der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition in den Ergebnissen, werden diese beiden Schritte jeweils in

direkter Abfolge, und damit nach den Messdaten, und nicht thematisch sortiert.

Es werden drei verschiedene Messobjekte mit unterschiedlichen Messsituationen ausgewertet. Zunächst wird eine Verifikation der Verfahren anhand eines standardisierten und gut bekannten Zylinderobjekts im Windkanal in Abschnitt 4.3.1 durchgeführt. Es folgen zwei Windkanalexperimente an einem Tragflächenmodell des Typs DU96W180 bei denen einmal ein hoher Kontrast, Abschnitt 4.3.2, und einmal ein geringem Kontrast, Abschnitt 4.3.3, zwischen der laminaren und turbulenten Strömung in den thermografischen Rohdaten vorherrscht. Abschließend werden zwei Freifeldexperimente an einer sich in Betrieb befindlichen WEA ausgewertet. Hier wurde ebenfalls darauf geachtet, eine Messung mit niedrigerem, Abschnitt 4.3.4, und eine Messung mit höherem Kontrast, Abschnitt 4.3.5, zwischen den Strömungszuständen zu betrachten. Die Akquirierung der thermografischen Bildserie in den Freifeldexperimenten wurde durch das in Abschnitt 3.2 vorgestellte Triggersystem verwirklicht.

4.3.1. Validierung (Zylinderobjekt)

Die Validierung der eingeführten Bildverarbeitungsverfahren wird an einem umströmten Zylinderobjekt mit einem Durchmesser von 160 mm durchgeführt, welches in der Mitte der geschlossenen Versuchsstrecke des aeroakustischen Windkanals der *Deutschen WindGuard Engineering GmbH* positioniert wird, vgl. experimenteller Messaufbau in Abschnitt 2.4.1. Das für den Zylinder verwendete Material ist Polyoxymethylen und weist an der Oberfläche thermische Eigenschaften mit einer geringen Wärmeleitung auf und ist daher für die thermografische Strömungsvisualisierung gut geeignet.

Das Messobjekt ist mit 73 Drucksensoren in der Oberfläche ausgestattet. Die Druckbohrungen haben einen Durchmesser von 0,3 mm und sind in einem Abstand von 5° spiralförmig angeordnet, um die Auswirkung einer durch die Bohrlöcher beeinflussten Grenzschichtströmung auf die dahinter liegenden Drucksensoren zu vermeiden, vgl. Abb. 4.6.

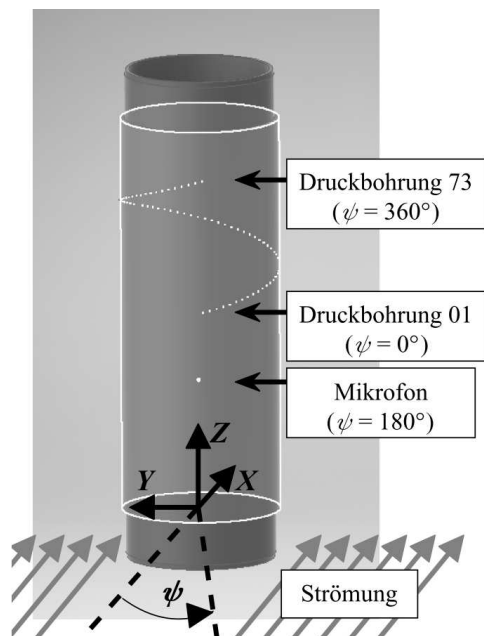


Abb. 4.6.: Das Zylinder-Messobjekt inkl. Druckbohrungen und Mikrofon nach [Dol2018a].

Tab. 4.6.: Winkelverteilung der Strömungszustände in der Grenzschicht des umströmten Zylindermodells (aus den Referenzmessverfahren).

$0^\circ \leq \Psi \leq 101^\circ$	laminar (L)
$\Psi_{la} \approx 102^\circ$	laminare Ablöseblase
$102^\circ \leq \Psi \leq 116^\circ$	laminar abgelöst (LA)
$\Psi_w \approx 117^\circ$	Wiederanlegung
$117^\circ \leq \Psi \leq 139^\circ$	turbulent (T)
$\Psi_{ta} \approx 140^\circ$	turbulente Ablösung
$140^\circ \leq \Psi \leq 180^\circ$	turbulent abgelöst (TA)

Die mittelwellige Infrarotkamera, vgl. Abschnitt 2.3.2, beobachtet die Zylinderoberfläche durch das CaF_2 -Fenster quer zur Strömungsrichtung. Zusätzlich ist in einem anderen Abschnitt des Zylinderobjekts eine fluoreszierende Öl-Pigment-Mischung aufgetragen, um eine Ölfilmvisualisierung der Grenzschichtströmung zu ermöglichen. Anhand von lokalen Anstauungen des Ölfilms können speziell die Anfangs- und Endpunkte von Strömungsablösungen klar identifiziert werden. Der Ölfilm wird mit einer optischen Spiegelreflexkamera (DSLR) aufgenommen. Als dritte Messtechnik zur Bestimmung der Grenzschichtströmung werden akustische Messungen durchgeführt. Hierfür ist ein Kondensatormikrofon mit einer Empfindlichkeit von $-43\text{ dB} \pm 3\text{ dB} @ 94\text{ dB}$ Schalldruckpegel und einem Frequenzbereich von 100 Hz bis 10 kHz in der Oberfläche des Zylinders eingebracht. Die Akustikmessung wird mit einem sich langsam stetig rotierenden Zylinder durchgeführt. Die gewählte Strömungsgeschwindigkeit beträgt $v_\infty = 50\text{ ms}^{-1}$, was in eine Reynoldszahl von $Re = 5,2 \cdot 10^5$ resultiert. Aus der Auswertung der Druckmessungen, der Ölfilmvisualisierung und der akustischen Messung folgt die Winkelverteilung der Strömungszustände in der Grenzschicht des Zylinder in Tab. 4.6. Für eine nähere Informationen bzgl. der Auswertung der Referenzmessungen wird an dieser Stelle auf die Arbeit von Dollinger et al. [Dol2018c] verwiesen.

In Abb. 4.7 ist eine thermografische Strömungsvisualisierung der Zylinderoberfläche mit den aus den Referenzmessungen ermittelten Bereichen der unterschiedlichen Strömungszustände dargestellt. Die Intensitätswerte in der Aufnahme wurden auf das Intervall $[0, 1]$ normiert. Es sind Intensitätsgradienten innerhalb des laminaren und turbulenten Strömungsbereichs aufgrund der Sehnen-Positionsabhängigkeit des Reibungskoeffizienten und damit des Wärmeübergangskoeffizienten zu erkennen. Die Mitte des Bildes ist am Ende des laminaren Strömungsbereichs mit einer Reflexion des Kameraobjektivs überlagert. Zusätzlich sind zufällige Temperaturschwankungen aufgrund von Strömungsunregelmäßigkeiten und Messrauschen zu erkennen. Dennoch ist eine qualitative Unterscheidbarkeit zwischen des laminaren und turbulenten Strömungsbereichs aufgrund unterschiedlicher Intensitäten im Bild vorhanden. Das CNR_{lt} zwischen der laminaren und turbulenten Strömung beträgt 2,42. Die Kenngrößen für die Unterscheidbarkeit basierend auf systematische und zufällige Inhomogenitäten in den Strömungsbereichen quantifizieren sich zu $D_{\text{sys}} = 2,77$ und $D_{\text{rand}} = 6,73$. Aus dem geringen Wert für D_{sys} folgt, dass das CNR durch systematische Gradienten in den Strömungsbereichen limitiert ist, da die Unterscheidbarkeit aufgrund von zufälligen Inhomogenitäten einen deutlich höheren Wert von erreicht.

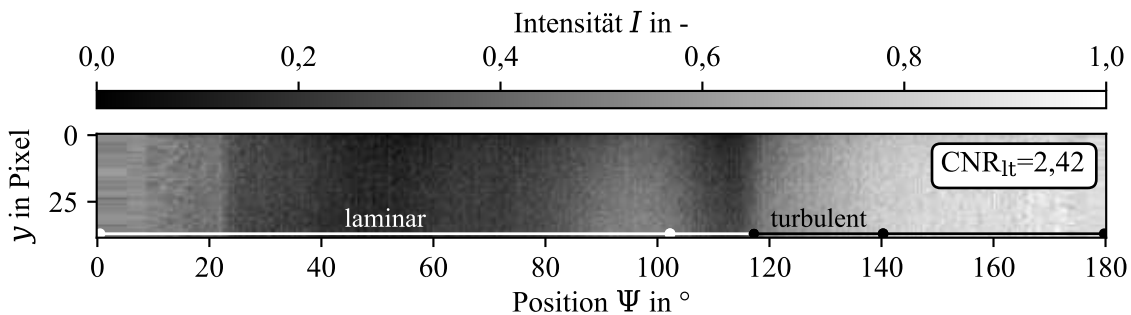


Abb. 4.7.: Entzerrte thermografische Strömungsvisualisierung der Zylinderoberfläche des Azimutwinkel $0^\circ \leq \Psi \leq 180^\circ$. Bereiche der markierten laminaren und turbulenten Strömung aus Referenzmessungen, vgl. Tab. 4.6.

Strömungsvisualisierung

Im Folgenden werden die in Abschnitt 4.1 eingeführten Bildverarbeitungsmethoden auf die Bilderserie von thermografischen Aufnahmen der Grenzschichtströmung angewandt. Es wurden eine

Bildserie mit $N = 1000$ Einzelaufnahmen und einer Frequenz von 20Hz ausgewertet. Zunächst werden die beiden Verfahren der Merkmalsextraktion angewandt und die resultierenden Strömungsvisualisierungen durch das CNR_{lt} und die Unterscheidbarkeitsparameter D_{sys} und D_{rand} bewertet. Anschließend wird die aus den Verfahren resultierenden besten Strömungsvisualisierungen mit den Ergebnissen der klassischen Verfahren der MW-Bildung und zeitlichen STA verglichen.

In Abb. 4.8 und Abb. 4.9 sind die Ergebnisse der NMF und der PCA in Form der ersten fünf NNC, bzw. PC, dargestellt. Es ist zu erkennen, wie in den verschiedenen Visualisierungen unterschiedliche Strömungsbereiche hervorgehoben sind. In fast allen ist besonders der Bereich der Wiederanlegung bei $\Psi_w = 117$ Pixel deutlich erkennbar. Ursache hierfür ist vermutlich eine räumliche Fluktuation der Wiederanlegung und damit hohe zeitliche Varianz der Intensitätswerte in diesem Bereich. Auffällig ist, dass in keiner der NNC oder PC das Messartefakt der sichtbare Reflexion der Kameralinse abgebildet ist. Diese Artefaktfilterung stellt bereits einen ersten Vorteil der Verfahren der Merkmalsextraktion zur Erzeugung von Strömungsvisualisierungen mit reduziertem Einfluss von konstant überlagerten Signalen dar.

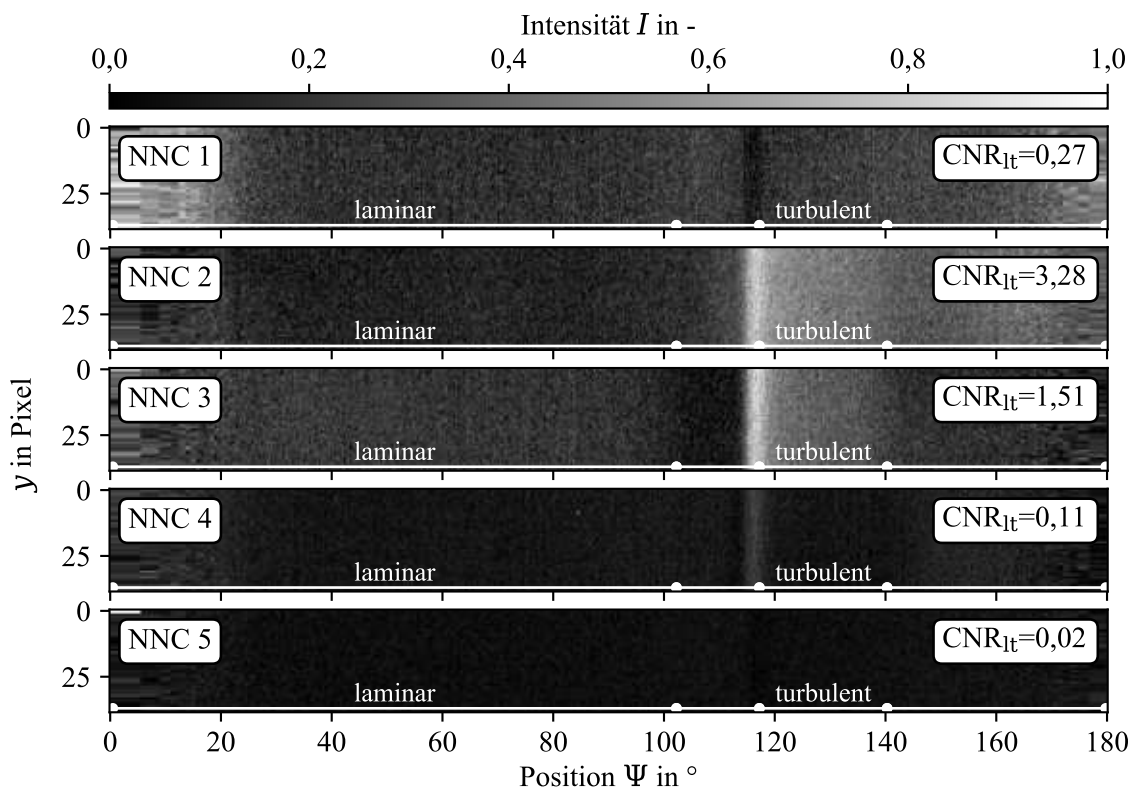


Abb. 4.8.: Ergebnis der NMF Auswertung der Bildserie im Zylinder-Experiment. Maximales CNR_{lt} zwischen laminarem und turbulentem Strömungsbereich in NNC 2.

Die Auswertung des CNR_{lt} zwischen den laminaren und turbulenten Strömungsbereichen in den NNC und PC zeigt auf, dass der höchste Kontrast jeweils in NNC 2, bzw. PC 2 mit einem Wert von 3,28 und 2,65 liegt. In Tab. 4.7 und Tab. 4.8 sind neben dem CNR_{lt} auch die Unterscheidbarkeitsparameter D_{sys} und D_{rand} der einzelnen Visualisierungen aufgelistet. Während D_{sys} und D_{rand} in NNC 2 ebenfalls maximal ist, übersteigt D_{sys} in PC 3 den Wert in PC 2. Die hohen Werte deuten darauf hin, dass die Bereiche der laminaren und der turbulenten Strömung in den Visualisierungen die jeweils geringsten systematischen Gradienten in Relation zu der existierenden Differenz der mittleren Intensitäten aufweisen, vgl Abschnitt 2.5.1. Dagegen beträgt

die Unterscheidbarkeit bewertet anhand des zufälligen Rauschens in den Strömungsbereichen nur $D_{\text{rand}} = 2,21$ in PC 3 und ist genau wie das CNR_{lt} ebenfalls in PC 2 maximal mit einem Wert von $D_{\text{rand}} = 3,54$. Die Auswahl der besten Visualisierungen, basierend auf dem maximalen CNR_{lt} , fällt folglich auf die NNC 2 als Ergebnis der NMF und PC 2 als Ergebnis der PCA und werden im Folgenden mit den Ergebnissen der klassischen Auswertung verglichen.

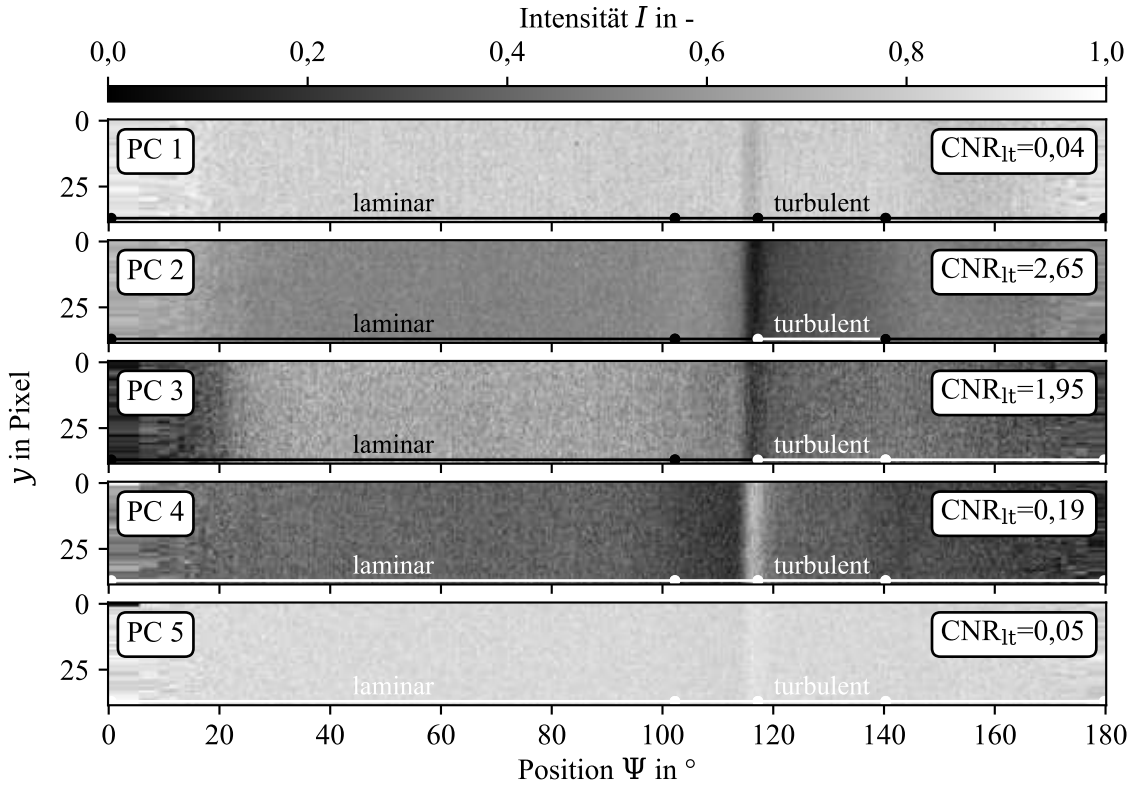


Abb. 4.9.: Ergebnis der PCA Auswertung der Bildserie im Zylinder-Experiment. Maximales CNR_{lt} zwischen laminarem und turbulenten Strömungsbereich in PC 2.

Tab. 4.7.: CNR_{lt} und Unterscheidbarkeitsparameter zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich in Abb. 4.8.

	CNR_{lt}	D_{sys}	D_{rand}
NNC 1	0,27	0,81	0,31
NNC 2	3,28	6,23	4,09
NNC 3	1,51	2,77	1,90
NNC 4	0,11	0,35	0,12
NNC 5	0,02	0,05	0,02

Tab. 4.8.: CNR_{lt} und Unterscheidbarkeitsparameter zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich in Abb. 4.9.

	CNR_{lt}	D_{sys}	D_{rand}
PC 1	0,04	0,13	0,04
PC 2	2,65	4,36	3,54
PC 3	1,95	5,25	2,21
PC 4	0,19	0,44	0,22
PC 5	0,05	0,17	0,05

In Abb. 4.10 ist das Ergebnis der klassischen Bildverarbeitungsverfahren, der Mittelwertbildung (MW) und der zeitlichen Standardabweichung (STA) sowie die zuvor ausgewählten Visualisierungen der NMF und PCA dargestellt. In Tab. 4.9 sind die zugehörigen Werte für die Unterscheidbarkeitsparameter aufgelistet. Zunächst sei bemerkt, dass in dem MW der gewünschten Effekt

einer Kontraststeigerung durch Reduzierung von Bildrauschen zu erkennen ist. Das CNR_{lt} in der Einzelaufnahme, vgl. Abb. 4.7, von $CNR_{lt} = 2,42$ wurde auf ein CNR_{lt} von 2,52 gesteigert. Die Auswertung der Unterscheidbarkeitsparameter verdeutlicht, dass der maßgebliche Einfluss auf das gesteigerte CNR_{lt} in der Reduzierung des Rauschens liegt. Die Unterscheidbarkeit D_{rand} ist durch die MW-Bildung von 6,73 auf 9,49 gesteigert, während D_{syst} von 2,77 in der Einzelaufnahme und 2,80 im MW nahezu unverändert bleibt. Die Unterscheidbarkeit negativ beeinflussende systematische Gradienten bleiben also bei der MW-Bildung bestehen. Dies betrifft sowohl Gradienten, die aus der Grenzschichtströmung, als auch überlagerte Artefakte in Form der Kamerareflexion, entstehen. Eine Reduktion der Gradienten durch Auswertung von zeitlichen Fluktuationen ist durch die Berechnung der STA möglich. Konstante Werte eines überlagerten Signals in Form einer Reflexion auf der Oberfläche, wie es bei der betrachteten Messung durch die Kameralinse entsteht, werden bei der Betrachtung der Fluktuationen erfolgreich ausgefiltert. Die Strömungsbereiche sind deutlich homogener als in den anderen Visualisierungen, weisen aber rein visuell bewertet ein höheres Rauschen auf. Die absolute Differenz zwischen den mittleren Intensitäten des laminaren und turbulenten Strömungsbereichs hingegen fällt sehr gering aus, weshalb alle Kennwerte in Tab. 4.9 für die STA den geringsten Wert von allen Visualisierungen haben.

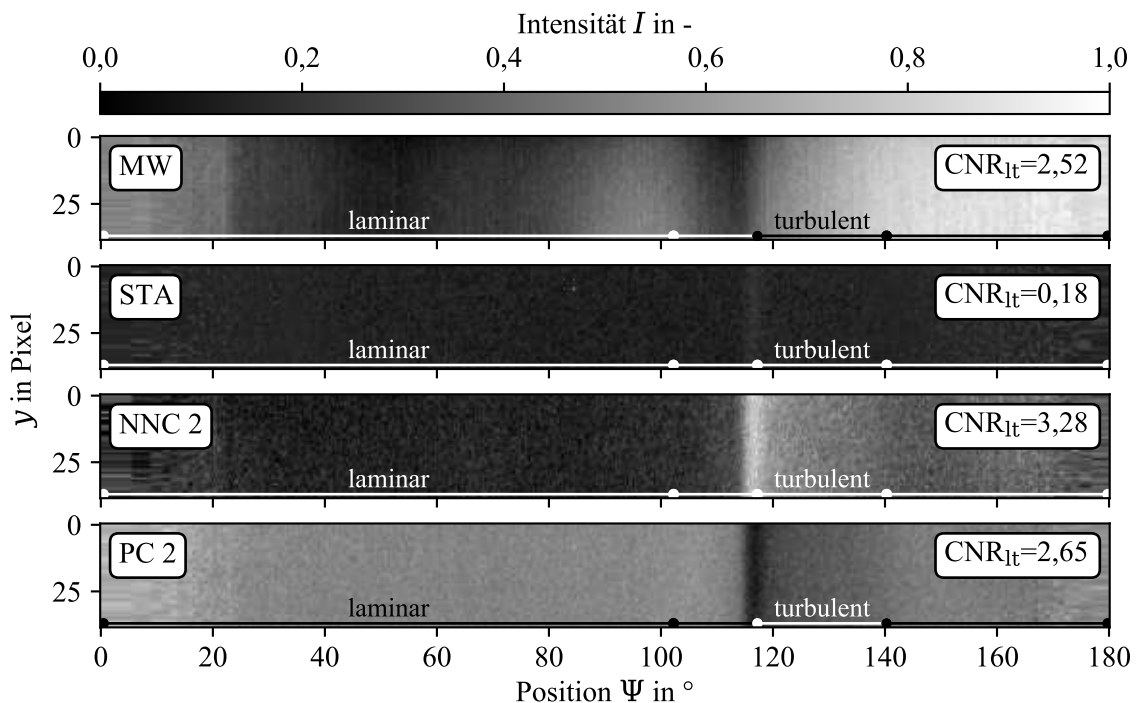


Abb. 4.10.: Vergleich der Strömungsvisualisierungen resultierend aus den klassischen Auswertemethoden der Mittelwertbildung (MW) und der zeitlichen Standardabweichung (STA), sowie den erweiterten Methoden der Merkmalsextraktion NNMF (NNC) und PCA (PC). Das maximale CNR_{lt} und D_{syst} zwischen der laminaren und turbulenten Strömung kann im Ergebnis der NNMF mit 3,28 bzw. 6,23 verzeichnet werden.

Das NNMF und PCA Ergebnis weist dagegen eine deutlich gesteigertes D_{syst} auf, demnach systematische Gradienten in den Strömungsbereichen gegenüber dem existierenden Kontrast zwischen den mittleren Intensitäten reduziert sind. Speziell das Reflexionsartefakt ist vollständig ausgefiltert und die Strömungsbereiche deutlich homogenisiert. Die Unterscheidbarkeit, basierend auf dem Bildrauschen D_{rand} verbleibt jedoch in beiden Visualisierungen unter dem Niveau des MW. Ein maximales D_{syst} und daraus resultierendes maximales CNR_{lt} ist im Ergebnis der

NNMF zu verzeichnen, durch welches das CNR_{lt} von 2,52 im MW auf 3,28 gesteigert wurde. Durch die Verwendung der NNMF und PCA wurden Strömungsvisualisierungen erzeugt, in denen das CNR zwischen laminarer und turbulenter Strömung maximiert ist, indem systematische Gradienten in den Strömungsbereichen minimiert wurden.

Tab. 4.9.: CNR_{lt} und Unterscheidbarkeitsparameter zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich in Abb. 4.10

	CNR_{lt}	D_{sys}	D_{rand}
MW	2,52	2,80	9,49
STA	0,18	0,56	0,19
NNC 2	3,28	6,23	4,09
PC 2	2,65	4,36	3,54

Für eine weitere Bewertung des CNR_{lt} ohne den Einfluss der Reflexion in der MW Visualisierung wird der laminare Bereich nur bis $\Psi \approx 70^\circ$ ausgewertet. Daraus ergibt sich ein höheres CNR_{lt} in der MW Visualisierung von 3,60. Die maximalen CNR_{lt} in den Ergebnissen der NNMF und PCA sind jeweils 3,30 und 2,62. Die Verfahren der Merkmalsextraktion bewirken in diesem Fall keine Steigerung des CNR. Was jedoch verbleibt ist eine Steigerung des D_{sys} in sowohl NNC 2, als auch PC 2, was nichtsdestotrotz einen Vorteil für die folgende Bewertung der Messabweichungen bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition bedeutet.

Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition

Im Folgenden wird untersucht, welchen Einfluss die zuvor erzeugten Strömungsvisualisierungen auf die Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition haben. In der vorliegenden Messung am Zylinderobjekt existiert zwischen der laminaren und turbulenten Strömung eine laminare Ablöseblase, über der die Transition von laminarer zu turbulenter Strömung stattfindet. Da die angewandten Lokalisierungsverfahren für eine punktuelle Bestimmung der natürlichen Transition entlang der Strömungsrichtung ausgelegt sind, wird als Referenz für die wahre Position, der mittlere Punkt der Ablöseblase bei $\Psi_{\text{tr,ref}} = 109,6^\circ$ gewählt.

In Abb. 4.11 sind der Intensitätsverlauf und darunter der Verlauf des Intensitätsgradienten der mittleren Bildzeile der Visualisierungen aus Abb. 4.10 dargestellt. Zudem sind jeweils die Ergebnisse der Approximationen zur Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition in fett eingezeichnet. Das Ergebnis der Lokalisierung ist jeweils mit einer vertikalen gepunkteten Linie markiert.

In dem Intensitätsverlauf des MW ist zu erkennen, dass der Verlauf deutlich von der Modellfunktion abweicht. Zum einen ist der Grund hierfür der Anstieg der Intensität zum Ende des laminaren Strömungsbereichs im Bereich der Kamerareflexion und zum anderen ein stetiger Anstieg der Intensität im turbulenten Bereich. Aus der Abweichung resultiert die zuvor analysierte systematische Abweichung der Lokalisierung von der Referenzposition. Ebenfalls konform mit den Erkenntnissen aus den Simulationen im vorangegangenen Abschnitt haben diese Abweichungen des Intensitätsverlaufs einen deutlich geringere Auswirkung auf die Lokalisierung der Transition durch eine Approximation des Intensitätsgradienten. Der maximale Gradient wird im Bereich der Wiederanlegung bei $\Psi_{\text{tr}} \approx 118^\circ$ lokalisiert. In der Strömungsvisualisierung generiert durch die STA existieren keine deutlichen Merkmale in den Verläufen, die eine Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition ermöglichen. Für beide Lokalisierungsverfahren entstehen große systematische Abweichungen von der Referenzposition. In den NNMF- und PCA-Visualisierungen

sind hingegen zwei deutlich voneinander unterscheidbare Strömungsbereiche zu erkennen, die sich anhand des Intensitätsniveaus unterscheiden lassen. Während der laminare Strömungsbereich ein nahezu konstantes, homogenes Niveau besitzt, verbleibt im turbulenten Strömungsbereich ein systematischer Gradient, der aber geringer als im MW ausfällt. Zusätzlich verbleibt ein Bereich mit deutlich erhöhter bzw. reduzierter Intensität im Bereich der Wiederanlegung bei $\Psi_w = 117^\circ$. Da diese Bereiche jedoch lokal begrenzt sind, wird die Approximation der Intensität nur geringfügig beeinflusst. Der späte Anstieg bzw. Abfall der Intensität im Bereich der Ablöseblase sorgt jedoch für eine systematische Abweichung der lokalisierten Transition im hinteren Bereich der Ablöseblase. Jedoch wird damit die Transition deutlich näher an der Referenzposition lokalisiert als in der MW Visualisierung. Der gleiche Effekt trifft auf die Lokalisierung im Verlauf des Intensitätsgradienten zu. Die Visualisierungen der NNMF und PCA ermöglichen folglich durch die Verringerung der systematischen Gradienten und durch das Beibehalten eines Intensitätsunterschiedes zwischen den Bereichen eine scharfe Abtrennung der laminaren und turbulenten Strömung. Sowohl die Bildverarbeitungsverfahren als auch die Lokalisierungsverfahren werden jedoch durch die Existenz der laminaren Ablöseblase beeinflusst, weshalb eine systematische Abweichung bei der Lokalisierung verbleibt. Diese wird jedoch gegenüber dem MW deutlich reduziert.

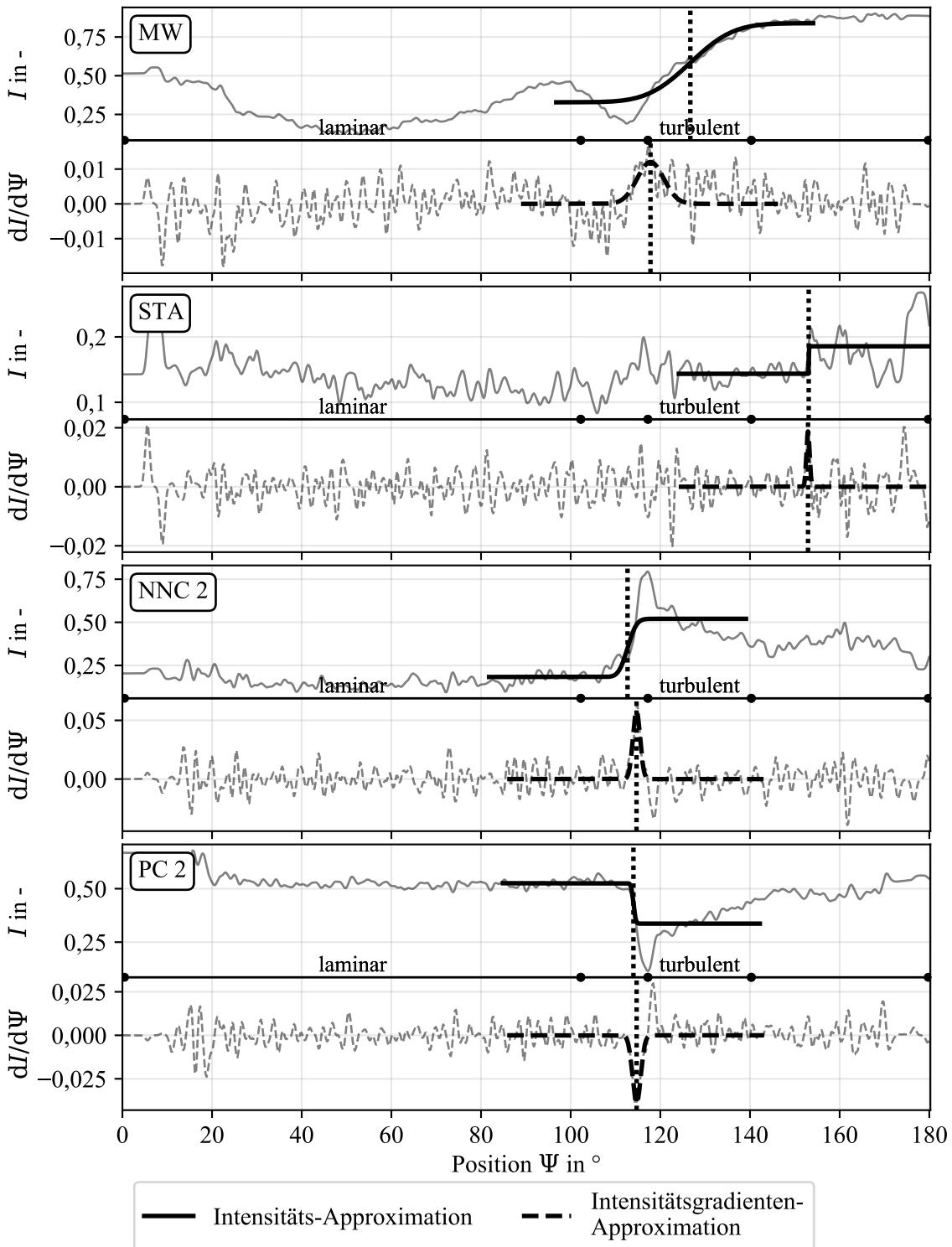


Abb. 4.11.: Verlauf der Intensität I und zugehörigen Gradienten $dI/d\psi$ der mittleren Bildzeile in den Strömungsvisualisierungen in Abb. 4.10. In fett dargestellt sind die Approximationen der Verläufe als Ergebnis der eingeführten Lokalisierungsverfahren. Die Position der lokalisierten Transition ist mit einer vertikalen gepunkteten Linie eingezeichnet. Referenzposition der laminar-turbulenten Transition ist $\Psi_{tr,ref} = 109,6^\circ$.

Werden die Lokalisierungsverfahren auf alle Bildzeilen angewandt, ergeben sich die in Abb. 4.12 dargestellten Transitionslinien. Die unterschiedlichen Ergebnisse beziehen sich auf die Lokalisierung in den jeweiligen Visualisierung in Abb. 4.10. Als Hintergrund ist in jedem Bild die thermografische Einzelaufnahme aus Abb. 4.7 dargestellt, um das Potential der neu erzeugten Visualisierungen gegenüber der Einzelaufnahme hervorzuheben. Die mittlere lokalisierte Position der Transition $\bar{\Psi}_{tr}$ ist in Tab. 4.10 aufgelistet. Zusätzlich wird die zufällige Abweichung $\sigma_{x_{tr},rand}$ und die systematische Abweichung von der Referenzposition $\sigma_{x_{tr},syst}$ quantifiziert.

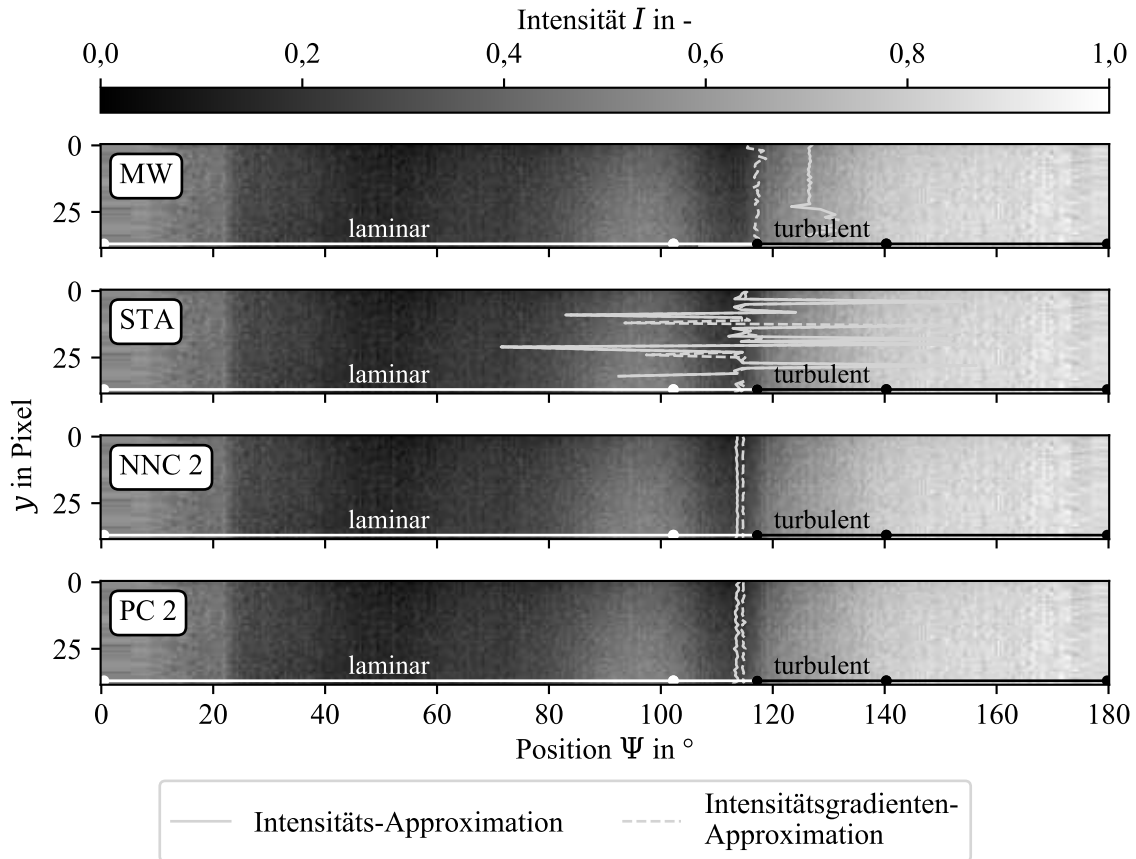


Abb. 4.12.: Lokalisierte Transitionslinie basierend auf einer Auswertung in den jeweiligen Strömungsvisualisierungen in Abb. 4.10 für beide Lokalisierungsverfahren. Die mittlere lokalisierte Position, zufällige und systematische Abweichung von der Referenzposition $\Psi_{tr,ref} = 109,6^\circ$ sind in Tab. 4.10 aufgelistet.

Eine visuelle Betrachtung der Transitionslinien erlaubt die Beurteilung, dass die Lokalisierung der Transition in der STA Visualisierung kein brauchbares Ergebnis liefert. Dies entspricht der Erwartung aus den vorangegangenen Betrachtungen des Intensitätsverlaufs und der Bewertung der Visualisierung. In der MW Visualisierung hingegen sind deutlich lokalisierte Transitionslinien bei $\bar{\Psi}_{tr} = 126,74^\circ$ und $\bar{\Psi}_{tr} = 117,13^\circ$ durch die Approximation der Intensität bzw. des Gradienten zu erkennen. Beide Transitionslinien weisen jedoch mehrere Ausreißer von der zu erwartenden geradlinigen Transitionslinie auf, aus denen eine zufällige Abweichung von $\sigma_{x_{tr},rand} = 3,78^\circ$ und $\sigma_{x_{tr},rand} = 0,67^\circ$ entsteht. Aus den im vorangegangenen Absatz genannten Gründen existiert durch die Approximation der Intensität eine systematische Abweichung der mittleren Transitionsposition von $\sigma_{x_{tr},syst} = 17,15^\circ$.

Aus der Approximation des Intensitätsgradienten in der NNC und PC resultiert eine identische

zufällige Abweichungen von $\sigma_{x_{tr,rand}} = 0,18^\circ$ und systematische Abweichungen von $\sigma_{x_{tr,syst}} = 4,91^\circ$ bzw. $\sigma_{x_{tr,syst}} = 4,99^\circ$. Ein Unterschied zwischen den Visualisierungen besteht bei den Abweichungen der Lokalisierung durch die Approximation der Intensität. Während die zufällige Abweichung bei der Auswertung von PC 2 mit $\sigma_{x_{tr,rand}} = 0,24^\circ$ geringer ist und das absolute Minimum zwischen allen Visualisierungen darstellt, ist die systematische Abweichung $\sigma_{x_{tr,syst}} = 2,87^\circ$ in der NNC 2 Visualisierung das absolute Minimum. Bei dem Vergleich der Lokalisierungsverfahren ergibt sich also, dass die Approximation der Intensität eine geringere systematische Abweichung und die Approximation des Gradienten eine geringere zufällige Abweichung ergibt. In allen Fällen ermöglichen die Bildverfahren der Merkmalsextraktion die Erzeugung von Strömungsvisualisierungen, in denen die Abweichungen der Lokalisierung der laminar-turbulente Transition gegenüber dem MW deutlich reduziert sind.

Tab. 4.10.: Mittlere lokalisierte Transitionsposition $\bar{\Psi}_{tr}$, sowie zufällige und systematische Abweichung $\sigma_{\Psi_{tr,rand}}$ und $\sigma_{\Psi_{tr,syst}}$ von der Referenzposition $\Psi_{tr,ref} = 109,6^\circ$ in Abb. 4.12.

Approx.	$\bar{\Psi}_{tr}$ in $^\circ$				$\sigma_{\Psi_{tr,rand}}$ in $^\circ$				$\sigma_{\Psi_{tr,syst}}$ in $^\circ$			
	MW	STA	NNC	PC	MW	STA	NNC	PC	MW	STA	NNC	PC
Intensität	126,7	116,1	112,4	113,4	3,78	17,39	0,55	0,24	17,15	6,55	2,87	3,81
Int.-gradient	117,1	114,8	114,5	114,5	0,67	16,80	0,18	0,18	7,52	5,29	4,91	4,99

In diesem Abschnitt wurde eine Bildserie von thermografischen Strömungsvisualisierungen eines Zylinder-Messobjekts mit Referenzmessergebnissen der Grenzschichtströmung ausgewertet. Dabei konnten die Verfahren der Merkmalsextraktion gegenüber den klassischen Verfahren eine deutliche Steigerung des CNR erreichen, indem systematische Gradienten reduziert wurden, die in Form einer konstant überlagerten Reflexion bestanden. Dies ermöglichte eine deutliche Unterscheidung der laminaren und turbulenten Strömung, aus der reduzierte Abweichungen bei der Lokalisierung resultiert, wenn diese in den Strömungsvisualisierungen der Merkmalsextraktionen durchgeführt wird. Somit konnte dargestellt werden, dass die Bildverarbeitungsverfahren das Potential haben Strömungsvisualisierungen zu erzeugen, bei denen zufällige und systematische Inhomogenitäten gegenüber dem vorhandenen Kontrast zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich verringert sind und so die Messabweichung der Lokalisierung der natürlichen laminar-turbulenten Transition reduziert werden konnte.

4.3.2. Windkanal (DU96W180) - hoher Kontrast

Um ein Messobjekt zu untersuchen, welches der Anwendung an Rotorblättern von WEA entspricht, wird als Messobjekt ein Modell eines DU96W180-Tragflächenprofils verwendet. Die Profilform des Modells ist in Abb. 4.14 (a) dargestellt. Die Sehnenlänge beträgt 600 mm und die Oberfläche weist die gleichen Materialeigenschaften wie ein reales Rotorblatt auf. Der Messaufbau entspricht dem experimentellen Windkanal-Aufbau aus Abschnitt 2.4.1. Zunächst werden die Messparameter so gewählt, dass ein hoher Kontrast zwischen der laminaren und turbulenten Strömung entsteht. Die Strömungsgeschwindigkeit beträgt $v_\infty = 73 \text{ ms}^{-1}$, was in einer für WEA in Betrieb typische Reynoldszahl von $Re = 3 \cdot 10^6$ resultiert. Der Anstellwinkel des Tragflächenprofils ist $\alpha_{aoa} = 6^\circ$ und die gewählte Integrationszeit der mittelwelligen Infrarotkamera beträgt $t_{IT} = 1600 \mu\text{s}$. Visualisiert wird die Oberfläche der Saugseite (Abb. 4.14 (a): $y > 0 \text{ mm}$). Reibung des Fluids an der Windkanalwand und Wärmeproduktion der Ventilatoren im Kanal

verursachen eine Erwärmung des Fluids, die durch interne Sensoren im Windkanal gemessen und zu $dT/dt = 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ K s}^{-1}$ quantifiziert wurde. Die daraus resultierende initiale Temperaturdifferenz zwischen Strömung und Messobjektoberfläche ermöglicht den für die thermografische Strömungsvisualisierung erforderlichen Effekt unterschiedlicher Wärmeleitung zwischen Oberfläche und Fluid in den verschiedenen Strömungsbereichen.

Die auf einen Intensitätswerte zwischen 0 und 1 normierte Strömungsvisualisierung ist in Abb. 4.13 dargestellt. Die Strömungsrichtung ist von links nach rechts. Zunächst prägt sich der laminare, dann der turbulente Strömungsbereich aus. Die Bereiche sind deutlich anhand der unterschiedlichen Intensitäten in der Aufnahme zu unterscheiden. Im Bereich $240 \text{ Pixel} \leq x \leq 290 \text{ Pixel}$ ist ein erneuter Abfall der Intensität zu erkennen, der nicht auf die Strömung, sondern auf eine veränderte Materialstruktur zurückzuführen ist. Das Profilmodell hat eine verstellbare Hinterkante, für dessen Bewegungsmöglichkeit ein Spalt zwischen Hauptteil und Hinterkante existiert. In diesem Bereich ist die Oberflächendicke deutlich geringer, weshalb der Oberflächenabschnitt eine andere thermische Eigenschaften bzgl. der Wärmeleitung aufweist, was sich wiederum in den Thermografieaufnahmen durch eine andere Oberflächentemperatur äußert. Aus diesem Grund wird der turbulente Strömungsbereich bei der Quantifizierung der eingeführten Kenngrößen nur bis $x = 240 \text{ Pixel}$ ausgewertet. Der Kontrast zwischen der laminaren und turbulenten Strömung ist aufgrund der durch die Erwärmung des Fluids entstehenden Differenz der Strömungs- und Oberflächentemperatur hoch und resultiert in ein CNR von 1,89. Anhand der Diskrepanz zwischen den Unterscheidbarkeitsparameter $D_{\text{sys}} = 2,06$ und $D_{\text{rand}} = 12,84$ wird ersichtlich, dass das CNR_{lt} durch das Auftreten von systematischen Gradienten in den Strömungsbereichen limitiert ist.

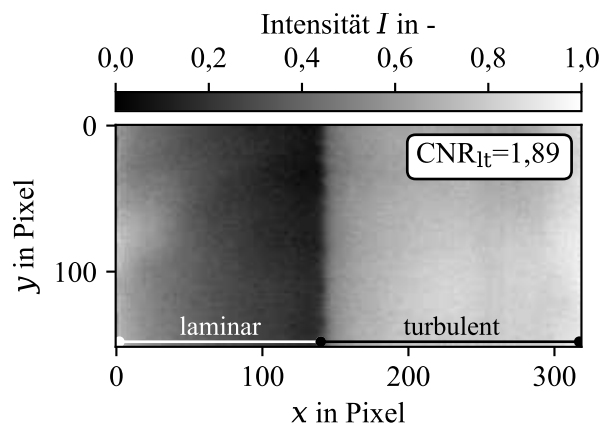


Abb. 4.13.: Thermografische Strömungsvisualisierung eines DU96W180-Tragflächenprofils bei einer Reynoldszahl von $Re = 3 \cdot 10^6$ und Anstellwinkel von $\alpha_{\text{aoa}} = 6^\circ$. Aus der stark erwärmten Strömung aufgrund von Reibungen im Windkanal resultiert ein hohes CNR zwischen laminarer und turbulenter Strömung von $\text{CNR}_{\text{lt}} = 1,89$.

Der maximale Gradient in Strömungsrichtung wird manuell an der Position $x = 140 \text{ Pixel}$ ermittelt und dient als erste Näherung für die Referenzposition der laminar-turbulenten Transition. Diese Referenzposition wird durch die Auswertung einer Oberflächendruckmessung bestätigt, die in Abb. 4.14 (b) dargestellt ist. Der Ort der Transition kann durch eine Auswertung der zweiten Ableitung des Druckkoeffizienten ermittelt werden, da mit dieser ein abrupter Anstieg des Drucks einhergeht [Pop2008]. Die laminar-turbulente Transition befindet sich folglich zwischen der relativen zur Sehne des Profils bezogenen Position $X = 0,41X_c$ und $X = 0,44X_c$. Die geringe örtliche Auflösung resultiert hierbei aus der diskreten Anordnung der Drucksensoren auf der Profloberfläche. Die relative Position ist auf die Sehnenlänge c normiert, vgl. Abb. 4.14 (b). Da die Messobjektoberfläche gekrümmt ist, kann die relative Position nicht direkt auf die x -Dimension

in der Bildebene der Strömungsvisualisierungen angewandt werden, sondern muss korrigiert werden. Bei identischem Messaufbau errechnen Dollinger et al. [Dol2018a] hierfür eine Korrektur von ca. 1% – 2% der Sehnenlänge in Richtung Vorderkante. Bei einer in der Strömungsvisualisierung abgebildete Sehnenlänge von $x_c = c = 319$ Pixel ergibt sich eine Referenzposition der laminar-turbulenten Transition von $x_{tr,ref} = 44\% \cdot c = 140,4$ Pixel.

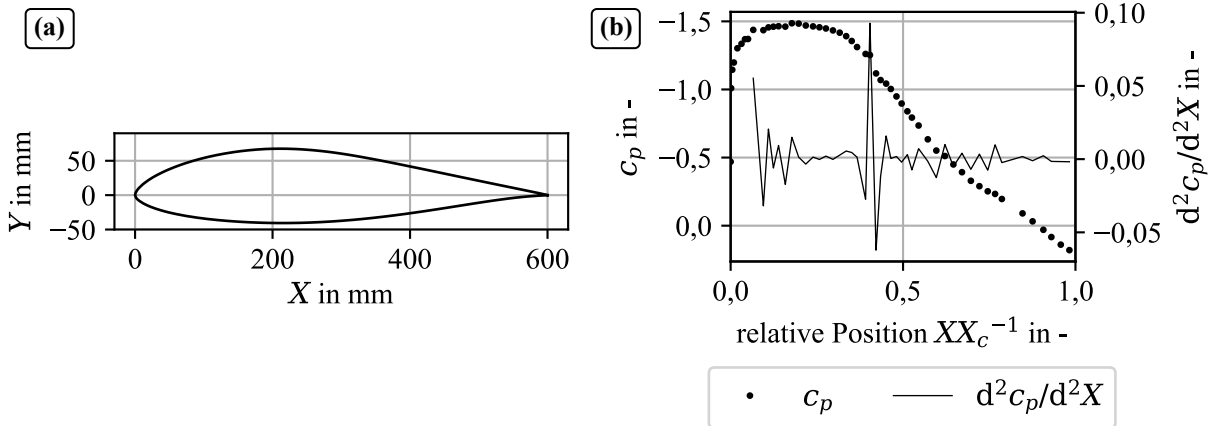


Abb. 4.14.: (a) Profilkordinaten des DU96W180-Tragflächenprofils. Sehnenlänge $X_c = 600$ mm. Verwendetes Messobjekt in den Windkanalmessungen. (b) Druckkoeffizient c_p entlang der Saugseite des DU96W180 Tragflächenprofils bei $Re = 3 \cdot 10^6$ und einem Anstellwinkel von $\alpha_{aoa} = 6^\circ$. Das Maximum der zweiten Ableitung von c_p zeigt die Lage der laminar-turbulenten Transition und liegt zwischen 0,41 und 0,44.

Strömungsvisualisierung

Es wurde eine Bildserie von $N = 1000$ Einzelaufnahmen mit einer Messfrequenz von $f = 20$ Hz ausgewertet. Die ersten fünf Ergebnisse der NNMF und PCA werden in Anhang C dargestellt. Die für den folgenden Vergleich ausgewählten Strömungsvisualisierungen werden analog zum vorangegangenen Experiment anhand des maximalen CNR_{lt} ausgewählt. Ein Vergleich der klassischen Auswertungen und den Ergebnissen der Merkmalsextraktion ist in Abb. 4.15 dargestellt. Eine Steigerung des CNR in der Einzelaufnahme, bzw. in dem MW Ergebnis kann durch die Auswertung der NNMF und PCA erreicht werden. Die Steigerung ist im Wesentlichen auf eine Steigerung von D_{syst} zurück zu führen, vgl. Tab. 4.11. Aber auch das STA Ergebnis konnte im Gegensatz zum vorherigen Experiment eine Steigerung des CNR durch einer Steigerung von D_{syst} erreichen. Alle Kenngrößen verbleiben jedoch unter den erreichten Werten durch die Merkmalsextraktionen.

	CNR	D_{syst}	D_{rand}
MW	1,94	2,09	37,03
STA	2,10	2,50	4,89
NNC 1	2,80	3,98	5,29
PC 1	2,32	2,68	5,29

Tab. 4.11.: CNR und Unterscheidbarkeitsparameter zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich in Abb. 4.15

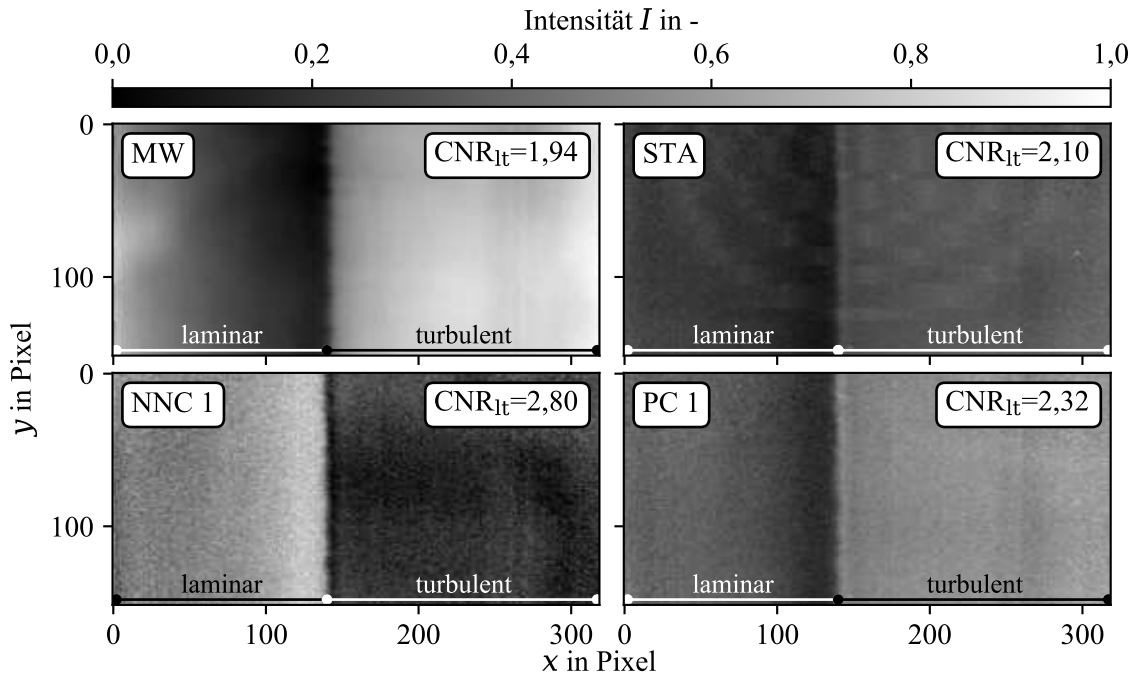


Abb. 4.15.: Vergleich der Strömungsvisualisierungen resultierend aus den klassischen Auswertemethoden der Mittelwertbildung (MW) und der zeitlichen Standardabweichung (STA), sowie den erweiterten Methoden der Merkmalsextraktion NMF (NNC) und PCA (PC). Das maximale CNR_{lt} und D_{sys} zwischen der laminaren und turbulenten Strömung kann im Ergebnis der NMF mit 2,80 bzw. 3,98 verzeichnet werden.

Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition

In Abb. 4.16 sind die Verläufe der Intensität und des Intensitätsgradienten der mittleren Bildzeile aus Abb. 4.15 mit den Ergebnissen der jeweiligen Approximationen zur Lokalisierung der Transition dargestellt. Abb. 4.17 zeigt das Ergebnis der Lokalisierung der gesamten Transitionslinie. Die resultierenden Abweichungen der Lokalisierung sind in Tab. 4.12 aufgelistet. Der Verlauf der Intensität des MW und die Abweichung von dem Approximationsmodell führen zu der erwarteten systematischen Abweichung der lokalisierten mittleren Transitionslinie von $\sigma_{x_{\text{tr}},\text{syst}} = 2,32\%c$ und stellt damit die höchste systematische Abweichung aller Lokalisierungsverfahren und Strömungsvisualisierungen dar. Die Abweichung des Intensitätsverlaufs von der Modellkurve bewirkt zudem, dass die zufällige Abweichung der Lokalisierung durch die Approximation der Intensität mit $\sigma_{x_{\text{tr}},\text{rand}} = 0,22\%c$ im MW entgegen der Erwartung aus der Theorie nach Dollinger et al. [Dol2018b] nicht geringer ausfällt, als bei der Approximation des Intensitätsgradienten mit $\sigma_{x_{\text{tr}},\text{rand}} = 0,17\%c$. Die Ergebnisse sind jedoch in der erwarteten Größenordnung für eine vergleichbare Messung mit hohem Kontrast zwischen den Strömungsbereichen. Ebenfalls konsistent mit den Ergebnissen der Simulationen in Abschnitt 4.2 ist, dass die Approximation des Intensitätsgradienten weniger anfällig für Abweichungen des Intensitätsverlaufs von der Approximation ist. Es resultiert eine geringere systematische Abweichung $\sigma_{x_{\text{tr}},\text{syst}} = 0,93\%c$.

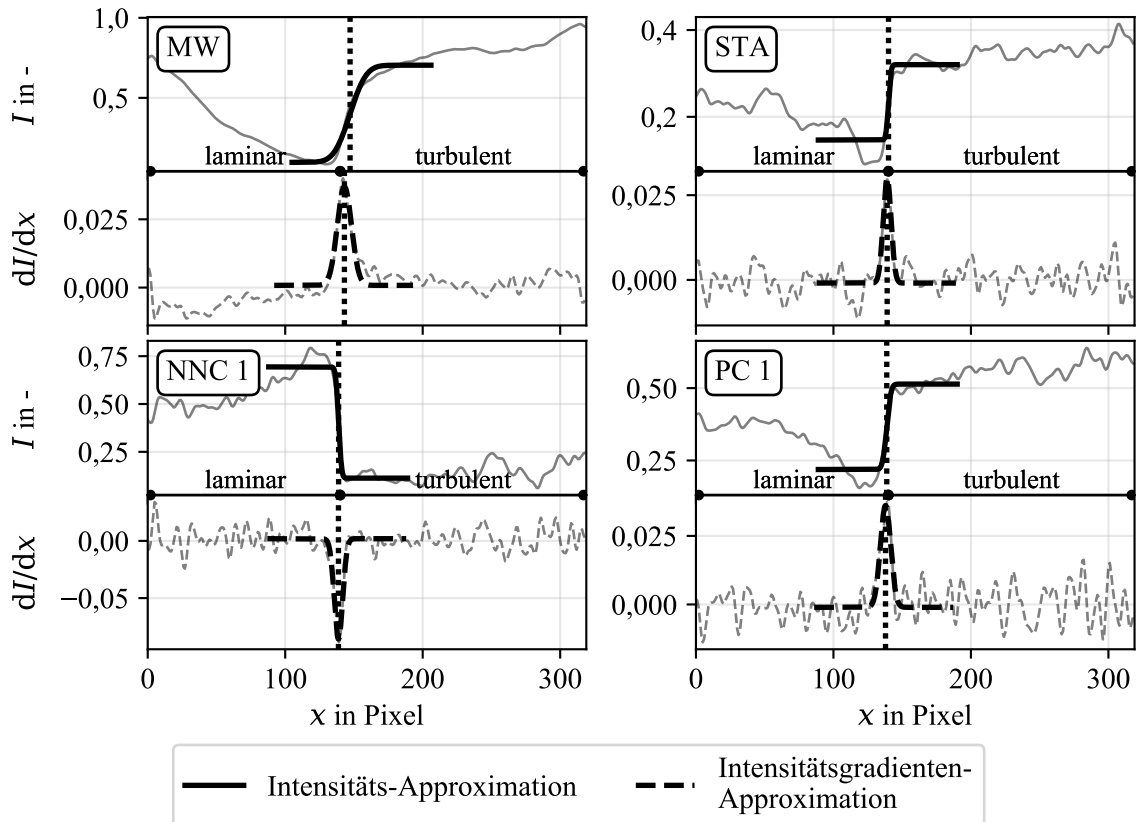


Abb. 4.16.: Verlauf der Intensität I und zugehörigen Gradienten dI/dx der mittleren Bildzeile in den Strömungsvisualisierungen in Abb. 4.15. In fett dargestellt sind die Approximationen der Verläufe als Ergebnis der eingeführten Lokalisierungsverfahren mit zweifacher Iteration, vgl. Abschnitt 2.6.1. Die Position der lokalisierten Transition ist mit einer vertikalen gepunkteten Linie eingezeichnet.

Sowohl in der STA Visualisierung, als auch in den Ergebnissen der NMF und PCA ist ein deutlicherer Anstieg bzw. Abfall der Intensität zwischen den Strömungsbereichen zu verzeichnen, vgl. Abb. 4.16. Durch die gesteigerte Unterscheidbarkeit bezüglich der systematischen Gradienten innerhalb der Strömungsbereiche konnte in allen Visualisierungen die systematische Abweichung der Lokalisierung gegenüber dem MW reduziert werden. Das absolute Minimum wird bei der Approximation der Intensität in der STA Visualisierung erreicht und beträgt $\sigma_{x_{tr},\text{sys}} = 0,16\%c$. Die zufälligen Abweichungen liegen für alle drei Bildverarbeitungen und beide Lokalisierungsverfahren ein ähnlichen Niveau mit $\sigma_{x_{tr},\text{rand}} < 0,28\%c$ auf. Die erweiterten Verfahren der Merkmalsextraktion erreichen im Vergleich zu den klassischen Bildverarbeitungsverfahren folglich keine signifikante Steigerung des CNR_{lt} oder Reduzierung der Abweichungen bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition. Eine Ausnahme hiervon stellt die systematische Abweichung bei der Approximation der Intensität dar, die gegenüber dem MW Ergebnis durch alle Bildverarbeitungsverfahren deutlich reduziert werden konnte.

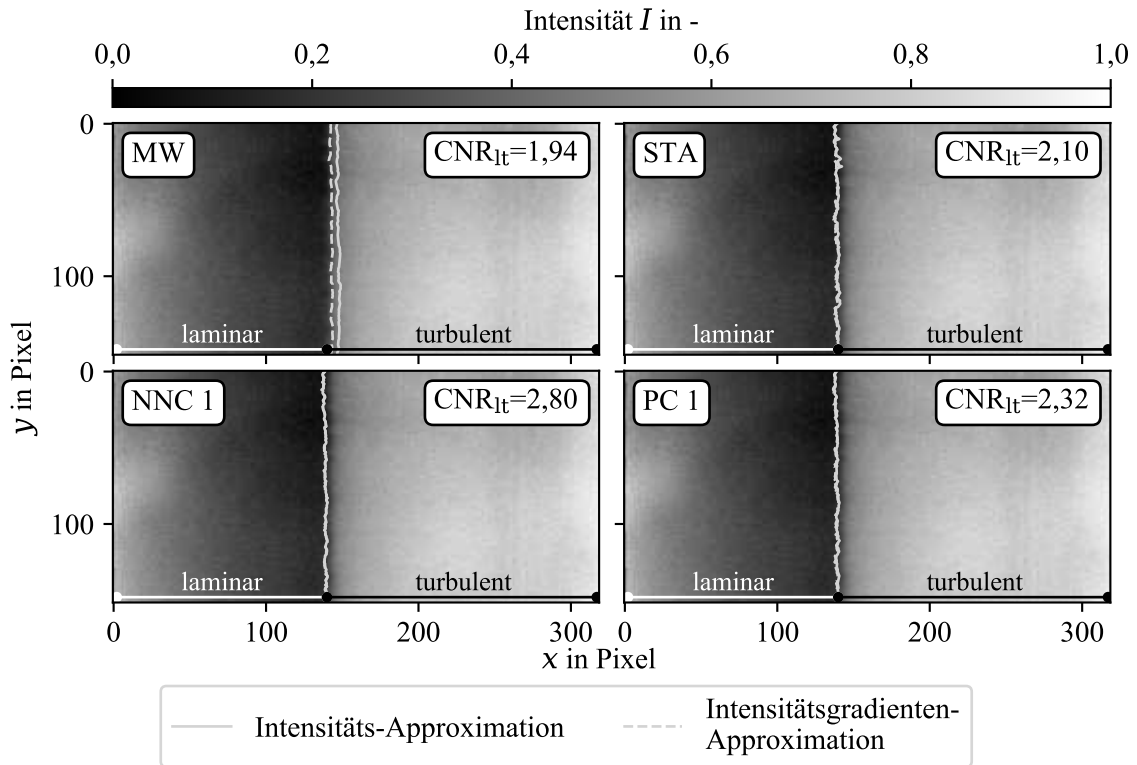


Abb. 4.17.: Lokalisierte Transitionslinie basierend auf einer Auswertung in den jeweiligen Strömungsvisualisierungen in Abb. 4.15 für beide Lokalisierungsverfahren. Mittlere lokalisierte Position, zufällige und systematische Abweichung von der Referenzposition $x_{tr,ref} = 140 \text{ Pixel} = 44\%c$ in Tab. 4.12.

Approx.	\bar{x}_{tr}/c in %				$\sigma_{x_{tr},rand}/c$ in %				$\sigma_{x_{tr},syst}/c$ in %			
	MW	STA	NNC	PC	MW	STA	NNC	PC	MW	STA	NNC	PC
Intensität	46,21	43,73	43,55	43,64	0,22	0,28	0,24	0,23	2,32	0,16	0,34	0,25
Int.-gradient	44,80	43,49	43,50	43,45	0,17	0,26	0,24	0,25	0,92	0,39	0,39	0,43

Tab. 4.12.: Mittlere lokalisierte Transitionsposition \bar{x}_{tr} , sowie zufällige und systematische Abweichung $\sigma_{x_{tr},rand}$ und $\sigma_{x_{tr},syst}$ von der Referenzposition $x_{tr,ref} = 43,89\%c$ in Abb. 4.17. Alle Werte relativ zur Profilsehnenlänge c .

Es wurde eine Serie von thermografischen Strömungsvisualisierungen eines Tragflächenprofils aus einem Windkanalexperiment ausgewertet, bei der das CNR zwischen der laminaren und turbulenten Strömung in den Rohbildern hoch ist. Das CNR in den Rohaufnahmen und dem MW wird durch systematische Gradienten in den Strömungsbereichen limitiert. Sowohl die STA als auch die Merkmalsextraktionserfahren erzeugten Strömungsvisualisierungen mit bis zu 44 % erhöhtem CNR zwischen der laminaren und turbulenten Strömung, indem die systematischen Gradienten gegenüber dem existierenden Kontrast reduziert wurden. Die geringste systematische Abweichung bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition wird durch die Approximation der STA Visualisierung mit $0,16\%c$ erreicht. Die minimal zufällige Abweichung in der rauscharmen MW Visualisierung mit $0,17\%c$. Da die systematischen Abweichung in der MW Visualisierung jedoch

relativ hoch ist, ist die zu bevorzugende Lokalisierung die Intensitäts-Approximation in der STA Visualisierung.

4.3.3. Windkanal (DU96W180) - geringer Kontrast

Um die Leistungsfähigkeit speziell der erweiterten Bildverarbeitungsmethoden hinsichtlich einer Steigerung des CNR zu untersuchen, wird das vorangegangene Experiment wiederholt. Für eine zweite Messung am gleichen Messobjekt mit identischem Anstellwinkel wird eine geringere Strömungsgeschwindigkeit von $v_\infty = 50 \text{ m s}^{-1}$ gewählt, was in einer Reynoldszahl von $Re = 2 \cdot 10^6$ resultiert. Die Erwärmung des Fluids beträgt in diesem Fall nur $dT/dt = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ K s}^{-1}$. Die resultierende thermografische Strömungsvisualisierung ist in Abb. 4.18 dargestellt. Aufgrund der sehr geringen Temperaturdifferenz zwischen Strömung und Messobjekt ist das Kontrast-zu-Rausch Verhältnis zwischen laminarer und turbulenter Strömung mit $\text{CNR}_{\text{lt}} = 0,13$ sehr gering. Eine visuelle globale Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche ist nicht möglich. Ein Nebeneffekt der geringen Reynoldszahl ist die Ausprägung einer laminaren Ablöseblase zwischen den Strömungsbereichen bei $140 \text{ Pixel} \leq x \leq 155 \text{ Pixel}$. Da die thermischen Bedingungen im verwendeten Windkanal nur über die Strömungsgeschwindigkeit beeinflusst werden können, lässt sich dieses Phänomen nicht vermeiden. Analog zu der Zylindermessung lässt sich dadurch aber der Vorteil der neu eingeführten Bildverarbeitungsmethoden für nicht-homogene Strömungsbereiche demonstrieren. Die Referenzposition der laminar-turbulenten Transition ist manuell in der Mitte der laminaren Ablöseblase definiert und ergibt sich zu $x_{\text{tr,ref}} = 147,5 \text{ Pixel}$. Dieser Wert wird wie in der vorangegangenen Messung ebenfalls durch Oberflächendruckmessungen bestätigt. Der niedrige absolute Kontrast der mittleren Intensitäten in den Strömungsbereichen bewirkt eine niedrige Unterscheidbarkeit mit $D_{\text{sys}} = 0,18$ und $D_{\text{rand}} = 0,50$. Ein deutlich niedrigeres D_{sys} im Vergleich zu D_{rand} deutet darauf hin, dass die Visualisierung relativ hohe systematische Gradienten gegenüber dem sehr geringen absoluten Kontrast aufweist und das zu erreichende CNR hierdurch begrenzt ist.

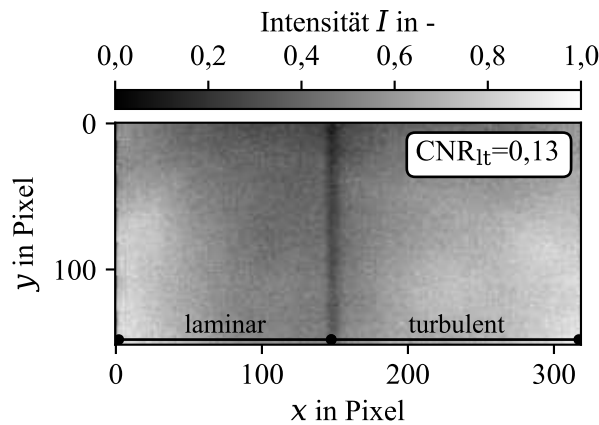


Abb. 4.18.: Thermografische Strömungsvisualisierung eines DU96W180-Tragflächenprofils bei einer Reynoldszahl von $Re = 2 \cdot 10^6$ und Anstellwinkel von $\alpha_{\text{aoa}} = 6^\circ$. Aus der kaum erwärmten Strömung im Windkanal resultiert einen sehr geringes CNR zwischen laminarer und turbulenter Strömung von $\text{CNR}_{\text{lt}} = 0,13$.

Strömungsvisualisierung

Die Ergebnissbilder der NNMF und PCA werden in Anhang C dargestellt. Die ausgewählten Visualisierungen werden in Abb. 4.19 dargestellt und wurden anhand des maximalen CNR_{lt} ausgewählt.

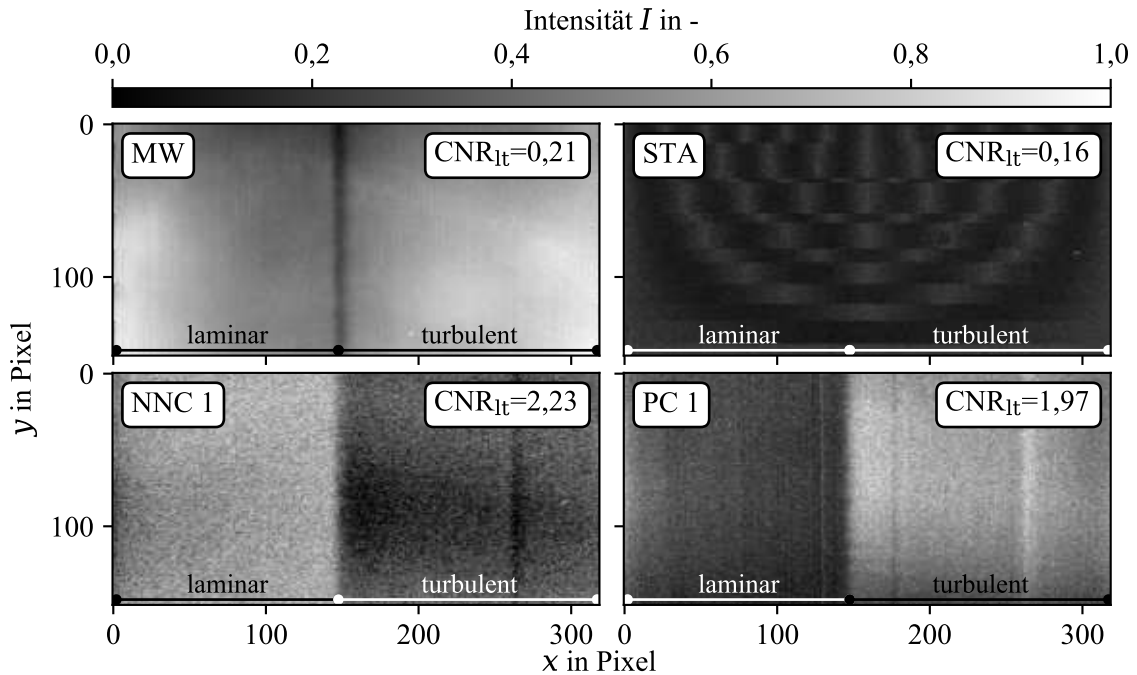


Abb. 4.19.: Vergleich der Strömungsvisualisierungen resultierend aus den klassischen Auswertemethoden der MW-Bildung und der zeitlichen Standardabweichung (STA), sowie den erweiterten Methoden der Merkmalsextraktion NNMF (NNC) und PCA (PC). Das maximale CNR_{lt} und D_{syst} zwischen der laminaren und turbulenten Strömung kann im Ergebnis der NNMF mit 2,23 bzw. 5,37 verzeichnet werden.

In der MW Visualisierung ist die erwartete Reduzierung des zufälligen Rauschen zu erkennen, aus dem eine Steigerung des CNR_{lt} von 0,13 im Rohbild auf 0,21 resultiert. D_{rand} steigt von 0,50 auf 2,37, vgl. Tab. 4.13. Die STA Visualisierung hingegen beinhaltet keinerlei Strömungsinformationen, die für eine Unterscheidung der Bereiche ausgewertet werden kann. Das Bild ist von spaltenweisen Artefakten durchsetzt, die vermutlich aus einer Kombination von Reflexion der Kameralinse und dem Ausleseverfahren des Detektorchips entstehen. Eine Betrachtung des CNR_{lt} , sowie den Unterscheidbarkeitsparametern wird deshalb bei der STA Auswertung nicht weiter verfolgt. Ein maximales CNR_{lt} wird mit 2,23 in der NNMF Visualisierung (NNC 1) erreicht. Systematische Gradienten sind in der NNC 1 deutlich reduziert, was bei bestehendem absoluten Kontrast zwischen den Strömungsbereichen in ein maximales D_{syst} von 5,37 gegenüber dem MW mit nur 0,3 und auch der PC 1 mit 4,78 resultiert. Der Parameter D_{rand} ist hingegen in PC 1 maximal und beträgt 4,55. An dieser Stelle sei noch einmal betont, dass D_{rand} kein Parameter für das absolute Rauschen darstellt, da dies bereits bei einer visuellen Inspektion in der

	CNR	D_{syst}	D_{rand}
MW	0,21	0,30	2,37
STA	0,16	0,25	0,35
NNC 1	2,23	5,37	3,49
PC 1	1,97	4,78	4,55

Tab. 4.13.: CNR und Unterscheidbarkeitsparameter zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich in Abb. 4.19

MW Visualisierung deutlich geringer ausfällt, sondern dass das vorhandene Rauschen mit der absoluten Differenz der mittleren Intensitäten der Strömungsbereiche ins Verhältnis gesetzt wird. Da der absolute Kontrast in der MW Visualisierung sehr gering ist, weißt die NNC 1 gemäß des Parameters D_{rand} eine höhere Unterscheidbarkeit auf. Auch in der PCA Visualisierung sind sowohl das CNR gegenüber der Rohaufnahme bzw. der MW Visualisierung um eine Größenordnung gesteigert.

Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition

Der Intensitätsverlauf der MW Visualisierung in Abb. 4.20 verdeutlicht die Auswirkung der mangelnden Unterscheidbarkeit aufgrund von systematischen Gradienten. Der Verlauf weist nur kurz vor der laminaren Ablöseblase ein konstantes Niveau auf. Davor und im gesamten Bereich der turbulenten Strömung steigt die Intensität stetig an. Als Konsequenz existieren keine zwei deutlich voneinander unterscheidbare Intensitätsniveaus mit scharfer Abtrennung zwischen ihnen. Die Approximation der Intensität zentriert sich daher nicht an der Stelle der Transition, sondern liegt zum größten Teil innerhalb des turbulenten Strömungsbereichs. Die Lokalisierung der Transition weist daher eine hohe Abweichung von der Referenzposition auf. Die Approximation des Gradienten zentriert sich am Ende der laminaren Ablöseblase, da hier der maximale Gradient auftritt.

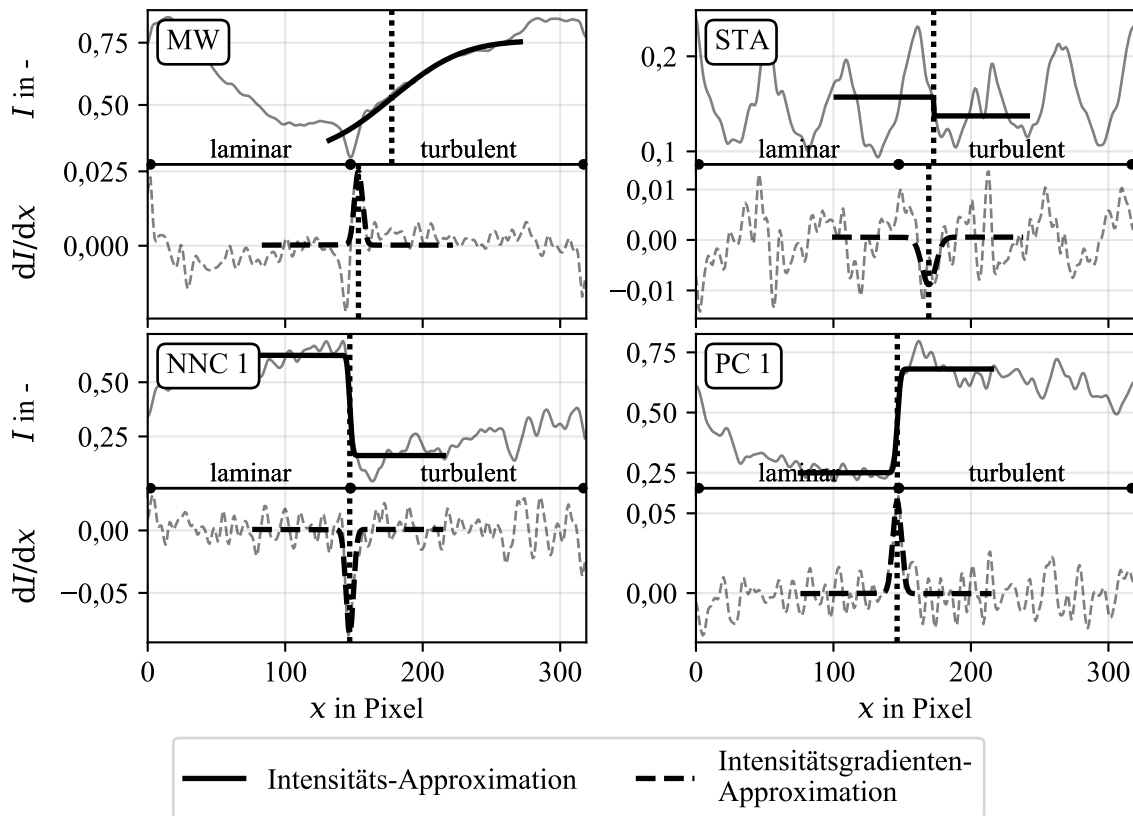


Abb. 4.20.: Verlauf der Intensität I und zugehörigen Gradienten dI/dx der mittleren Bildzeile in den Strömungsvisualisierungen in Abb. 4.19. In fett dargestellt sind die Approximationen der Verläufe als Ergebnis der eingeführten Lokalisierungsverfahren mit zweifacher Iteration, vgl. Abschnitt 2.6.1. Die Position der lokalisierten Transition ist mit einer vertikalen gepunkteten Linie eingezeichnet.

In Abb. 4.21 wurde exemplarisch der Bereich der laminaren Ablöseblase manuell abgeändert, um einen Verlauf ohne Ablöseblase zu simulieren. Die künstlichen Messwerte wurden vor der Referenzposition der laminar-turbulenten Transition durch ein konstantes Niveau entsprechend dem Verlauf vor der Ablöseblase und hinter der Referenzposition mit Hilfe einer linearen Interpolation an den existierenden Gradienten im turbulenten Strömungsbereich angeglichen. Das Ergebnis des Lokalisierungsverfahren zeigt, dass bei der Approximation der Intensität als auch des Gradienten eine noch höhere Abweichung der lokalisierten Transition auftritt, da die Verläufe nicht den Approximationsmodellen entsprechen. Des Weiteren sei an dieser Stelle erwähnt, dass der Verlauf der Intensität in der vorliegenden Messung ebenfalls starke Abweichung von dem zu erwartenden Verlauf gemäß der Reynoldsanalogie und dem Verlaufe des Reibungskoeffizienten in Abb. 2.6, vgl. Abschnitt 2.5, aufweist. Ein auf dem Verlauf des Reibungskoeffizienten basierendes Modell zur Approximation der Intensität in der thermografischen Strömungsvisualisierung würde im Fall dieser Messung ebenfalls starke Abweichungen bei der Lokalisierung zur Folge haben.

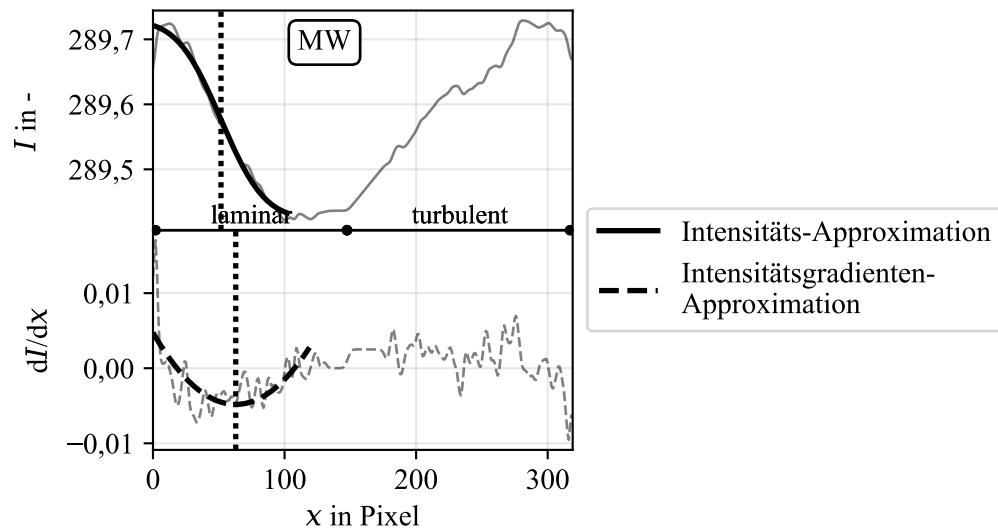


Abb. 4.21.: Manuell manipulierter Verlauf der Intensität der MW Visualisierung aus Abb. 4.20 ohne laminare Ablöseblase. Die Abweichungen bei der Lokalisierung von der Referenzposition $x_{tr,ref} = 147,5$ Pixel verbleiben auch ohne eine Ablöseblase.

In den Intensitätsverläufen der NNC 1 und PC 1 Visualisierungen sind hingegen zwei deutliche Intensitätsniveaus mit gleichmäßigen Plateaus und minimalen systematischen Gradienten innerhalb der Strömungsbereiche zu erkennen. Die Verläufe sind deutlich homogener bzgl. systematischer Gradienten, aber weisen ein höheres Rauschen als die MW Visualisierung auf. Zwischen den Intensitätsplateaus existiert ein räumlich begrenzter starker Anstieg mit einem hohem Gradienten. Die beide Approximationsmodelle der Intensität und des Intensitätsgradienten zentrieren sich erfolgreich an der Stelle der Transition und erreichen so eine Lokalisierung mit minimalen Abweichungen.

Eine visuelle Bewertung der Lokalisierungen der gesamten Transitionslinie in Abb. 4.22 verdeutlicht die zuvor erstellte Vermutung bzgl. der Abweichungen, die bei der Lokalisierung in den jeweiligen Visualisierungen in Abb. 4.19 auftreten. Die quantifizierten Größen sind in Tab. 4.14 aufgelistet. Während das Verfahren der Approximation des Gradienten im MW aufgrund der lokalen Gradienten zu Beginn und Ende der laminaren Ablöseblase eine relativ geringe systematische Abweichung von $\sigma_{x_{tr},syst} = 1,84\%$ resultiert, weist die Approximation der Intensität einen deutlich höheren Wert von $\sigma_{x_{tr},syst} = 9,15\%$ auf. Die zufällige Abweichung liegt bei der Approximation des Gradienten mit $\sigma_{x_{tr},rand} = 0,53\%$ ebenfalls deutlich unter dem Wert für die

Approximation der Intensität mit $\sigma_{x_{tr},rand} = 1,79\%$.

Die Auswertungen der NNC1 und PC1 Visualisierungen erreichen hingegen eine erfolgreiche Lokalisierung der Transitionslinie mit einer durchgängig geradlinigen Form im Bereich der Referenzposition und minimalen Abweichungen. Analog zum maximalen D_{syst} ist eine minimale systematische Abweichung der Lokalisierung in der NNC1 zu finden und beträgt $\sigma_{x_{tr},syst} = 0,08\%$ und $\sigma_{x_{tr},syst} = 0,1\%$ für die Approximation der Intensität und des Intensitätsgradienten. Die minimale zufällige Abweichung ist aufgrund des geringsten D_{rand} in der PC1 Visualisierung mit $\sigma_{x_{tr},rand} = 0,24\%$ bzw. $\sigma_{x_{tr},rand} = 0,26\%$ zu verzeichnen. Die NNMF und PCA erzeugen also nicht nur eine Strömungsvisualisierung mit hohem Kontrast und global deutlich zu unterscheidenden Strömungsbereichen, sondern ermöglicht zudem eine Lokalisierung der laminar-turbulente Transition mit minimaler zufälliger und systematischer Abweichung.

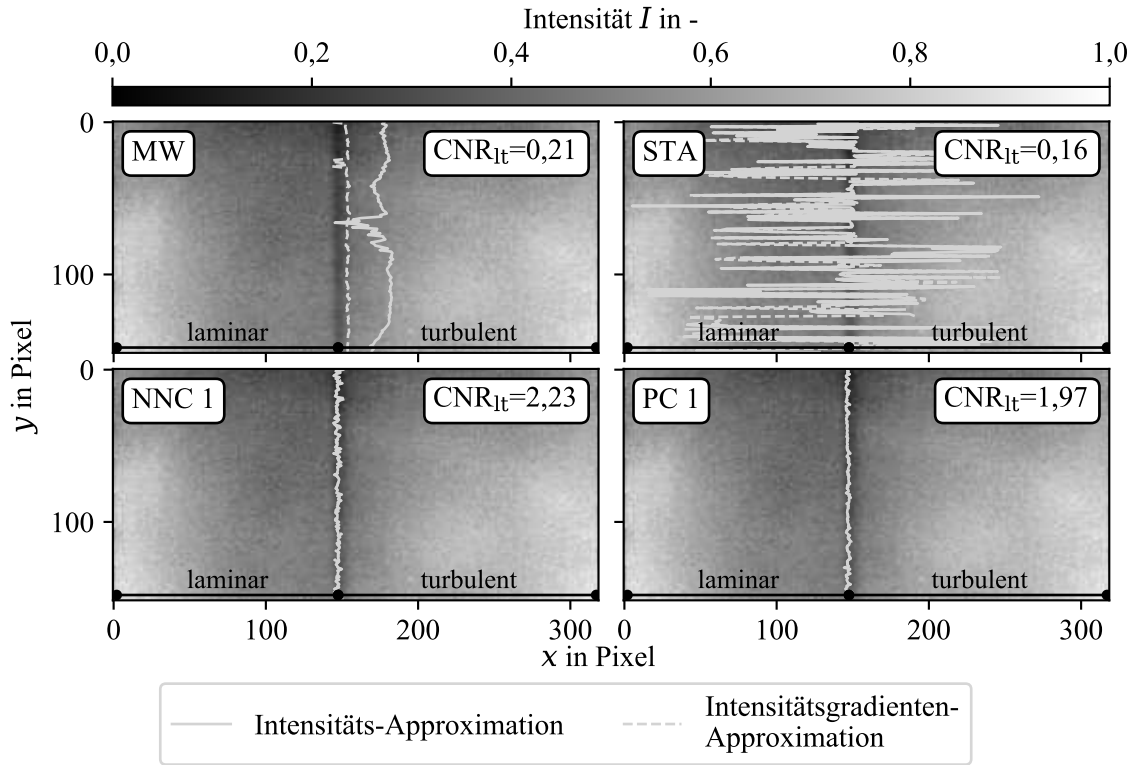


Abb. 4.22.: Lokalisierte Transitionslinie basierend auf einer Auswertung in den jeweiligen Strömungsvisualisierungen in Abb. 4.19 für beide Lokalisierungsverfahren. Mittlere lokalisierte Position, zufällige und systematische Abweichung von der Referenzposition $x_{tr,ref} = 147,5 \text{ Pixel} = 46,23\%c$ in Tab. 4.14.

Approx.	\bar{x}_{tr}/c in %				$\sigma_{x_{tr},rand}/c$ in %				$\sigma_{x_{tr},syst}/c$ in %			
	MW	STA	NNC	PC	MW	STA	NNC	PC	MW	STA	NNC	PC
Intensität	55,39	44,91	46,15	45,99	1,79	18,87	0,32	0,24	9,15	1,33	0,08	0,25
Int.-gradient	48,08	43,03	46,13	46,07	0,53	18,46	0,40	0,26	1,84	3,21	0,10	0,17

Tab. 4.14.: Mittlere lokalisierte Transitionsposition \bar{x}_{tr} , sowie zufällige und systematische Abweichung $\sigma_{x_{tr},rand}$ und $\sigma_{x_{tr},syst}$ von der Referenzposition $x_{tr,ref} = 46,24\%c$ in Abb. 4.22. Alle Werte relativ zur Profilsenhnenlänge c .

Es wurden thermografische Strömungsvisualisierungen eines Tragflächenprofils in einem Windkanalexperiment ausgewertet, in denen das CNR zwischen der laminaren und turbulenten Strömung sehr gering ausfällt und durch das Auftreten von systematischen Gradienten limitiert wird. Während die Auswertung der STA keine nutzbare Strömungsvisualisierung ermöglichte, ergab die Auswertung mit den Merkmalsextraktionen erneut Strömungsvisualisierungen mit erhöhtem CNR. Das CNR konnte hierbei durch die Anwendung der NNMF um einen Faktor 10 gesteigert werden, was im wesentlichen auf die Verringerung von systematischen Gradienten zurück zu führen ist und durch ein maximales D_{sys} bestätigt wird. Daraus resultiert eine Lokalisierung der Transition mit minimaler systematischer Abweichung, die gegenüber der MW Visualisierung um bis zu zwei Größenordnungen bei der Approximation der Intensität und eine Größenordnung bei der Approximation des Intensitätsgradienten reduziert wurde. Die zufällige Abweichung ist in der NNMF Visualisierung um ca. 0,1% größer für beide Lokalisierungsverfahren, als in der PCA Visualisierung. Beide Bildverarbeitungsverfahren der Merkmalsextraktion bewirkten folglich eine deutliche Steigerung des CNR und ermöglichten eine Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition mit minimalen Abweichungen gegenüber einer Auswertung der Rohaufnahmen oder der MW Visualisierung.

4.3.4. Freifeld - 1

Um das Potenzial der eingeführten Bildverarbeitung und Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition in der Freifeldanwendung zu untersuchen, wird ein Feldversuch gemäß dem experimentellen Aufbau in Abschnitt 2.4.2 durchgeführt und ausgewertet. Im Gegensatz zum Windkanalexperiment wird die langwellige Infrarotkamera verwendet, die bereits in Abschnitt 2.3.2 eingeführt wurde, um bereits vor der Anwendung der Bildverarbeitung ein möglichst hohes CNR in den Rohbildern zu erhalten, vgl. Abschnitt 3.1.2.

In Abb. 4.23 (a) und (b) sind zwei thermografische Strömungsvisualisierungen des selben Rotorblatts dargestellt, die aus zwei kurz nacheinander aufgenommenen Messungen ($\Delta T < 10 \text{ min}$) resultieren. Zwischen den Zeitpunkten der beiden Aufnahmen änderten sich die Wetterbedingungen, indem aufkommende Wolken das Sonnenlicht blockierten, was die Heizleistung der Sonnenstrahlung verringerte. Darüber hinaus vollzog die WEA eine Gierbewegung, um der wechselnden Windrichtung zu folgen, weshalb sich die betrachtete Rotorblattoberfläche von der Sonne weg drehte, was zu einer weiteren Verringerung der Oberflächenerwärmung führte. Bereits die Visualisierung in Abb. 4.23 (a) weißt einen sehr geringen Kontrast zwischen der laminaren und turbulenten Strömung auf. In Abb. 4.23 (b) sind keine Strömungsbereiche mehr zu unterscheiden.

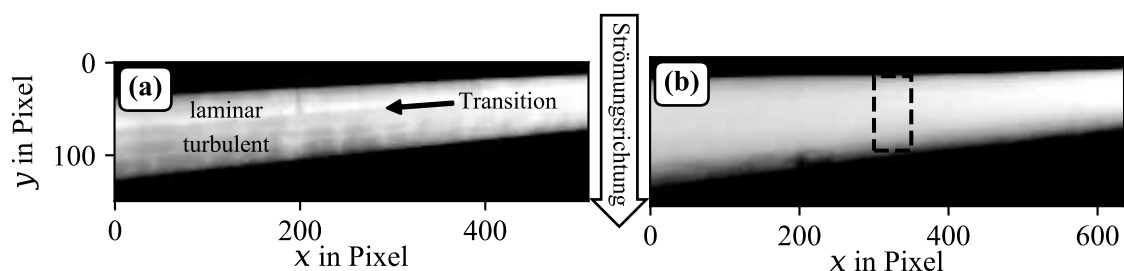


Abb. 4.23.: Thermografische Strömungsvisualisierungen der selben Rotorblattoberfläche einer Freifeldmessung mit unterschiedlichen Wetterbedingungen. (a) Direkte, ungehinderte Sonneneinstrahlung bewirkt einen sichtbaren Kontrast zwischen den Strömungsbereichen. (b) Durch reduzierte Sonneneinstrahlung und einer sonnenabgewandten Oberfläche resultiert einen sehr geringen Kontrast.

Eine Unterscheidbarkeit zwischen den Strömungsbereichen ist in Abb. 4.23 (b) durch eine visuelle Betrachtung der Aufnahme kaum möglich. Auch wenn sich die Windgeschwindigkeit zwischen den Aufnahmen der beiden Bilder geändert haben könnte, ist zu erwarten, dass sich der Ort des Übergangs von laminarer zu turbulenter Strömung in beiden Aufnahmen ungefähr an der gleichen Stelle zwischen Vorderkante (obere Kante) und Hinterkante (untere Kante) befindet. Daher wird die Position der laminar-turbulenten Transition aus einer visuellen Auswertung in Abb. 4.23 (a) bei $\frac{1}{3}$ der Strecke zwischen Vorder- und Hinterkante angenommen. Der markierte Bildausschnitt in Abb. 4.23 (b) wird im Folgenden ausgewertet und in Abb. 4.24 vergrößert dargestellt. Die Aufnahme wurde hierfür rotiert, sodass die Strömungsrichtung analog zu den Windkanalmessungen von links nach rechts verläuft. Mit $x_c = c = 123$ Pixel resultiert die Referenzposition für die laminar-turbulente Transition in Abb. 4.24 bei $x_{tr,ref} = 33,33\% \cdot c = 40,9$ Pixel. Das Kontrast-zu-Rausch Verhältnis zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich in der Einzelaufnahme errechnet sich zu $CNR_{lt} = 2,23$. Als Vergleich beträgt das CNR in Abb. 4.23 (a) $CNR_{lt} = 4,03$. Bei der Berechnung des CNR wurde darauf geachtet, dass der Bereich, in dem die Transition zu erwarten ist, nicht in die Quantifizierung mit einfließt. Erneut wird das CNR durch das Auftreten von systematischen Gradienten limitiert, da sich für die Unterscheidbarkeitsparameter Werte von $D_{syst} = 2,61$ und $D_{rand} = 11,35$ ergeben. Durch die Verwendung der langwelligigen Infrarotkamera ist das Rauschen in der Aufnahme gering, während systematische Gradienten unbeeinflusst von der Gerätetechnik bleiben.

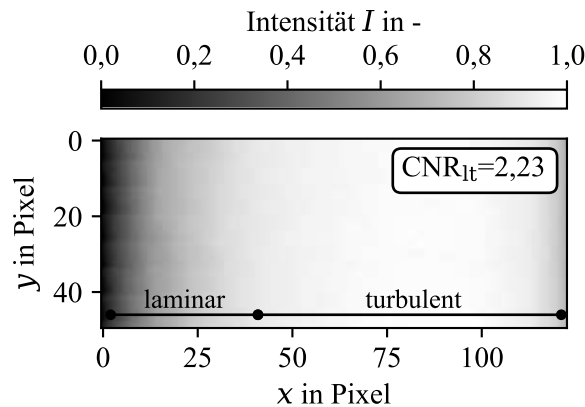


Abb. 4.24.: Thermografische Strömungsvisualisierung der laminaren und turbulenten Strömung auf einem Rotorblatt an einer WEA in Betrieb. Rotierter Ausschnitt des markierten Bereichs in Abb. 4.23 (b). Strömungsrichtung von links nach rechts. Das CNR_{lt} zwischen den Strömungsbereichen beträgt 2,23.

Strömungsvisualisierung

Die vollständigen Ergebnisse der NNMF und PCA Auswertung werden wieder in Anhang C dargestellt. Die für den folgenden Vergleich ausgewählte Strömungsvisualisierung wird anhand des maximalen CNR_{lt} ausgewählt. Da die Unterscheidbarkeit D_{rand} in der Einzelaufnahme einen relativ hohen Wert mit 11,35 hat, bewirkt die MW-Bildung kaum eine Steigerung, vgl. Abb. 4.25. Aus diesem Grund ist auch das CNR in der MW Visualisierung kaum erhöht mit $CNR_{lt} = 2,26$. Die Auswertung von zeitlichen Fluktuationen durch die Berechnung der STA bewirkt hingegen eine Steigerung auf ein CNR_{lt} von 2,88. In der STA Visualisierung sind sowohl systematische Gradienten als auch zufälliges Rauschen gegenüber dem vorhandenen absoluten Kontrast der Strömungsbereiche reduziert, was anhand der höheren Unterscheidbarkeitsparameter in Tab. 4.15 zu erkennen ist. Ein noch höherer Anstieg von sowohl D_{rand} als auch D_{syst} ist in den Ergebnissen der NNMF und PCA zu verzeichnen, demnach eine maximale Unterscheidbarkeit bezüglich vor-

handenem zufälligem Rauschen und systematischen Gradienten existiert. Die Werte sind hierbei für beide Visualisierungen auf einem ähnlichen Niveau. Die erweiterten Verfahren der Merkmalsextraktion ermöglicht folglich gegenüber den klassischen Methoden einen deutlichen Anstieg des CNR und der Unterscheidbarkeit zwischen den Strömungsbereichen, auch wenn die STA Auswertung ein minimal höheres D_{rand} aufweist. Das CNR ist zwischen der MW Visualisierung und der PCA Visualisierung um einen Faktor von 2,4 gesteigert.

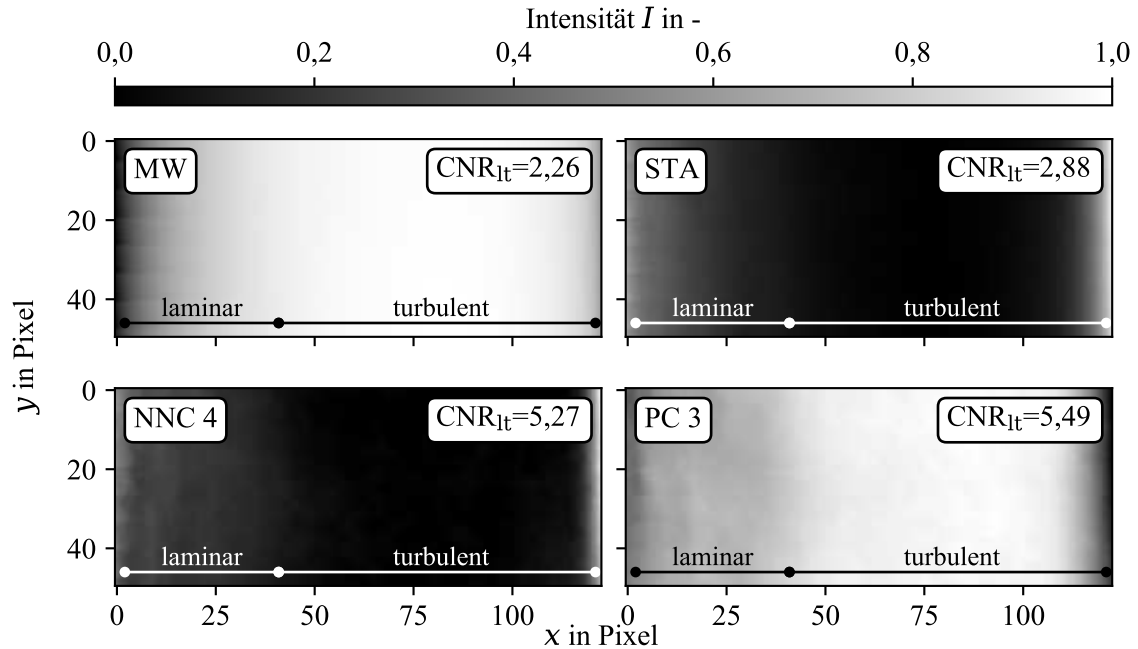


Abb. 4.25.: Vergleich der Strömungsvisualisierungen resultierend aus den klassischen Auswertemethoden der MW-Bildung und der zeitlichen Standardabweichung (STA), sowie den erweiterten Methoden der Merkmalsextraktion NNMF (NNC) und PCA (PC). Das maximale CNR_{lt} und D_{sys} zwischen der laminaren und turbulenten Strömung kann im Ergebnis der PCA mit 5,49 und 7,95 verzeichnet werden. D_{rand} in PC 3 erreicht mit 17,99 ca. den gleichen Wert wie das STA Ergebnis.

Tab. 4.15.: CNR_{lt} und Unterscheidbarkeitsparameter zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich in Abb. 4.25.

	CNR_{lt}	D_{sys}	D_{rand}
MW	2,26	2,64	11,42
STA	2,88	3,31	18,72
NNC 4	5,27	7,56	16,20
PC 3	5,49	7,95	17,99

Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition

Die Verläufe der Intensität der MW und der STA Visualisierung in Abb. 4.26 verdeutlicht schnell, dass eine Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition mit den eingeführten Methoden nicht

möglich ist, da keine strömungscharakteristische Bereiche zu unterscheiden sind. Die Lokalisierung schlägt vollständig fehl und die Position der Transition kann nicht ermittelt werden oder weist eine hohe Abweichung von der Referenzposition auf. In der NNC 4 und PC 3 Visualisierung hingegen sind zwei voneinander unterscheidbare Intensitätsniveaus vorhanden, anhand derer die Lokalisierungsverfahren die Transition mit deutlich geringerer Abweichung lokalisieren kann. In NNC 4 ist der Verlauf zwischen den Bereichen jedoch langgezogener und damit anfälliger für eine höhere zufällige Abweichung.

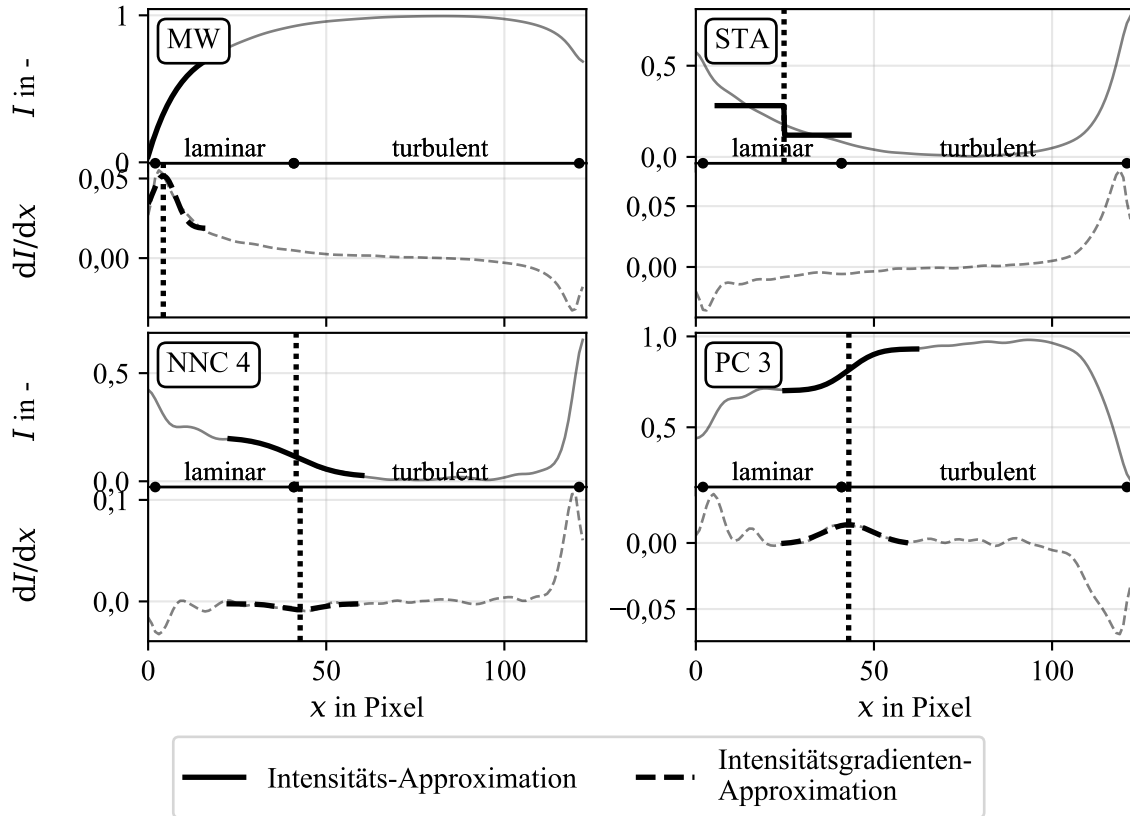


Abb. 4.26.: Verlauf der Intensität I und zugehörigen Gradienten dI/dx der mittleren Bildzeile in den Strömungsvisualisierungen in Abb. 4.25. In fett dargestellt sind die Approximationen der Verläufe als Ergebnis der eingeführten Lokalisierungsverfahren mit zweifacher Iteration, vgl. Abschnitt 2.6.1. Die Position der lokalisierten Transition ist mit einer vertikalen gepunkteten Linie eingezeichnet. In dem MW und STA Ergebnis sind keine Strömungsbereiche zu unterscheiden, weshalb die Lokalisierungsverfahren fehlschlagen und keine Transition im Bereich der Referenzposition $x_{tr,ref} = 40,9$ Pixel erkannt werden kann.

Analog zur Auswertung der Einzelverläufe der Intensitäten folgt für die Auswertung der gesamten Transitionslinie, dass die Lokalisierung in der MW und STA Visualisierung ohne Erfolg ist, da keine zu unterscheidende Strömungsbereiche zu erkennen sind. Bei der Auswertung der NNC 4 und PC 3 Visualisierung hingegen identifizieren beide Lokalisierungsverfahren die laminar-turbulente Transition im Bereich der erwarteten Position. Auffällig bei einem Vergleich mit den Windkanalmessungen ist, dass die Transitionlinie keine geradlinige Form aufweist. Gründe hierfür können Unterschiede in der Oberflächenbeschaffenheit in den radialen Abschnitten des Rotorblattes sein. Aus diesem Grund wird die Quantifizierung der zufällige Abweichung für die Freifeldmessungen angepasst. Anstatt die Schwankungen lokalisierten Transitionspositionen um den Mittelwert

zu bewerten, wird die lokalisierte Transitionslinie mit einer kubischen Regression approximiert. Die zufällige Abweichung der Lokalisierung wird anschließend aus der Standardabweichung der Residuen der Approximation gebildet. Die systematische Abweichung der Lokalisierung wird anhand der mittleren quadratischen Abweichung zwischen den einzelnen Positionen und der Referenzposition der laminar-turbulenten Transition bestimmt. Die resultierenden Werte sind der Tab. 4.16 zu entnehmen, aber aus gegebenen Gründen mit vorsichtig zu interpretieren. Speziell für einen Vergleich mit den vorangegangenen Experimenten. Es lässt sich zusammenfassen, dass die NNMF und PCA eine Strömungsvisualisierung erzeugen können, bei der die Strömungsbereiche klar voneinander zu trennen sind, während eine Unterscheidbarkeit in den Rohaufnahmen oder nach Anwendung der klassischen Verfahren nicht möglich ist. Hieraus ergibt sich die Möglichkeit einer Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition, um die räumliche Verteilung der Strömungsbereiche in Thermografieaufnahmen mit niedrigem Kontrast zu berechnen. Im vorliegenden Experiment ist die zufällige und systematische Abweichung der Lokalisierung in der PCA Visualisierung geringer, als bei dem NNMF Ergebnis.

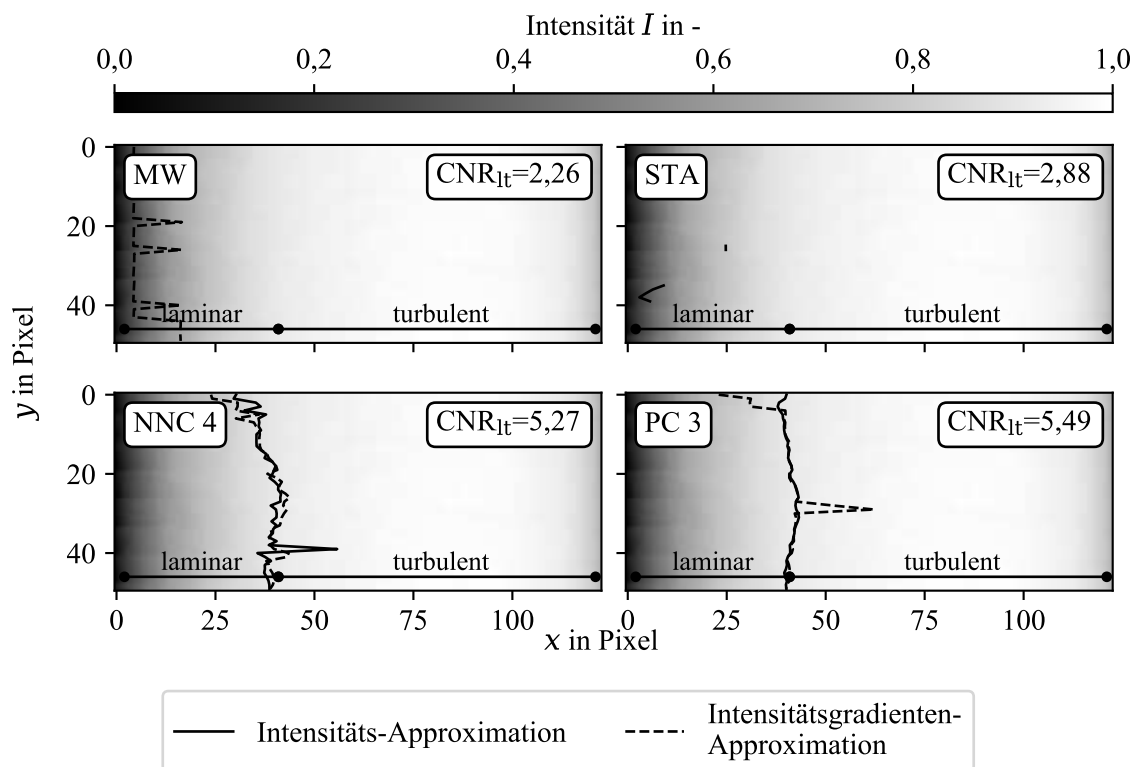


Abb. 4.27.: Lokalisierte Transitionslinie basierend auf einer Auswertung in den jeweiligen Strömungsvisualisierungen in Abb. 4.25 für beide Lokalisierungsverfahren. Mittlere lokalisierte Position, zufällige und systematische Abweichung von der Referenzposition $x_{tr,ref} = 40,9 \text{ Pixel} = 33,33\%c$ ist der Tabelle Tab. 4.16 zu entnehmen. Bildzeilen ohne eingezeichnete Transition bedeuten, dass eine Lokalisierung hier mit den eingeführten Lokalisierungsverfahren nicht erfolgreich war.

Tab. 4.16.: Mittlere lokalisierte Transitionsposition \bar{x}_{tr} , sowie zufällige und systematische Abweichung $\sigma_{x_{tr},rand}$ und $\sigma_{x_{tr},syst}$ in Abb. 4.27. Alle Werte relativ zur Profilhöhenlänge c .

Approx.	\bar{x}_{tr}/c in %				$\sigma_{x_{tr},rand}/c$ in %				$\sigma_{x_{tr},syst}/c$ in %			
	MW	STA	NNC	PC	MW	STA	NNC	PC	MW	STA	NNC	PC
Intensität	/	/	31,10	33,21	/	/	2,17	0,56	/	/	2,16	0,78
Int.-gradient	3,44	/	31,06	32,99	0,13	/	0,85	0,35	29,82	/	2,19	1,09

Mit dem in Abschnitt 3.2 eingeführten Rotorposition-Trigger wurde eine Bildserie von thermografischen Strömungsvisualisierungen einer Rotorblattoberfläche einer sich in Betrieb befindlichen WEA aufgenommen. Aufgrund mangelnder Heizleistung zum Zeitpunkt der Messung, ist das CNR zwischen der laminaren und turbulenten Strömung sehr niedrig, weshalb eine Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche in den Rohaufnahmen nicht möglich ist. Das CNR wird erneut, wie in den Windkanalexperimenten, durch systematische Gradienten in den Strömungsbereichen limitiert. Zwischen den Bereichen existiert keine lokale Abtrennung, weshalb eine Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition mit den eingeführten Lokalisierungsverfahren nicht möglich ist. Die klassischen Bildverarbeitungsmethoden konnten keine signifikante Steigerung des CNR bewirken weshalb eine Lokalisierung auch in ihren Ergebnisvisualisierungen fehl schlägt und die Transitionslinie undetektiert bleibt. Die Verfahren der Merkmalsextraktion hingegen erzeugten Strömungsvisualisierungen in denen das CNR auf ca. 5,5 verdoppelt und das D_{syst} sogar verdreifacht ist und eine klare Abtrennung zwischen den Strömungsbereichen existiert, weshalb eine Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition möglich ist. Da keine geradliniger Verlauf der Transitionslinie vorausgesetzt werden kann, sind die quantifizierten Abweichungen mit Vorbehalt zu interpretieren. In einem direkten Vergleich erreicht die PCA Visualisierung eine geringere zufällige und systematische Abweichung. Die erweiterten Bildverarbeitungsmethoden ermöglichen also aus Messdaten, in denen keine Unterscheidbarkeit der Strömungszustände möglich ist und die Visualisierung der Strömung fehl schlägt, dass das CNR durch Reduzierung von systematischen Gradienten erhöht wird. Folglich wird eine Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition durch die erweiterten Bildverarbeitungsmethoden möglich gemacht.

4.3.5. Freifeld - 2

In einer weiteren Freifeldanwendung soll das Potential der erweiterten Bildverarbeitungsmethoden zur Reduzierung der Abweichungen bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition verdeutlicht werden, wenn eine grundsätzliche Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche auch in den thermografischen Rohaufnahmen möglich ist. Auf Grund einer höheren Sonneneinstrahlung beträgt das CNR zwischen der laminaren und turbulenten Strömung 2,57. Während die Unterscheidbarkeit basierend auf dem Rauschen mit $D_{rand} = 311,26$ auf einem ähnlichen Niveau wie in der vorherigen Auswertung ist, existiert eine höhere Unterscheidbarkeit $D_{syst} = 3,16$ Die vollständige Auswertung analog zu den vorangegangenen Experimenten ist in Anhang C zu finden. Im folgenden wird lediglich auf das Ergebnis der Lokalisierung eingegangen.

In der Darstellung gesamten lokalisierten Transitionslinie in Abb. 4.28 ist zu erkennen, dass die Lokalisierung in der MW Visualisierung eine hohe zufällige Abweichungen aufweist, während diese in der NNMF und PCA Visualisierung deutlich reduziert ist, vgl. Tab. 4.17. Erneut gilt fest zu halten, dass die nichtlineare Form der Transitionslinie aufgrund von Unregelmäßigkeiten

in der Strömung und auf Oberflächenabschnitten zurückzuführen ist. Eine Berechnung der systematischen Abweichung anhand einer fixen Referenzposition führt daher zu hohen Werten für die systematische Abweichung in PC 2. Es wird jedoch deutlich, dass die Verwendung der erweiterten Verfahren der Merkmalsextraktion nicht nur eine Steigerung des CNR, sondern auch eine Reduzierung der zufälligen und systematischen Abweichungen bei der Lokalisierung der laminar-turbulente Transition bewirken.

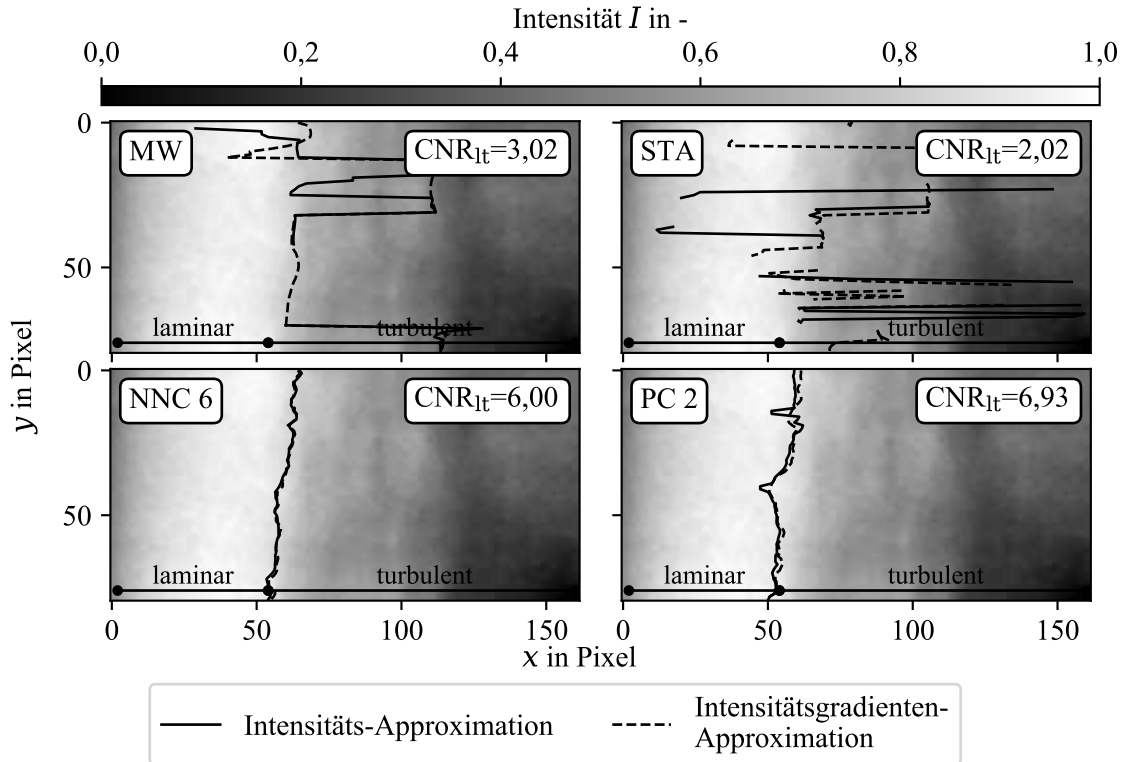


Abb. 4.28.: Lokalisierte Transitionslinie basierend auf einer Auswertung in den jeweiligen Strömungsvisualisierungen in Abb. C.10 für beide Lokalisierungsverfahren. Mittlere lokalisierte Position, zufällige und systematische Abweichung von der Referenzposition $x_{tr} = 54 \text{ Pixel} = 33,33\%c$ in Tab. 4.17. Bildzeilen ohne eingezeichnete Transition bedeuten, dass eine Lokalisierung hier mit den eingeführten Lokalisierungsverfahren nicht erfolgreich war.

Tab. 4.17.: Mittlere lokalisierte Transitionsposition \bar{x}_{tr} , sowie zufällige und systematische Abweichung $\sigma_{x_{tr},rand}$ und $\sigma_{x_{tr},syst}$ von der Referenzposition $x_{tr,ref} = 33,33\%c$ in Abb. 4.28. Alle Werte relativ zur Profilsenhnenlänge c .

Approx.	\bar{x}_{tr}/c in %				$\sigma_{x_{tr},rand}/c$ in %				$\sigma_{x_{tr},syst}/c$ in %			
	MW	STA	NNC	PC	MW	STA	NNC	PC	MW	STA	NNC	PC
Intensität	51,34	48,63	36,51	33,92	13,85	25,94	0,56	1,38	20,22	16,04	3,18	1,42
Int.-gradient	49,08	48,81	36,70	34,47	14,78	16,60	0,60	1,06	15,74	15,61	3,36	1,57

Es wurde eine weitere Freifeldmessung an einer sich in Betrieb befindlichen WEA ausgewertet. Im Gegensatz zur ersten Freifeldmessung existierte bereits in den Rohaufnahmen eine Unterscheidbarkeit zwischen der laminaren und turbulenten Strömung. Aufgrund eines lokalen Gradienten zwischen den Strömungsbereichen war zudem eine Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition in den Rohaufnahmen und auch in den Visualisierungen der klassischen Bildverarbeitungsmethoden möglich. Jedoch konnten auch hier wieder die erweiterten Verfahren der Merkmalsextraktion gewinnbringend angewandt werden, indem durch sie neue Strömungsvisualisierungen erzeugt wurden, in denen das CNR verdoppelt und die Abweichungen bei der Lokalisierung um eine Größenordnung reduziert werden konnten. Dies verdeutlicht, dass die Anwendung der Merkmalsextraktionen zur Erzeugung von Strömungsvisualisierungen auch dann gewinnbringend sein kann, wenn bereits eine Unterscheidbarkeit zwischen den Strömungsbereichen in den Rohdaten existiert.

4.4. Einfluss der Anzahl Einzelaufnahmen und Messfrequenz

Im Folgenden wird der Einfluss der Anzahl N an Einzelaufnahmen und die Aufnahmefrequenz f der ausgewerteten Bildserie auf die Unterscheidbarkeit der laminaren und turbulenten Strömung, sowie der Messabweichung bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition untersucht. Hierzu wird die zuvor vorgestellte Windkanalmessung „Windkanal (DU96W180) - geringer Kontrast“, vgl. Abschnitt 4.3.3 verwendet. Durch die stationäre Position des Messobjekts und der Infrarotkamera kann die statische Strömung in der Grenzschicht des Profils mit beliebig hoher Aufnahmefrequenz und Messdauer durchgeführt werden. Für die Auswertung werden diese hochfrequenten Messdaten gezielt aussortiert, um die gewünschte Anzahl an Einzelaufnahmen bzw. Frequenz zwischen den Einzelaufnahmen zu erhalten. Die so erhaltene Bildserie wird schlussendlich entsprechend der Untersuchungen des vorangegangenen Abschnittes ausgewertet und die Kennzahlen des CNR, D_{sys} und D_{rand} quantifiziert. Aufgrund der unterschiedlichen, nicht-deterministischen Lösungen der NNMF, vgl. Abschnitt 4.1.2, wird die Auswertung der Bildserie mit der NNMF 10 mal ausgewertet und diejenige Lösung mit dem maximalen CNR zwischen der laminaren und turbulenten Strömung verwendet.

4.4.1. Anzahl Einzelaufnahmen

Für die Auswertung des Einflusses der Anzahl an verwendeten Einzelaufnahmen N in der Bildserie wird N von 10 bis 10.000 variiert, während eine Frequenz von $f = 20\text{ Hz}$ festgelegt wird. Damit entspricht die Frequenz dem Wert in der Auswertung des vorherigen Abschnitts. In Abb. 4.29 sind das CNR_{lt} und die beiden Kennwerte der Unterscheidbarkeit D_{sys} und D_{rand} über N dargestellt. Zunächst fällt auf, dass die Ergebnisse der NNMF trotz der 10-fachen Wiederholung und Auswahl anhand des maximalen CNR_{lt} gegenüber der klassischen Verfahren und der PCA stark schwanken. Wie zu erwarten, liegen die Werte für die Verfahren der Merkmalsextraktion deutlich über denen der klassischen Verfahren, da bereits zuvor dargestellt wurde, dass die Verfahren eine Steigerung des CNR bewirken können. Sowohl die PCA, als auch die NNMF weisen ein nahezu konstantes Niveau der Kennzahlen auf, sobald eine Mindestanzahl an Einzelaufnahmen vorhanden ist. Grund hierfür ist, dass die Verfahren die Varianz zwischen den Bildern auswerten und für eine ausreichende Detektion von Merkmalen, in denen sich die Bilder unterscheiden, eine gewissen Grundmenge vorhanden sein muss. Ab einer bestimmten Anzahl an Bildern, bieten keine neuen Informationen dem Algorithmus die Möglichkeit weitere Merkmale zu extrahieren. Dieser Grenzwert liegt bei ca. 2000 aufnahmen und wird für verschiedene Experimente variieren. Es existiert folglich für eine gegebene Messung ein unterer Grenzwert für die Anzahl an zu verwendenden Einzelaufnahmen für die Maximierung der Unterscheidbarkeit. Die Grenze bei dem 75 % der maximalen Unterscheidbarkeit erreicht wird liegt bereits bei $1/10$ der erforderlichen 2000

Einzelaufnahmen.

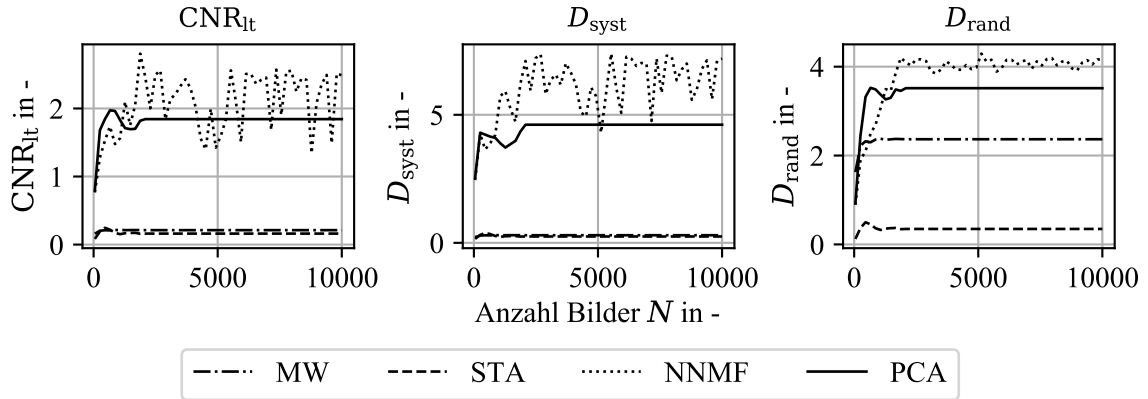


Abb. 4.29.: CNR_{lt} , D_{sys} und D_{rand} über der Anzahl N an ausgewerteten Einzelaufnahmen in der Bildserie bei einer Aufnahme­frequenz von $f = 20$ Hz.

In Abb. 4.30 ist die systematische und zufällige Abweichung der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition über N aufgetragen. Die Skalierung ist so gewählt, dass eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse möglich ist, obwohl dadurch manche Datenpunkte nicht oder nur teilweise sichtbar sind. Entsprechend den Ergebnissen des vorherigen Abschnittes werden minimale systematische Abweichungen $\sigma_{x_{tr},syst}$ durch die Verwendung der erweiterten Bildverarbeitungsmethoden NNMF und PCA erreicht. Hierbei fällt auf, dass die NNMF einige Ausreißer von der minimal erreichten Abweichung aufweist, während das Ergebnis der PCA ab eine, $N > 1800$ auf einem konstant niedrigen Niveau bleibt.

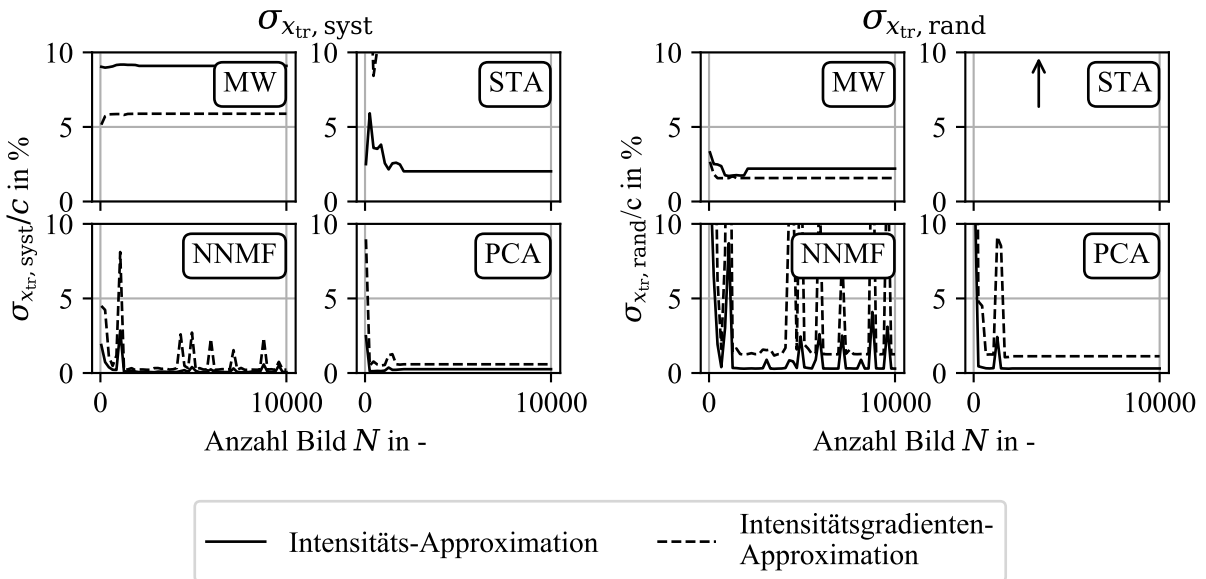


Abb. 4.30.: Systematische und zufällige Abweichung der Lokalisierung der laminar-turbulente Transition über der Anzahl N an ausgewerteten Einzelaufnahmen in der Bildserie bei einer Aufnahme­frequenz von $f = 20$ Hz.

Bei der zufälligen Abweichung $\sigma_{x_{tr,rand}}$ ist das gleiche Phänomen der des nicht-konstanten Verlaufs in dem NNMF Ergebnis zu erkennen. Die PCA erreicht wiederum ab einem $N > 1800$ ein konstant niedriges Niveau, das noch unterhalb des Ergebnisses der MW Visualisierung liegt. Ebenfalls auffällig ist, dass sowohl bei der NNMF, als auch der PCA die Approximation der Intensität eine niedrigere zufällige Abweichung erreicht, als beim MW Ergebnis. Der Grund dafür ist wie im Abschnitt zuvor dargelegt die Fähigkeit systematische Gradienten in den Strömungsbereichen zu reduzieren, um die Approximation der Intensität mit geringere zufälliger Abweichung zu ermöglichen. Dieses Ergebnis ist in Übereinklang mit den Simulationsergebnissen in Abb. 4.5 aus Abschnitt 4.2.

4.4.2. Aufnahmefrequenz

Analog zur vorangegangenen Auswertung, wird die Untersuchung des Einflusses der Aufnahmefrequenz f untersucht. Die Anzahl an verwendeten Einzelaufnahmen beträgt in jeder Einzelmessung $N = 2100$ und liegt damit über dem zuvor analysierten Grenzwert. Zunächst fällt auf, dass die Kenngrößen bei der Verwendung der erweiterten Bildverarbeitungsmethoden eine größere Empfindlichkeit aufweisen, als bei den klassischen Verfahren. Während die Kennwerte für die beiden klassischen Verfahren nahezu konstant bleiben, weisen die Werte für die NNMF und PCA Schwankungen auf. Auffällig ist, dass die Verläufe der NNMF ihr Maximum nicht bei höheren Frequenzen, sondern bereits für $f < 50$ Hz. Bei der PCA erreicht das CNR_{lt} sein Maximum ebenfalls bei ca. 50 Hz und D_{syst} bereits bei ca. 20 Hz, bevor es ein lokales Minimum aufweist und dann auf einem konstanten Niveau verbleibt. D_{rand} der PCA hingegen steigt stetig an, bis das Maximum bei 50 Hz erreicht wird. Für beide Verfahren bleiben die Kennwerte ab einer Frequenz von 50 Hz relativ konstant und verändern sich nicht mehr signifikant. Abhängigkeit von der Frequenz der Bildserie entsteht durch die Art der zeitlichen Fluktuationen in den Bildbereichen, aus denen eine Varianz zwischen den Aufnahmen resultiert, die von den Verfahren der Merkmalsextraktion als Merkmale identifiziert werden können. Eine höhere zeitliche Auflösung bietet eine höhere Auflösung von kurzen Fluktuationen. Interessant bei den Ergebnissen ist jedoch, dass die beiden Merkmalsextraktionen unterschiedlich auf die Auflösung der Fluktuationen reagieren.

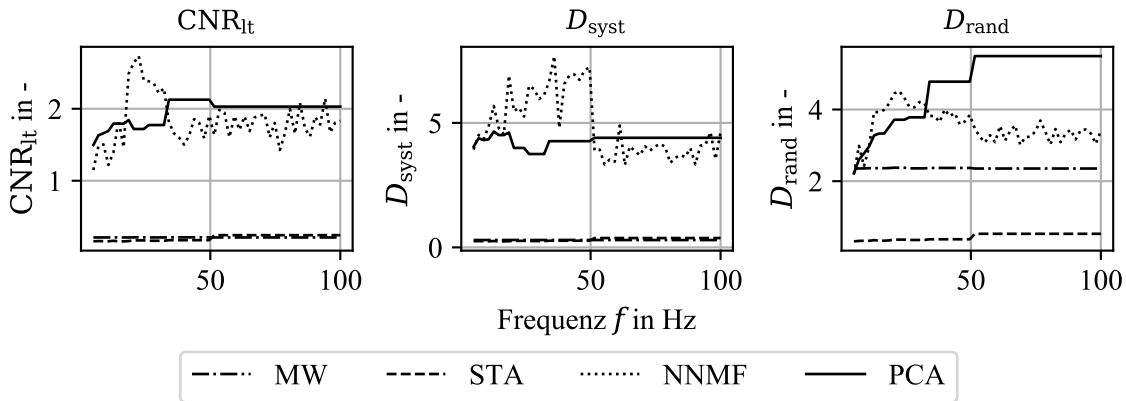


Abb. 4.31.: CNR_{lt} , D_{syst} und D_{rand} über der Aufnahmefrequenz f der Bildserie bei einer Gesamtanzahl an Einzelaufnahmen von $N = 2100$.

Die Abweichungen der Lokalisierung in Abhängigkeit von der Frequenz f sind in Abb. 4.32 dargestellt. Bei der systematischen Abweichung ist zu erkennen, dass die erweiterten Bildverarbeitungsverfahren die im vorherigen Abschnitt ermittelte Reduzierung gegenüber den klassischen Verfahren bewirkt. Die PCA erreicht bereits bei geringen Frequenzen ihr Minimum, was sich durch ein früh erreichtes hohes D_{syst} erklären lässt. Bei der NNMF ist ein plötzlicher lokales

Maximum bei $f \approx 40\text{Hz}$ zu erkennen, während eine Steigerung der Frequenz von $> 50\text{Hz}$ keine Reduzierung der systematischen Abweichung bewirkt. Bei der zufälligen Abweichung fällt ebenfalls ein lokales Maximum bei $f \approx 40\text{Hz}$ bei der Verwendung der NNMF auf. Hingegen erreicht die Abweichung bei der PCA erneut ihr Minimum ab einer Frequenz von bereits $f = 15\text{Hz}$, obwohl das Maximum von D_{rand} erst ab 50Hz erreicht wird.

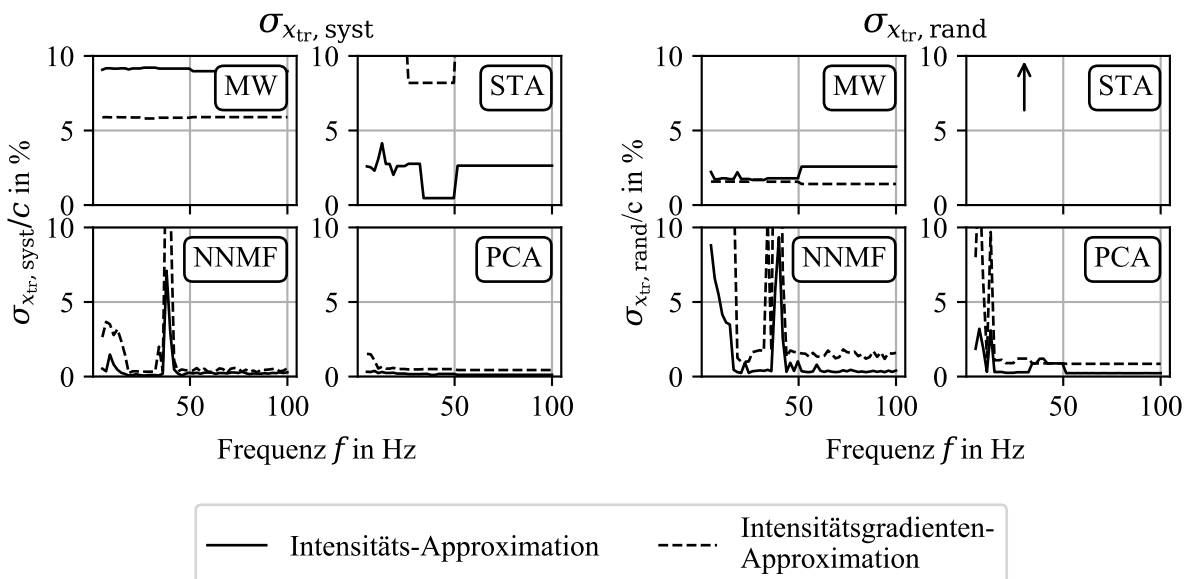


Abb. 4.32.: Systematische und zufällige Abweichung der Lokalisierung der laminar-turbulente Transition über der Aufnahme­frequenz f der Bildserie bei einer Gesamtanzahl an Einzelaufnahmen von $N = 2100$.

Zusammenfassend lässt sich ein deutlicher Unterschied in der Abhängigkeit von der Anzahl an ausgewerteten Einzelaufnahmen N und der Frequenz f zwischen den klassischen und erweiterten Bildverarbeitungsmethoden erkennen. Während die Ergebnisse der klassischen Verfahren relativ stabil bleiben, schwanken die Ergebnisse der NNMF deutlich mehr. Des Weiteren fällt auf, dass es sowohl für N , als auch für f Grenzwerte gibt, unter denen die Verfahren ihr Potential einer maximierten Unterscheidbarkeit und minimierten Abweichung bei der Lokalisierung nicht ausschöpfen. Die Erklärung liegt in der Funktionsweise der Merkmalsextraktionsverfahren, welche Fluktuationen in der Bildserie auswerten. Der Unterschied zur STA liegt darin, dass Fluktuationen mit unterschiedlichen Frequenzen als unterschiedliche Merkmale extrahiert werden können. Dies ist jedoch nur möglich, wenn die Fluktuationen auch in der Bildserie abgebildet werden. Bei welchen Werten die Grenzwerte liegen lässt sich nicht allgemeingültig sagen und hängt von der Datengrundlage ab. Dies stellt eine eindeutige Schwierigkeit für die Anwendung der erweiterten Bildverarbeitungsmethoden dar. Ohne das Ziel einer Maximierung bzw. Minimierung der Kennwerte, sondern lediglich im direkten Vergleich mit den klassischen Bildverarbeitungsmethoden stellen die dargelegten Ergebnisse aber einen klaren Vorteil der Merkmalsextraktionen dar.

4.5. Fazit

In diesem Kapitel wurden klassische und erweiterte Bildverarbeitungsmethoden eingeführt, mit denen Bildserien von thermografischen Strömungsvisualisierungen ausgewertet werden können, um Strömungsvisualisierungen mit höherem Kontrast-zu-Rausch Verhältnis zwischen dem la-

minaren und turbulenten Strömungsbereich zu erzeugen. Neben den klassischen Bildverarbeitungsverfahren der Mittelwertbildung (MW) und zeitlichen Standardabweichung (STA) wurden zwei Verfahren der Merkmalsextraktion, die nicht-negative Matrixfaktorisierung (NNMF) und die Hauptkomponentenanalyse (PCA) eingeführt und angewandt. Die erzeugten Visualisierungen wurden bezüglich ihrer Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche durch Quantifizierung der Kenngrößen CNR, D_{sys} und D_{rand} bewertet, vgl. Abschnitt 2.5.1. Neben der globalen Unterscheidbarkeit wurde auch untersucht, welche Abweichung bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition durch die in Abschnitt 2.6 eingeführten Verfahren in den jeweils erzeugten Strömungsvisualisierungen auftritt. Für ein näheres Verständnis des Zusammenhanges der eingeführten Kenngrößen der Unterscheidbarkeit D_{sys} bzw. D_{rand} und der Auswirkung auf die zufällige und systematische Abweichung bei der Lokalisierung, wurde eine Simulation durchgeführt, bei der die Kenngrößen gezielt beeinflusst wurde, indem die Strömungsvisualisierungen mit systematischen Gradienten und zufälligem Bildrauschen überlagert wurden. In den simulierten Visualisierungen wurde anschließend die laminar-turbulente Transition lokalisiert und die resultierende Abweichung berechnet. Ergebnis der Simulation ist eine direkte Abhängigkeit der zufälligen Abweichung von dem vorhandenen Bildrauschen und systematischen Gradienten in der Aufnahme und eine Abhängigkeit der systematischen Abweichung von nur den systematischen Gradienten in den Visualisierungen. Daraus leitet sich die Zielsetzung ab, sowohl D_{sys} , als auch D_{rand} zu maximieren, um die Abweichungen der Lokalisierung zu minimieren. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass die Erweiterung der Lokalisierungsverfahren durch eine zweite Iterationsstufe mit eingeschränktem Approximationsbereich eine deutliche Reduzierung der Abweichungen bei Verwendung der Intensitäts-Approximation bewirkte. Damit kann auch für geringere D_{sys} , also beim Auftreten von systematischen Gradienten, die Approximation der Intensität angewandt werden, um den im Stand der Technik ermittelten Vorteil einer geringeren zufälligen Abweichung zu erreichen. Die bisher unberücksichtigte systematische Abweichung der Lokalisierung konnte ebenfalls durch die Erweiterung reduziert werden. Jedoch ist die Approximation des Intensitätsgradienten robuster gegenüber dem Auftreten von systematischen Gradienten, weshalb keine allgemeingültige optimale Wahl bei der Lokalisierungsmethode getroffen werden kann.

Im Zentrum des Kapitels stehen die Ergebnisse der Auswertung von realen Messdaten. Hierzu wurde zunächst an einem bekannten Zylinderobjekt mit vorhandenen Referenzmesssystemen für die Grenzschichtströmung gemessen. Hierbei konnte gezeigt werden, dass alle Bildverarbeitungsverfahren im Stande sind, eine Visualisierung zu erzeugen, die als Strömungsvisualisierung interpretiert werden kann. Entsprechend der Erwartung konnte in der MW Visualisierung die Unterscheidbarkeit durch eine Reduzierung des Bildrauschens erreicht werden (gesteigertes D_{rand}). Die anderen Verfahren bewiesen ihre Fähigkeit durch Auswertung der Fluktuationen konstant überlagerte Bildartefakte auszufiltern. Die erweiterten Bildverarbeitungsverfahren reduzierten systematische Gradienten gegenüber dem vorhandenen Kontrast und steigerten somit das CNR. Um die Eignung der Verfahren an einem Rotorblattprofil zu untersuchen, wurden zwei Windkanalexperimente an einem aerodynamischen Profil ausgewertet. Die thermischen Bedingungen wurden so gewählt, dass eine Messung mit hohem CNR zwischen den Strömungsbereichen und eine Messung mit niedrigem CNR vorlagen. Während das CNR in der Messung mit ohnehin hohem CNR in den Rohdaten nur geringfügig gesteigert werden konnte, lies sich ein Vorteil der Merkmalsextraktionsverfahren herausarbeiten, indem systematische Gradienten (gesteigertes D_{sys}) und eine daraus resultierende systematische Abweichung bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition reduziert wurden. Bei der Approximation der Intensität konnte die systematische Abweichung um eine Größenordnung reduziert werden. Für die Approximation des Gradienten ergab sich eine Reduzierung um die Hälfte. In dem Experiment mit geringem CNR in den Rohdaten konnte das CNR durch die Verfahren der Merkmalsextraktion sogar um eine ganze Größenordnung gesteigert werden. Auch hier lässt sich der Anstieg erneut auf die Reduzierung systematischen Gradienten zurückführen. Es resultiert eine Reduzierung der syste-

matischen Abweichung bei der Lokalisierung um eine bis sogar zwei Größenordnung, abhängig von dem gewählten Lokalisierungsverfahren. Auch die zufällige Abweichung konnte um 50 % oder sogar 75 % reduziert werden. Um das Verfahren auch für die Freifeldanwendung an sich in Betrieb befindlichen WEA zu überprüfen, wurde eine Freifeldmessung mit geringer Sonneneinstrahlung auf die Rotorblattoberfläche ausgewertet. In den aufgenommenen Thermografieaufnahmen ist das CNR zwischen der laminaren und turbulenten Transition so gering, dass weder eine globale Unterscheidbarkeit der Bereiche, noch eine Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition möglich ist. Die Verfahren der Merkmalsextraktion resultierten in eine Strömungsvisualisierung mit einem um über 100 % gesteigertem CNR, durch welches eine Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche möglich wurde. Die Reduzierung von systematischen Gradienten ermöglichte zudem eine Anwendung der Verfahren zur Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition.

Es konnte nachgewiesen werden, dass die erweiterten Bildverarbeitungsverfahren NNMF und PCA im Stande sind, Strömungsvisualisierungen zu erzeugen, deren Strömungsbereiche eine höhere Homogenität aufweisen, als in den Rohaufnahmen oder Ergebnissen der klassischen Bildverarbeitungsverfahren. Die verschiedenen Strömungsbereiche wurden als Merkmale in den Rohdaten identifiziert und extrahiert, so dass zusätzlich zur Homogenisierung der Bereiche ein Kontrast zwischen den Bereichen entsteht. Dies ermöglicht eine deutliche Reduzierung der zufälligen und systematischen Abweichungen bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition. Zwischen den Verfahren verglichen, konnte die NNMF bei den untersuchten Experimenten im Windkanal ein höheres CNR erreichen. In der Freifeldanwendung erzielte die PCA hingegen eine höhere Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche. Verglichen mit den klassischen Verfahren erzielten die NNMF und PCA in allen Untersuchungen ein höheres CNR und eine geringere Abweichung bei der Lokalisierung. Im Gegensatz zu den klassischen Verfahren ist jedoch ein höherer Aufwand bei der Erzeugung der Strömungsvisualisierungen zu beachten. Während die Mittelwertbildung und zeitliche Standardabweichung ein einzelnes Bild als Ergebnis produzieren, resultieren aus den Merkmalsextraktionsverfahren mehrere Bilder, die bezüglich des CNR zwischen den Strömungsbereichen bewertet werden müssen. Hierfür ist Vorwissen über die ungefähre Lage der Strömungsbereiche erforderlich, um das CNR zu berechnen. Eine weitere Limitierung der Merkmalsextraktionen ist der Ausschnitt der Rohbilder, der ausgewertet werden. Die Verfahren sind empfindlich gegenüber Bildbereichen, die keine zu messende Oberfläche darstellen, unabhängig davon, ob diese konstante oder auch fluktuierende bzw. veränderliche Temperaturen aufweisen. Daher dürfen bei der Auswahl des auszuwertenden Bildbereiches nur Oberflächenbereiche abgebildet werden. Beide Limitierungen motivieren eine Vorauswertung durch eine klassische Bildverarbeitung wie der Mittelwertbildung, in der das nötige Vorwissen über den Oberflächenbereich in der Aufnahme und die grobe Verteilung der Strömungsbereiche ermittelt werden kann, bevor die erweiterten Verfahren der Merkmalsextraktion angewandt werden. Darüber hinaus gilt es zu vermuten, dass in Strömungsvisualisierungen mit sehr hohem CNR und niedrigem D_{sys} die Verfahren der Merkmalsextraktion keine signifikante Verbesserung bewirken und die klassischen Verfahren zu bevorzugen sind. Ein weiterer signifikanter Nachteil der NNMF besteht in der nicht-deterministischen Ergebnisbildung. Um ein maximales CNR zu erreichen muss der Algorithmus wiederholt angewandt werden und die Ergebnisse miteinander verglichen werden. Bei der PCA besteht diese Schwierigkeit nicht.

5. Lokalisierung verfrühter Transitionen

Um die Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition auf Rotorblattoberflächen von sich in Betrieb befindlichen WEA weiter zu entwickeln, wurde bereits in Kapitel 2 motiviert, dass das Lokalisierungsverfahren basierend auf der Auswertung der lokal begrenzten Temperaturänderung zwischen den Strömungsbereichen an die realen Bedingungen in der Freifeldanwendung angepasst werden müssen. Die im vorherigen Kapitel angewandten Lokalisierungsverfahren sind wie in Abschnitt 2.6.2 beschrieben für eine quer zur Auswerterichtung orientierte natürliche Transitionslinie ausgelegt. Im Freifeld existieren aufgrund von Oberflächenstörungen jedoch Turbulenzkeile mit schräg verlaufenden Abschnitten der Transitionslinie auf. In diesen Bereichen weist das Lokalisierungsverfahren hohe Abweichungen auf, vgl. Abbildung 2.25. Aus diesem Grund wurde in Abschnitt 2.6.2 ein Messprinzip vorgestellt, das einen multi-direktionalen Ansatz verfolgt, um die Lokalisierung der verfrühten laminar-turbulenten Transitionen in Bereich der Turbulenzkeile mit geringer Abweichung zu lokalisieren. Ziel ist es, sowohl in Bereichen der verfrühten als auch der natürlichen Transition gleichermaßen zu Detektieren und mit minimaler Abweichung zu Lokalisieren, um basierend auf der Lokalisierung die Reduktion der laminaren Strömung (LFR) zu quantifizieren. Eine Weiterentwicklung des vorhandenen Verfahrens zur Detektion der natürlich Transition ist die Lokalisierung in den Bereichen der Turbulenzkeile. Es gilt zu untersuchen, wo die Grenzen des Verfahrens liegen bezüglich dem Kontrast eines Turbulenzkeils.

In Abschnitt 5.1 wird die Implementierung des vorgestellten Messprinzips vorgestellt. Das Verfahren wird hierbei in fünf Teile unterteilt die anschließend vorgestellt werden. Anschließend werden in Abschnitt 5.2 die Ergebnisse der angewandten Lokalisierung verfrühter Transitionen vorgestellt. Die Ergebnisse unterteilen sich hierbei in einer Verifikation anhand einer Simulation und einer Strömungsvisualisierung mit Turbulenzkeil und der Validierung des Verfahrens an einer realen Freifeldmessung an einer sich in Betrieb befindlichen WEA.

5.1. Implementierung

Die Bildverarbeitung zur Lokalisierung der verfrühten Transition ist in der Skriptsprache *Python* implementiert. Der Algorithmus ist in fünf Unterroutinen unterteilt, die im Folgenden aufgelistet und im Detail erläutert werden.

1. Vorauswertung der Strömungsvisualisierung
2. Detektion aller lokalen Gradientenmaxima, welche die natürliche und verfrühte Transition repräsentieren
3. Filterung der Gradientenmaxima mit Plausibilitäts- und Ausreißeranalyse
4. Erzeugung der finalen tatsächlichen und natürlichen Transitionslinie aus den gefilterten Gradientenmaxima
5. Quantifizierung der Reduktion der laminaren Strömung (LFR)

Vorauswertung

Der erste Schritt ist die Löschung von Ausreißern in der Strömungsvisualisierung aufgrund von Pixelfehlern auf dem Kamerachip mit Hilfe der „Navier-Stokes Image Inpainting“-Methode der Python-Bibliothek *openCV* [Ber2001] mit einem Konvergenzintervall von 5σ um die mittlere

Intensität. Um die nachfolgenden Auswertungsschritte räumlich zu begrenzen, wird der Bildbereich, der die Rotorblattoberfläche darstellt, durch spaltenweises Auffinden der beiden absoluten Maximaltemperaturgradienten vom Hintergrund getrennt. Die Orte dieser Gradientenmaxima werden als Position der Rotorblattvorderkante (LE) und -hinterkante (engl: trailing edge - TE) in der jeweiligen Bildspalte gespeichert. Alle folgenden Auswertungsschritte werden innerhalb dieser Grenzen durchgeführt.

Detektion aller lokalen Gradientenmaxima

Die zweite Subroutine bestimmt die Positionen der lokalen Gradientenmaxima, welche zwei definierte Kriterien erfüllen. Zum einen muss der Gradient einen gewissen Schwellwert überschreiten und zum anderen eine bestimmte Richtung aufweisen. Die Richtung des Gradienten entspricht hierbei der bekannten Orientierungen der Transitionsegmente. Um dies zu erreichen, werden die in Abschnitt 2.6.2 vorgestellten zwei Messansätze implementiert. Die Positionen Δ der so lokalisierten Gradienten werden für die weitere Verarbeitung abgespeichert.

Methode A: Keine Bildrotation und 2D-Gradientenauswertung

Für Methode A der Gradientenauswertung wird der *Canny Edge*-Algorithmus der *opencv*-Bibliothek verwendet. Der Algorithmus reduziert zunächst das Rauschen mit einem 5×5 Gaußfilter mit $\sigma = 1$, bevor die erste Ableitung G_x in horizontaler und G_y in vertikaler Richtung mit einem 3×3 *Sobel*-Kernel ermittelt werden. Anschließend werden der Betrag G und die Richtung β der Gradienten wie folgt berechnet:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (5.1)$$

und

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{G_y}{G_x} \right). \quad (5.2)$$

Um die detektieren Kanten in der Aufnahme auszudünnen, wird eine *Nicht-Maxima Unterdrückung* angewandt: Es werden die Gradienten der benachbarten Pixel vor und nach dem aktuell beobachteten Pixel in Richtung seines Gradienten untersucht. Wenn der aktuelle Pixel das lokale Maximum dieser Gradienten darstellt, wird er weiter berücksichtigt, andernfalls wird er vernachlässigt. Im letzten Schritt wird ein Schwellentest durchgeführt. Alle lokalen Gradienten mit einer Amplitude unterhalb eines Schwellenwertes werden unterdrückt. Anschließend wird eine Auswahl der Gradienten auf der Grundlage ihrer Richtung getroffen, die dem a priori Wissen über die Orientierung der Transitionsegmente entspricht.

Um eine hohe Empfindlichkeit gegenüber schwachen, kontrastarmen Turbulenzkeilen zu ermöglichen (Fall C in Abschnitt 2.6.2), wird ein niedriger Schwellenwert δt_{verf} für die Auswertung der lokalen Gradientenmaxima an den Positionen Δ_{verf} gewählt, die bei der Auswertung orthogonal zu den verfrühten Transitionsegmente ermittelt werden. Für die Auswertung der Gradienten in Strömungsrichtung wird ein höherer Schwellenwert δt_{nat} verwendet, um die lokalen Gradientenmaxima robust zu erkennen, welche die natürliche Transition, also keine verfrühten Transitionen, darstellen. Dies ist möglich, da die Gradienten in diesen Bereichen höher ausfallen als die Gradienten der verfrühten Transitionen an den Positionen Δ_{verf} . Die Position der so lokalisierten Gradientenmaxima, werden als Δ_{nat} abgespeichert.

Methode B: Bildrotation und 1D-Gradientenauswertung

Bei der Methode B wird die Strömungsvisualisierung um die drei Drehwinkel $\alpha_{\text{rot}} = 0^\circ$, $\alpha_{\text{rot}} = \alpha_{\text{rot},1}$ und $\alpha_{\text{rot}} = \alpha_{\text{rot},2}$ gedreht, vgl. Abb. 2.26, wobei jeweils eine Gruppe der Transitionsegmenten-

te parallel zur x' -Achse der gedrehten Aufnahme und damit senkrecht zur vertikalen y' -Achse ausgerichtet wird. Durch eine anschließende spaltenweise Gradientenauswertung der Intensitätsprofile der gedrehten Aufnahme wird die Position aller lokalen Gradientenmaxima mit einem Wert größer δt_{verf} gespeichert. Aufgrund der senkrechten Ausrichtung zwischen der Auswertungslinie und den jeweiligen Übergangsegmenten sind die lokalen Intensitätsgradienten an den Positionen der Transition maximiert. Die Auswertung aller Spalten ergibt die Sammlung aller lokalen Gradientenmaxima der gedrehten Aufnahme, welche größer als der Schwellenwert sind. Der Gradientenschwellwert δt_{nat} , der für den Drehwinkel $\alpha_{\text{rot}} = 0^\circ$ verwendet wird, ist größer als bei den Drehwinkeln $\alpha_{\text{rot},1}$ und $\alpha_{\text{rot},2}$. Dadurch wird eine robustere Erkennung der natürlichen Transition in den Spalten ohne verfrühte Transition erreicht, da die natürlichen Transitionen dazu neigen, einen höheren Intensitätsgradienten auszuprägen. Der niedrigere Schwellenwert δt_{verf} für die beiden Rotationswinkel $\alpha_{\text{rot},1}$ und $\alpha_{\text{rot},2}$ bewahrt dagegen eine hohe Empfindlichkeit gegenüber niedrigen Gradienten im Bereich der verfrühten Transition an kontrastarmen Turbulenzkeilen. Die Kombination aller Gradienten der $\alpha_{\text{rot},1}$ - und $\alpha_{\text{rot},2}$ -Rotation ergibt alle Positionen Δ_{verf} der lokalen Gradientenmaxima und stellen die verfrühte Transition dar. Die Positionen der lokalen Gradientenmaxima, welche die natürliche Transition darstellen und durch den Rotationswinkel $\alpha_{\text{rot}} = 0^\circ$ ermittelt werden, werden als Δ_{nat} gekennzeichnet.

Filterung der Gradientenmaxima

Nach der Detektion der lokalen Gradientenmaxima an den Positionen Δ_{nat} und Δ_{verf} mit dem jeweiligen Paar an angewandten Schwellenwerten, wird zunächst die natürliche Transitionslinie anhand der lokalisierten Gradientenpositionen in Δ_{nat} bestimmt. Für die Approximation der Transitionslinie wird der robuste lineare RANSAC-Regressionsalgorithmus verwendet, da dieser einzelne Ausreißer ausschließt. Das Ergebnis ist der approximierte lineare Verlauf der natürlichen Transition $Y_{\text{tr, nat}}$ und stellt die Lage der laminar-turbulente Transition ohne das Auftreten von verfrühten Transitionen dar. Die Lage der natürlichen Transition wird in den folgenden Schritten verwendet, um Positionen detektierter lokaler Gradientenmaxima auszufiltern: Zunächst werden alle Spalten mit einem Eintrag in Δ_{nat} , die sich in der Nähe der natürlichen Transitionslinie befinden, auf den jeweiligen Spaltenwert der Regressionslinie gesetzt, wobei weiter entfernte Gradienten aus der Sammlung entfernt werden. Zusätzlich wird die Anzahl der lokalisierten Gradientenpositionen in Δ_{nat} pro Bildspalte auf eins begrenzt. Anschließend werden Löcher einzelner Bildspalten ohne Eintrag in Δ_{nat} gefüllt, wenn sie von Spalten umgeben sind, die in Δ_{nat} enthalten sind. Einträge in Δ_{verf} , welche die verfrühten Transitionen repräsentieren werden gefiltert, indem der Bereich eines plausiblen Auftretens der verfrühten Transition in jeder Bildspalte als Strecke zwischen der Vorderkante und der Lage der natürlichen Transitionslinie definiert wird. Eine zweite Subroutine löscht jeden Eintrag in Δ_{verf} , der weniger als zwei benachbarte Bildpunkte aufweist, die ebenfalls in Δ_{verf} enthalten sind, um einzelne Ausreißer in der Aufnahme zu entfernen. In einem letzten Schritt wird jede Bildspalte separat analysiert. Wenn ein lokales Gradientenmaxima erkannt wurde, das die natürliche Transition darstellt, werden alle Einträge in Δ_{verf} für die jeweilige Spalte gelöscht.

Erzeugung der finalen tatsächlichen und natürlichen Transitionslinie

Die Kombination der lokalisierten Gradientenpositionen in Δ_{nat} und Δ_{verf} ergibt Δ_{tr} . Δ_{tr} beinhaltet damit alle Positionen von lokalen Gradientenmaxima, welche die tatsächliche Transitionslinie in der Thermografieaufnahme darstellen. Der letzte Teil der Auswertung ist in zwei Schritte unterteilt: Zunächst die Berechnung der natürlichen Transitionslinie $Y_{\text{tr, nat}}$ durch Anwendung des robusten linearen Regressionsalgorithmus RANSAC auf die gefilterten Positionen Δ_{nat} und im Anschluss die Berechnung der endgültigen tatsächlichen Transitionslinie aus den Positionen Δ_{tat} .

Um potentiell vorhandene Lücken an den Spitzen der Turbulenzkeile zu schließen, werden Verfahren der Bildverarbeitung angewandt. Hierfür werden die Positionen der gefundenen und ausgefilterten lokalen Gradientenmaxima als Binärbild mit den Dimensionen der Thermografieaufnahme aufgefasst und eine morphologische Dilatation und Erosion angewandt. Anschließend wird in jeder Bildspalte i , der erste Eintrag in Δ_{tr} stromaufwärts als finale Transitionsposition dieser Spalte $y_{tr,i}$ definiert. Aus allen $y_{tr,i}$ der Bildspalten wird die endgültige tatsächliche Transitionslinie $Y_{tr, tats}$ definiert. In einem letzten Schritt wird die Transitionslinie mit einem $\sigma = 1$ Gaußfilter in x -Richtung geglättet, um den Einfluss der verbleibenden Ausreißer zu reduzieren.

Quantifizierung der Reduktion der laminaren Strömung

Als finaler Schritt wird der Verlauf der natürlichen und der tatsächliche Transitionslinie sowie die Position der Vorderkante verwendet, um die Reduktion der laminaren Strömung aufgrund des Auftretens verfrühter Transitionen zu berechnen. Hierfür finden Gleichungen (2.36) und (2.37) Anwendung.

5.2. Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der vorgestellten Lokalisierungsmethoden zur Lokalisierung der Transitionslinie in thermografische Strömungsvisualisierungen mit erhöhter Empfindlichkeit gegenüber verfrühten Transitionen vorgestellt. Zunächst wird eine Verifikation an simulierten Testdaten mit bekannter Lage der Transitionslinie entlang eines Rotorblattsegments durchgeführt. Die Grenzen der Lokalisierung werden durch Variation des Kontrastes des Turbulenzkeils und durch das Bildrauschen in der Simulation untersucht. Auf diese Weise kann die allgemeine Anwendbarkeit der vorgestellten Methoden durch den Vergleich mit dem Stand der Technik im Hinblick auf die Abweichung der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition und die Erkennung kontrastarmer Turbulenzkeile verifiziert werden.

Der Verifikation an Simulationsdaten folgt eine Validierung des Lokalisierungsverfahrens anhand einer tatsächlichen thermografische Strömungsvisualisierung an einem Rotorblatt einer WEA in Betrieb. Der Kontrast von mehreren sichtbaren Turbulenzkeilen wird analysiert und das Ergebnis der vorgestellten Methoden der Lokalisierung verglichen.

Um ein Gleichgewicht zwischen der Empfindlichkeit in Bezug auf die Lokalisierung der verfrühten Transition mit lokalen Gradientenmaxima mit geringer Amplitude und der Robustheit gegenüber dem Bildrauschen zu erreichen, stützt sich das Lokalisierungsverfahren auf die Verwendung von Schwellenwerten. Die Bildinformationen der Thermografieaufnahmen werden als Intensitätswerte zwischen 0 und 1 ausgewertet, weshalb die angewandten Schwellenwerte Intensitätswerte ohne Einheit sind. Die in Abschnitt 5.1 eingeführten Schwellenwerte des Lokalisierungsverfahrens werden wie folgt gewählt. Bei Methode A beträgt $\delta t_{nat} = 0,15$ für die natürliche Transition und $\delta t_{verf} = 5,5 \cdot 10^{-2}$ für den verfrühten Transition. Methode B verwendet eine eindimensionale Gradientenauswertung und hat daher niedrigere Werte von $\delta t_{nat} = 1,9 \cdot 10^{-2}$ und $\delta t_{pre} = 4 \cdot 10^{-3}$. Die Schwellenwerte sind so gewählt, dass beide Methoden bei der Auswertung des gleichen Intensitätsprofils annähernd die gleichen lokalen Gradientenmaxima lokalisieren.

5.2.1. Verifikation

Um die Messabweichung der eingeführten Lokalisierungsmethoden zu bewerten, werden verschiedene thermografische Strömungsvisualisierungen simuliert und das Ergebnis der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition mit der wahren Position verglichen. Um das SNR bzw. CNR in den Simulationsbildern an die real auftretenden Werte von Messungen im Freifeld anzupassen, wird die reale thermografische Strömungsvisualisierung ausgewertet, die in der Validierung ausge-

wertet wird, vgl. Abschnitt 5.2.2. Die gemessenen Werte für das SNR in den Strömungsbereichen bzw. CNR zwischen der laminaren und turbulenten Strömung wurden anschließend direkt bei der Erzeugung der Simulationsbildern angewandt. Die Analyse der realen Messung ergibt eine räumliche Standardabweichung für den laminaren Strömungsbereich von $\sigma_l = 7,85 \cdot 10^{-3}$ und den turbulenten Strömungsbereich von $\sigma_t = 5,68 \cdot 10^{-3}$. Mit der mittleren Intensität $\bar{I}_l = 0,98$ und $\bar{I}_t = 0,80$ berechnet sich das CNR zwischen der laminaren und turbulenten Strömung zu 18,66.

Zunächst wird im folgenden Abschnitt ein Simulationsbild mit verfrühten Transitionen und Turbulenzkeil, sowie die Ergebnisse der Lokalisierungsverfahren vorgestellt. Die Ergebnisse werden mit der realen, bekannten Lage der Transition verglichen. Anschließend werden zwei Einflussparameter auf die Messabweichung der Lokalisierung untersucht. Da es sich bei der Lokalisierung um ein Gradientenverfahren handelt, wird zunächst der Einfluss des Kontrastes des Turbulenzkeils mit der umgebenen laminaren Strömung untersucht. Anschließend wird nicht der absolute Kontrast, sondern das im Bild vorhandene Rauschen variiert, um die Auswirkung von zufälligem Rauschen auf die Lokalisierung zu betrachten.

Simulation

In Abb. 5.1 (a) ist eine simulierte Strömungsvisualisierung eines Rotorblattsegmentes mit verfrühter Transition und einem sich ausprägenden Turbulenzkeil im Bereich der laminaren Strömung dargestellt. Die Intensitätswerte sind auf ein Intervall zwischen 0 und 1 normiert. Der Turbulenzkeil wird durch einen Vorderkantenoberflächendefekt bei $(x, y) = (35, 115)$ Pixel ausgelöst und öffnet sich in negative y -Richtung bis sich die natürliche Transitionslinie bei $y = 70$ Pixel über die gesamte Aufnahme erstreckt. Abb. 5.1 (b)-(c) stellt den Bildausschnitt des markierten Bereichs in Abb. 5.1 (a) und die Ergebnisse der vorgestellten Lokalisierungsmethoden A und B dar. Die Positionen der detektierten lokalen Gradientenmaxima Δ_{nat} und Δ_{verf} sind jeweils getrennt voneinander dargestellt.

Im Gegensatz zur eindimensionalen Gradientenauswertung der Standard-Technik Methode, dargestellt in Abb. 5.1 (d), sind die Methoden A und B in der Lage, die verfrühten Transitionen zu erkennen und die Transitionslinie mit Ausnahme des Bereichs an der Spitze des Turbulenzkeils korrekt zu lokalisieren. Der Grund für die nicht vollständige Lokalisierung der Keilspitze eine geringe Intensität im Bereich der Vorderkante. An der Spitze des Turbulenzkeiles prägt sich ein nur sehr geringer Gradienten aus, der aufgrund der verwendeten Schwellwerte nicht detektiert wird. Infolgedessen ist die Spitze des Turbulenzkeils nicht in der endgültigen berechneten Transitionslinie enthalten. In Abb. 5.1 (d) ist zudem auch die wahre Transitionslinie des simulierten Bildes als Referenz dargestellt, die mit den lokalisierten Transitionslinien bzgl. ihrer Abweichung zueinander verglichen wird. Zur Quantifizierung der Abweichungen wird der Mittelwert aller euklidischen Abstände zwischen jedem Bildpunkt der lokalisierten Transitionslinie und dem nächsten Bildpunkt der Referenzlinie. Dieser Abstand berechnet sich zu 2,2 Pixel für Methode A und 2,0 Pixel für Methode B. Die Abstandsberechnung wird nur im Bereich des Turbulenzkeils durchgeführt, um sich bei der Auswertung auf die Erkennung der verfrühten Transitionen zu fokussieren.

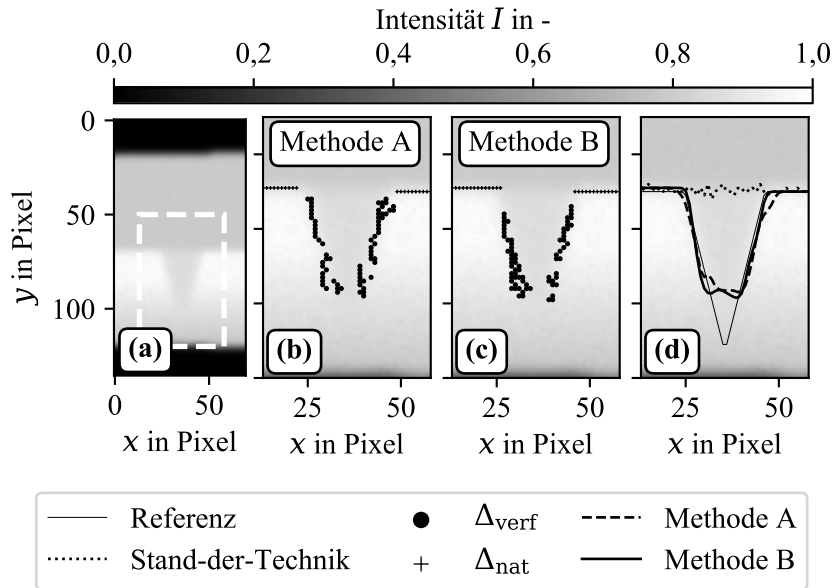


Abb. 5.1.: Simulierte thermografische Strömungsvisualisierung mit einem Turbulenzkeil im Bereich der laminaren Strömung, sowie die Stand-der-Technik eindimensionale Lokalisierungsverfahren und die beiden eingeführten erweiterten Methoden A und B.

Einfluss des Kontrastes

Um die Robustheit des vorgestellten Lokalisierungsverfahrens für die Lokalisierung der verfrühten Transition gegenüber auch kontrastarmen Turbulenzkeilen zu bewerten, wird das simulierte Bild aus Abb. 5.1 (a) mit variierendem Kontrast zwischen dem Turbulenzkeil und dem umgebenden laminaren Strömungsbereich rekonstruiert. Um ein intuitives Verständnis zu ermöglichen, wird der Kontrast des Turbulenzkeils c_{Keil} relativ zum Kontrast zwischen dem laminaren und dem turbulenten Strömungsbereich in Rotorblattsegmenten ohne verfrühte Transition definiert. Ist die Intensität der Turbulenzkeilfläche identisch mit der des turbulenten Strömungsbereichs gilt $c_{\text{Keil}} = 100\%$. Turbulenzkeile mit geringerer Intensität, siehe Fall C in Abschnitt 2.6.2, haben ein $c_{\text{Keil}} < 100\%$. Ein Kontrast von $c_{\text{Keil}} = 0\%$ deutet darauf hin, dass der Turbulenzkeil nicht von der umgebenden laminaren Strömung zu unterscheiden ist. Typischerweise liegen die Werte für c_{Keil} in tatsächlichen thermografische Strömungsvisualisierungen zwischen 30% und 80%.

Abb. 5.2 (a)-(c) zeigt die gleiche simulierte Strömungsvisualisierung wie Abb. 5.1 mit drei verschiedenen relativen Kontrastwerten c_{Keil} der Turbulenzkeile von 75%, 50% bzw. 25%. Die final berechnete Transitionslinie der Methoden A und B sowie des Stand-der-Technik Methode sind in jeder Simulation gemeinsam mit der Referenz dargestellt. Für den höchsten Kontrast, vgl. Abb. 5.2 (a), sind die Methoden A und B des vorgestellten Lokalisierungsmethoden in der Lage, die Transitionslinie mit deutlich geringeren Abweichungen zu lokalisieren, als die Stand-der-Technik Methode, die nur einzelne Stellen der verfrühten Transitionslinie erfolgreich detektiert. Für einen Kontrast von $c_{\text{Keil}} = 50\%$ ist es unter Verwendung der eingeführten Methoden A und B möglich, den Turbulenzkeil zu detektieren, während die Stand-der-Technik Methode keine verfrühten Transitionen erkennt. Hier ist der Vorteil der neu eingeführten Methoden deutlich zu erkennen. Für den niedrigen Kontrast von nur 25% bleiben die verfrühten Transitionen in allen Auswertungen unerkannt und die Lokalisierung der Transitionslinie in Bereichen mit verfrühter Transition schlägt fehl.

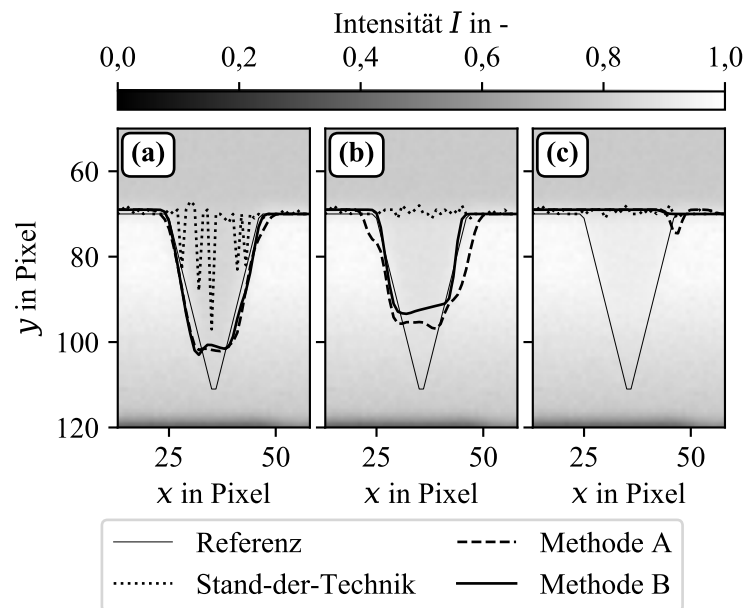


Abb. 5.2.: Simulierter Turbulenzkeil mit drei Stärken des relativen Kontrastes zum umgebenden laminaren Strömungsbereich von (a) $c_{\text{Keil}} = 75\%$, (b) $c_{\text{Keil}} = 50\%$ und (3) $c_{\text{Keil}} = 25\%$.

In Abb. 5.3 ist der euklidische Abstand zwischen den lokalisierten Transitionslinien und der Referenz in den Simulationen aus Abb. 5.2 für verschiedene relative Kontraste des Turbulenzkeils dargestellt. Der relative Kontrast zwischen dem Turbulenzkeil und dem umgebenden laminaren Strömungsbereich wird in 10 Schritten von vollständig turbulent (100%) zu vollständig laminar (0%) variiert. Der starke Anstieg der Messabweichung in Form des euklidischen Abstandes bei $c_{\text{Keil}} \approx 40\%$ bei Methode A und B lässt sich durch die Verwendung des Gradientenschwellwertes δt_{nat} der natürlichen Transition erklären.

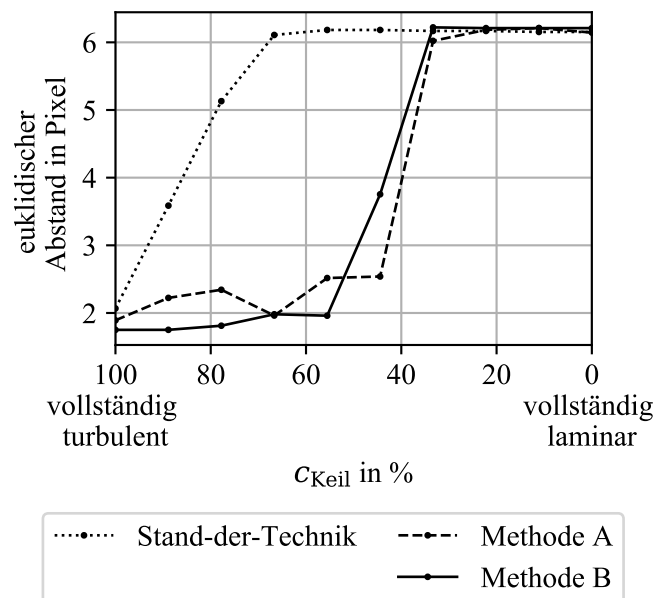


Abb. 5.3.: Abstand der lokalisierten laminar-turbulenten Transition zur Referenz in Abhängigkeit des relativen Kontrastes des Turbulenzkeils.

Ein geringer relativer Kontrast c_{Keil} senkt den lokalen Gradienten im Bereich der verfrühten Transition und erhöht den Gradienten im Bereich der natürlichen Transition, siehe Fall C eines schwachen Turbulenzkeils in Abschnitt 2.6.2. Übersteigt der Gradient der natürlichen Transition den Schwellwert, bleiben lokale Gradienten flussaufwärts unberücksichtigt und verfrühte Transitionen werden nicht erkannt. Der Kontrast c_{Keil} , unterhalb dem die verfrühten Transitionen unberücksichtigt bleiben, ist anhand der sprunghaften Zunahme der Messabweichung der lokalisierten Transitionslinie zu erkennen. Im Vergleich zur Stand-der-Technik Methode ist es für die beiden vorgestellten Verfahren möglich, einen Turbulenzkeil mit deutlich geringerem relativen Kontrast zu detektieren. Die Abweichung steigt bei Methode A und B erst ab einem Kontrast von $c_{\text{Keil}} \approx 50\%$ deutlich an, während die Stand-der-Technik Methode bereits bei $c_{\text{Keil}} \approx 70\%$ den Turbulenzkeil nicht mehr detektiert. Darüber hinaus ist bei ausreichend hohen Kontrasten ($70\% \leq c_{\text{Keil}} \leq 100\%$) der mittlere euklidische Abstand der Methoden A und B im Vergleich zur Stand-der-Technik Methode geringer.

Einfluss des Bildrauschens

Um den Einfluss des Bildrauschens unabhängig von dem vorhandenen Kontrast zwischen Turbulenzkeil und laminarer Strömung zu untersuchen, werden erneut Simulationsbilder gemäß dem vorherigen Abschnitt mit unterschiedlichen Rauschamplituden im Bild erzeugt und ausgewertet. Der relative Kontrast zwischen dem Turbulenzkeil und dem umgebenden laminaren Strömungsbereich wird als $c_{\text{Keil}} = 50\%$ gewählt und entspricht dem durchschnittlich auftretenden Kontrast, der im tatsächlichen thermografische Strömungsvisualisierungen analysiert wurde. Diese Untersuchung unterscheidet sich in sofern von der vorangegangenen, dass der Gradient an den Positionen der verfrühten Transitionen

In Abb. 5.4 sind drei Simulationsbilder mit jeweils einem Turbulenzkeil und der lokalisierten Transitionslinie dargestellt. Die relativen Rauschamplituden in den Bildern sind das (a) 0,3, (b) 1,0 und (c) 1,5-Fache des gemessenen Bildrauschens der tatsächlichen Referenzmessung. Mit zunehmender Rauschamplitude und geringerem CNR werden durch die Lokalisierungsmethoden lokale Gradientenmaxima detektiert, die aufgrund des Bildrausches auftreten und nicht die Transitionslinie repräsentieren. Infolgedessen vergrößert sich die Messabweichung der lokalisierten Transitionslinien mit sinkendem CNR.

In Abb. 5.5 ist die Messabweichung der drei Lokalisierungsmethoden in Abhängigkeit des CNR zwischen dem Turbulenzkeil und der umgebenden laminaren Strömung dargestellt. Die sinkenden CNR Werte ergeben sich hierbei aus einer ansteigenden Rauschamplitude. Der relative Kontrast ist für alle Auswertungen $c_{\text{Keil}} = 50\%$. Der mittlere euklidische Abstand der Stand-der-Technik Methode ist nur als Referenz dargestellt und sollte nicht im Vordergrund stehen, da das Verfahren bereits bei hohem CNR den Turbulenzkeil nicht erfolgreich lokalisiert. Der Verlauf der Abweichung der beiden eingeführten Methoden A und B nimmt mit reduziertem CNR zu, da das erhöhte Rauschen zu falsch erkannten verfrühten Transitionen führt. Die fett dargestellten Linien stellen die Mittelwert aus drei Versuchen mit jeweils neu generiertem Rauschen gleicher Amplitude da und verdeutlichen, dass die Abweichung für niedrige CNR eine hohe Streuung aufweisen.

Allgemein lässt sich aussagen, dass beide Methoden sich als robust gegenüber dem Bildrauschen erweisen, da der mittlere euklidische Abstand erst dann ansteigt, wenn das CNR einen Wert von 10 unterschreitet. Dies entspricht einer Rauschamplitude von 1,5-Fach der Referenzgröße in der realen Thermografieaufnahme. Durch die Verifikation anhand der Simulation konnte gezeigt werden, dass die eingeführten Lokalisierungsmethoden eine höhere Empfindlichkeit gegenüber geringen Kontrasten zwischen Turbulenzkeilen und der umgebenen laminaren Strömung aufweisen, als die Stand-der-Technik Methode mit der eindimensionalen Auswertung in Strömungsrichtung. Selbst bei einem relativen Kontrast von $> 90\%$ erreichen die Methoden eine um ca. $\frac{1}{3}$ gerin-

gere Abweichung der lokalisierten Transitionslinie und erkennen den Turbulenzkeil bis zu einem Kontrast von 40 % zuverlässig. Die minimale Abweichung bei einem Turbulenzkeil mit relativem Kontrast von 100 % lag bei ca. 2 Pixel, quantifiziert durch den euklidischen Abstand zwischen gemessener und Referenzposition der Transitionslinie. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass die Verfahren robust gegenüber dem Auftreten von Bildrauschen ist. Die Messabweichung verblieb selbst bei einem 1,5-Fachem Rauschen des in realen Messungen auftretendem Wert auf einem Minimalniveau von 2 Pixel.

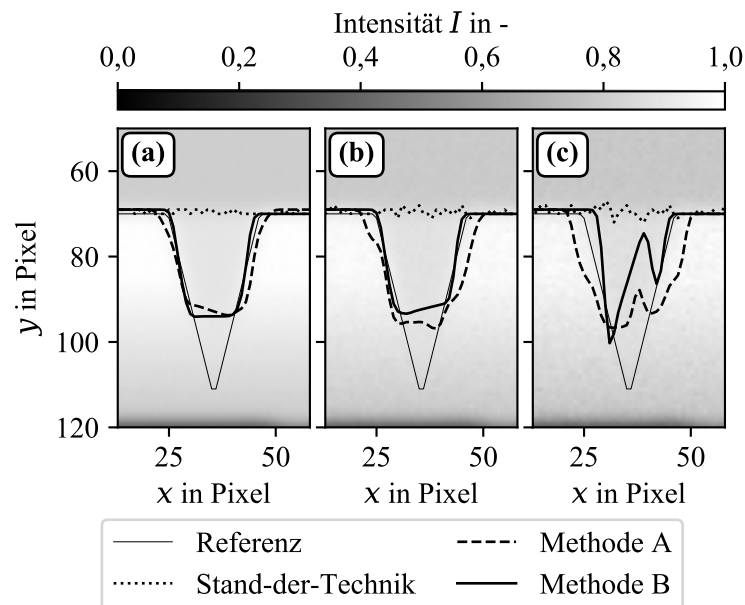


Abb. 5.4.: Simulierter Turbulenzkeil mit überlagertem Bildrauschen mit einer Amplitude von (a) 0,3, (b) 1 und (c) 1,5-Fachem des in tatsächlichen Messdaten auftretenden Rauschens.

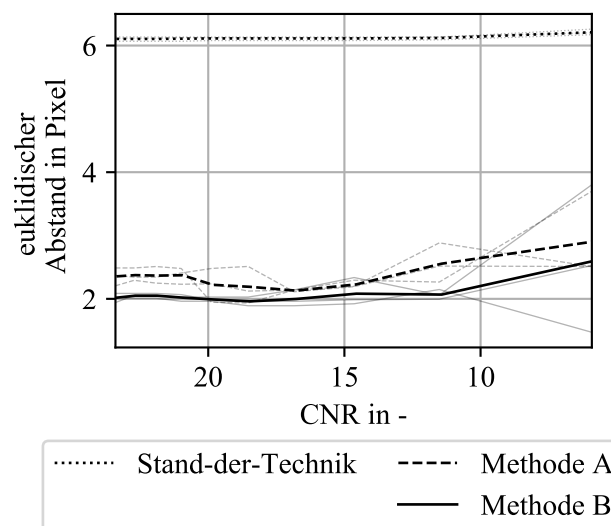


Abb. 5.5.: Abstand der lokalisierten laminar-turbulenten Transition zur Referenz in Abhängigkeit von dem Bildrauschen bzw. resultierendem CNR zwischen Turbulenzkeil und umgebendem laminarem Strömungsbereich.

Um das eingeführte Verfahren zur Lokalisierung der verfrühten Transitionen zu verifizieren, wurde eine simulierte Strömungsvisualisierung mit Turbulenzkeil erzeugt und beide Methoden der Lokalisierung angewandt. Die beiden Lokalisierungsmethoden A und B wurden hierbei mit der Stand-der-Technik Methode der eindimensionalen Auswertung, wie sie im vorherigen Kapitel Anwendung fand, verglichen. In der Simulation wurde der Kontrast des Turbulenzkeils verändert, um die Auswirkung auf die Lokalisierung zu untersuchen. Hierbei konnte nachgewiesen werden, dass die neuen Lokalisierungsverfahren deutlich robuster gegenüber einem sinkenden relativen Kontrast des Turbulenzkeils ist, indem die Abweichung bis zu einem relativen Kontrast von $c_{\text{Keil}} = 40\%$. Die eindimensionale Auswertung erkennt bereits einen Keil mit einer c_{Keil} von 70 nicht mehr. In einer zweiten Untersuchung wurde nicht der Kontrast, sondern das zufällige Bildrauschen in der Simulationsvisualisierung verändert. Hierbei konnte gezeigt werden, dass die Abweichung der Lokalisierung der verfrühten Transition erst ab dem 1,5-Fachen des in realen Messungen vorhandenen Bildrauschens ansteigt und das Niveau von 2 Pixel übersteigt.

5.2.2. Validierung

Nachfolgend wird eine reale thermografische Strömungsvisualisierung einer Rotorblattoberfläche einer sich in Betrieb befindlichen WEA ausgewertet. Aufgrund von Oberflächenstörungen existieren mehrere Turbulenzkeile innerhalb des laminaren Strömungsbereichs. Um die Transitionslinie inklusive verfrühter Transitionen an den Flanken der Turbulenzkeile zu lokalisieren, werden die eingeführten Methoden zur Lokalisierung angewandt und ausgewertet. Die lokalisierte Transitionslinie wird mit einer manuell ausgewerteten Referenz verglichen. Aus den lokalisierten Transitionslinien wird die LFR quantifiziert und ebenfalls mit der Referenz verglichen. Aus der Untersuchung des vorangegangenen Abschnittes ergibt sich eine Abhängigkeit der Abweichung bei der Lokalisierung und dem relativen Kontrast der Turbulenzkeile. Daher dient eine individuelle Betrachtung der Keile und die Fragestellung ihrer korrekten Detektion durch Lokalisierung der verfrühten Transitionen an ihren Flanken einer Beurteilung der Leistungsfähigkeit der eingeführten Verfahren.

In Abb. 5.6 (a) ist die thermografische Strömungsvisualisierung mit 14 einzelnen Turbulenzkeilen dargestellt. Die Turbulenzkeile weisen unterschiedliche Kontraste und Größen auf. Die Aufnahme wurde gemäß des experimentellen Aufbaus in Abschnitt 2.4.2 aufgenommen. Die Turbulenzkeile wurden durchnummeriert und der relative Kontrast c_{Keil} berechnet. Die Informationen jedes Turbulenzkeils sind vermerkt. In Abb. 5.6 (b)-(c) sind jeweils der in Abb. 5.6 (a) markierte Bildausschnitt des laminaren Strömungsbereichs mit den Ergebnissen der Lokalisierungsmethoden A und B dargestellt. In beiden Abbildungen sind die lokalisierten lokalen Gradientenmaxima der natürlichen Transition Δ_{nat} und der verfrühten Transition Δ_{verf} dargestellt.

Beide Methoden erkennen die natürliche Transitionslinie aufgrund des starken Temperaturgradienten in negativer y -Richtung erfolgreich. Die Lokalisierung der verfrühten Transitionen ist für die meisten Turbulenzkeile, mit Ausnahme von Turbulenzkeil Nr. 2, 8 und 9, erfolgreich, da ihr jeweiliger relativer Kontrast c_{Keil} unter dem notwendigen Schwellenwert von $c_{\text{Keil}} \approx 40\%$ liegt, vgl. Abschnitt 5.2.1. Die Spitzen der Turbulenzkeile werden jedoch wie zuvor in der Simulation nicht erfolgreich erkannt, da sie keine Temperaturgradienten mit der umgebenden laminaren Strömung aufweisen.

Wenn man sich auf den Turbulenzkeil Nr. 5 konzentriert, können die Methoden A und B direkt verglichen werden. Man beachte, dass Methode B mehr Gradienten in der Nähe der Spitze des Turbulenzkeils detektiert. Infolgedessen deckt die finale Transitionslinie einen größeren Bereich ab, siehe Abb. 5.6 (d).

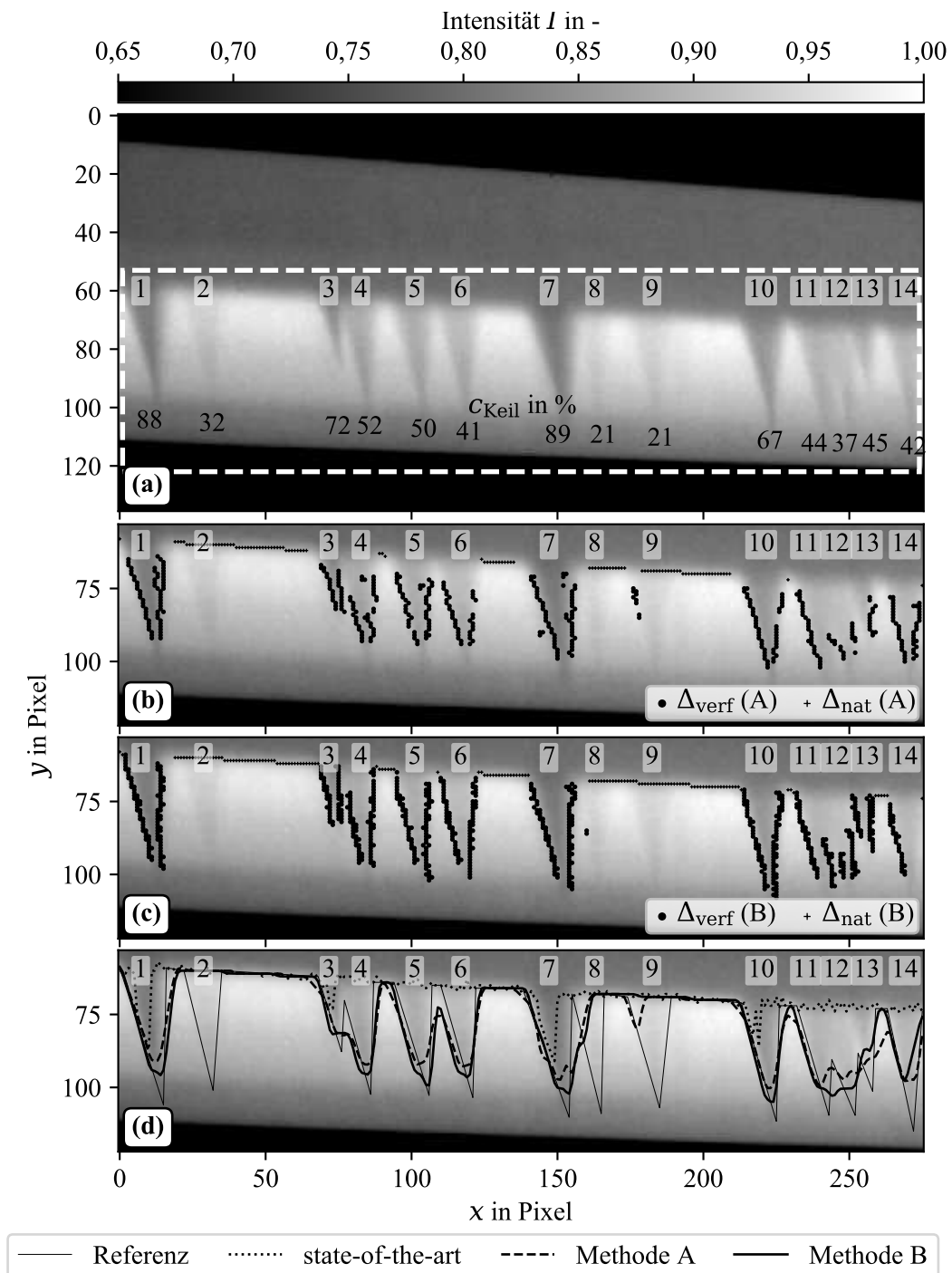


Abb. 5.6.: Thermografische Strömungsvisualisierung eines Rotorblattes an einer WEA in Betrieb. Die laminare und turbulente Strömung ist anhand der höheren, bzw. geringeren Intensität zu erkennen. Verschiedene keilförmige Bereiche turbulenter Strömung innerhalb des laminaren Strömungsbereichs deuten auf Oberflächenschäden oder Verunreinigungen im Bereich der Keilspitzen. (a) Nummerierung und Quantifizierung des jeweiligen relativen Kontrastes c_{Keil} . (b) - (c) Lokalisierte lokale Maxima des Intensitätsgradienten Δ_{nat} und Δ_{verf} der jeweiligen Auswertemethoden A und B. (d) Final detektierte Transitionslinie entlang des Rotorblattes: Manuell ausgewertet Referenz, Stand-der-Technik Auswertung des maximalen Gradienten in Strömungsrichtung, sowie die Ergebnisse der beiden eingeführten Auswertemethoden A und B. Die Abweichung der lokalisierten Transitionslinie von der Referenz und Stand-der-Technik Lösung ist durch Anwendung von Methode A und B deutlich minimiert. Kennzahl der LFR in Tab. 5.1.

Transitionslinie

Für einen direkten Vergleich zwischen der Stand-der-Technik Methode, den vorgestellten Methoden A und B, sowie der manuell bewerteten Transitionslinie als Referenz sind die final berechneten Transitionslinien der Lokalisierungsmethoden in Abb. 5.6 (d) dargestellt. Die Stand-der-Technik Methode ist nicht in der Lage, die meisten verfrühten Transitionen zu erkennen, was dazu führt, dass die meisten Turbulenzkeile nicht detektiert werden. Nur in den Bereichen der Turbulenzkeile Nr. 1, 3, 7 und 10 werden einige kleine Abschnitte der verfrühten Transitionslinie korrekt lokalisiert. Für die übrigen Bildspalten detektierte die Methode nur die natürliche Transitionslinie. Die eingeführten Methoden A und B erkennen hingegen alle 10 Turbulenzkeile oberhalb des kritischen relativen Kontrastes von $c_{\text{Keil}} = 40\%$. Für beide Methoden ist die Abweichung der lokalisierten Transitionslinie von der Referenz deutlich reduziert. Die eingeführten Methoden waren folglich in der Lage, die Transitionslinie mit reduzierter Messabweichung und höherer Sensitivität in Bezug auf das Auftreten von verfrühten Transitionen zu lokalisieren. Dieser Vorteil hat besonders bei kontrastarmen Turbulenzkeilen eine hervorgehobene Bedeutung, da die Stand-der-Technik Methode an diesen früh hohe Abweichungen aufweist.

Die Fähigkeit der vorgestellten Methoden beruht auf Annahmen über die Orientierung der verfrühten Transitionssegmente und dem Auftreten von Temperaturgradienten an den Positionen der verfrühten Transitionen. Die Orientierung der Liniensegmente an verfrühten Transitionen ist im gesamten Bild nahezu konstant und ermöglicht daher eine einfache Auswahl lokaler Gradientenmaxima auf der Grundlage ihrer Richtung. Das Vorhandensein eines ausreichend großen lokalen Gradientenmaximums kann dagegen stark mit dem Kontrast der Turbulenzkeile variieren. Insbesondere bei kontrastarmen Turbulenzkeilen ist die Wahl der Gradientenschwellen von größter Bedeutung. Sind die Gradienten zu niedrig, ist das Lokalisierungsverfahren nicht in der Lage, die verfrühten Transitionen zu detektieren, was sich anhand der nicht detektierten Spitzen der Turbulenzkeile zeigt. Daher müssen sich künftige Arbeiten auf alternative Verfahren zum Schließen der Keilspitzen konzentrieren, entweder durch eine modellbasierte Anpassung der Keilformen oder durch Extrapolation der erfolgreich erkannten Keilflanken.

Reduktion der laminaren Strömung

Die Quantifizierungen der Reduktion der laminaren Strömung (LFR) aufgrund von Oberflächenstörungen, vgl. Gleichung (2.36), in der thermografische Strömungsvisualisierung aus Abb. 5.6 sind in Tabelle 5.1 aufgeführt. Der Kennwert wird separat für die vorgestellten Lokalisierungsmethoden A und B und für die Stand-der-Technik Methode aufgelistet. Der Referenzwert $\overline{\text{LFR}}$ wurde anhand der visuell inspizierten und manuell ausgewerteten Transitionslinie berechnet und beträgt 24%. Dieser Wert bedeutet, dass der laminare Strömungsbereich in dem ausgewerteten Abschnitt der Rotorblattoberfläche aufgrund von Oberflächenstörungen und daraus resultierenden verfrühten Transitionen um ca. $\frac{1}{4}$ seiner Größe reduziert wurde.

Tab. 5.1.: Vergleich der Reduktion der laminaren Strömung $\overline{\text{LFR}}$ ausgewertet anhand der Stand-der-Technik und eingeführten Methoden A und B Ergebnisse in Abb. 5.6. Referenzwert aus der manuellen Inspektion.

Referenz	Stand-der-Technik	Methode	
		A	B
24 %	3 %	20 %	22 %

Es wurden zwei unterschiedliche Methoden eines neuen Verfahrens zur Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition eingeführt. Ziel war es dabei, eine höhere Empfindlichkeit und reduzierte Abweichung gegenüber der Lokalisierung von verfrühten Transitionen zu erreichen, wie sie in Freifeldanwendungen an Rotorblättern von WEA aufgrund von Oberflächenstörungen auftreten. Das Verfahren verfolgt einen multi-direktionalen Ansatz, um den lokalen Gradienten am Ort der laminar-turbulenten Transition zu maximieren. Methode A nutzt dafür eine zweidimensionale Kantenerkennung, während Methode B eine Rotation um definierte Winkel mit nachgestellter eindimensionaler Gradientenauswertung verfolgt. In einer simulierten Strömungsvisualisierung wurden die Methoden mit der eindimensionalen Lokalisierung des Standes der Technik verglichen, wobei eine geringere Abweichung bei der Lokalisierung von verfrühten Transitionen nachgewiesen werden konnte. Der euklidische Abstand zwischen der lokalisierten Transitionslinie und der Referenz beträgt in Methode A 2,2 Pixel und Methode B 2 Pixel. Die neuen Methoden erwiesen sich zudem als robuster gegenüber einem geringen Kontrast des Turbulenzkeiles und daraus resultierenden geringen lokalen Gradienten in den Bereichen der verfrühten Transition. Es konnten Turbulenzkeile mit einem relativen Kontrast zur umgebenden laminaren Strömung ab 40 % erfolgreich und mit minimaler Abweichung detektiert werden. Gegenüber Bildrauschen erwiesen sich beide Methoden ebenfalls robust bis zu einem Bildrauschen von 1,5-Fach dem Niveau in realen Messungen. Die Verfahren wurden an einer realen thermografischen Strömungsvisualisierung einer Freifeldanwendung validiert. Hierbei konnte die in der Simulation gesammelten Erkenntnisse bestätigt werden. Die Anzahl an detektierten Turbulenzkeilen konnte gegenüber der Stand-der-Technik Methode von 4 auf 10 von insgesamt 14 Keilen erhöht werden. Die daraus reduzierte Abweichung bei der Lokalisierung der Transitionslinie resultiert in eine geringere Abweichung bei der Quantifizierung der LFR. Beträgt die Abweichung der Stand-der-Technik Methode 21 Prozentpunkte, liegt sie bei Methode A und B bei nur 4 bzw. 2 Prozentpunkten. Die geringere Abweichung durch Methode B ergibt sich aus der geringeren Abweichung der Lokalisierung der verfrühten Transition an den Spitzen der Turbulenzkeile. Methode B weist gegenüber den sehr schwachen lokalen Gradienten eine minimal höhere Empfindlichkeit auf, weshalb die Spitzen der Turbulenzkeile durch Methode B zuverlässiger detektiert werden. Nachteil der Methode B ist jedoch, dass ein Vorwissen über die Rotationswinkel benötigt wird, während Methode A ohne diese auskommt. Beide Verfahren vereint darüber hinaus die Notwendigkeit von Schwellwerten, was eine Verwendung ohne Experten- oder Vorwissen erschwert.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Strömung in der oberflächennahen Grenzschicht auf Rotorblättern von sich in Betrieb befindlichen WEA hat einen entscheidenden Einfluss auf die aerodynamischen Eigenschaften und damit die Effizienz der gesamten Anlage. Um die real auftretende Grenzschichtströmung auf der Rotorblattoberfläche zu untersuchen, ist ein Messverfahren erforderlich, das in-Prozess fähig ist und die Strömung nicht beeinflusst. Zudem ist für eine Verwendung als regelmäßiges Inspektionswerkzeug ein Messsystem gefordert, das ohne Präparation oder Zerstörung der Oberfläche und über Messdistanzen von 100 m bis 300 m funktioniert. Ein geeignetes Verfahren, das alle Anforderungen erfüllt, ist die thermografische Strömungsvisualisierung. Anhand unterschiedlicher Oberflächentemperaturen kann speziell der laminare und turbulente Strömungsbereich in den Thermografieaufnahmen zur Visualisierung unterschieden werden. Dies ermöglicht eine Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition, die bei der Bewertung der aerodynamischen Effizienz des Rotorblattes eine hervorgehobene Rolle spielt. Oberflächenschäden und -verschmutzungen bewirken einen verfrühten Übergang von laminarer in eine turbulente Strömung. Die Reduktion des laminaren Oberflächenbereichs bewirkt eine Erhöhung des Luftwiderstandes und damit eine Verringerung der Effizienz der gesamten WEA. Ziel ist es daher, die Lage der laminar-turbulenten Transition mit minimaler Messabweichung zu bestimmen. Für die Untersuchung der real auftretenden Strömungszustände in der oberflächennahen Grenzschicht von Rotorblättern an WEA in Betrieb sind daher thermografische Strömungsvisualisierungen mit einer hohen Unterscheidbarkeit zwischen der laminaren und turbulenten Strömung erforderlich. Neben der globalen Unterscheidung sollen die Visualisierungen eine automatisierte Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition mit minimaler Abweichung von der wahren Position ermöglichen.

6.1. Ausgangslage

Voraussetzung für die Visualisierung der Grenzschichtströmung durch die thermografische Strömungsvisualisierung ist die initiale Temperaturdifferenz zwischen der Strömung und der Oberfläche. Der auf der Basis des Reibungskoeffizienten in der laminaren und turbulenten Strömung unterschiedlich hohe Wärmestrom zwischen Oberfläche und Fluid resultiert in verschiedenen Oberflächentemperaturen in Abhängigkeit von der Art der Strömung. Durch die Detektion der Wärmestrahlung mit einer Infrarotkamera werden Thermografieaufnahmen erzeugt, in denen die Strömungsbereiche anhand der Oberflächentemperatur voneinander unterschieden werden können. Die globale räumliche Verteilung der Temperaturbereiche kann somit als indirekte Strömungsvisualisierung interpretiert werden. Ein geeignetes Mittel, um Bereiche in einem Bild zu unterscheiden, ist das Kontrast-zu-Rausch Verhältnis (CNR), durch welches der absolute Kontrast zwischen den Bereichen mit dem in den Bereichen vorhandenen Rauschen ins Verhältnis gesetzt werden. Ob die Bildinformationen als Temperatur oder normierte Intensität interpretiert werden, spielt hierbei keine Rolle. Das Rauschen wird aus der Standardabweichung der Bildpunktintensitäten berechnet. Hierbei wird nicht unterschieden, ob es sich um zufällige Inhomogenitäten (Bildrauschen, räumliche Fluktuationen, etc.) oder systematische Inhomogenitäten (räumliche Gradienten) handelt. Da Ziel des Messverfahrens zur Visualisierung der Strömung ist eine Maximierung des CNR zwischen den Strömungsbereichen, indem die Intensitätsdifferenz maximiert und/oder die räumliche Standardabweichung minimiert wird.

Bei der Anwendung der thermografischen Strömungsvisualisierung in Windkanalexperimenten

finden eine Vielzahl an Methoden Anwendung, die Steigerung des CNR zu bewirken. Eine Möglichkeit besteht in der Optimierung der Abstrahlungseigenschaften der Oberfläche durch eine geeignete Wahl des Oberflächenmaterials. Ein weiteres oft verwendetes Vorgehen ist die Erhöhung der initialen Temperaturdifferenz in Form einer gezielten Erwärmung oder Abkühlung des Fluids bzw. der Oberfläche, um so den Wärmestrom und damit die Differenz der Oberflächentemperaturen zwischen den Strömungsbereichen zu erhöhen. In der Laborumgebung eines Windkanalexperiments können zudem thermografische Referenzaufnahmen der Oberfläche ohne Strömung durchgeführt werden, mit denen Artefakte und Oberflächenunterschiede aus den Messdaten herausgefiltert werden können. Bei der Anwendung der thermografischen Strömungsvisualisierung an sich in Betrieb befindlichen WEA sind eine Beeinflussung der Oberfläche, das Auftreten der Strömung und die Manipulation der initialen Temperaturdifferenz nicht oder nur schwer möglich. Speziell die Temperaturdifferenz zwischen Fluid und Oberfläche ist an realen WEA maßgeblich durch die Wettereinflüsse zum Zeitpunkt der Messung beeinflusst und entsteht durch die Heizleistung der Sonneneinstrahlung, die das Rotorblatt gegenüber der relativ kühlen Umgebungsluft erwärmt. Der Grad der Erwärmung hängt folglich von dem Sonnenstand, der Jahreszeit, der Bewölkung und der Ausrichtung der Oberfläche zur Sonne ab. Selbst bei idealen Bedingungen kann eine maximale Heizleistung für Norddeutschland von 560 W m^{-2} erwartet werden und liegt damit deutlich unter den empfohlenen Werten in der Literatur bei der Windkanalanwendung [Dol2018c, Jos2016, Lan2015, Sim2016]. Daraus resultiert ein geringer Kontrast zwischen der laminaren und turbulenten Strömung von unter einem Kelvin, während in einem Windkanalexperimente ein Kontrast von mehreren Kelvin angestrebt wird. Eine weitere Methode den Kontrast auch in Freifeldanwendungen zu erhöhen liegt in der Wahl des Infrarotsystems bzw. des für die Anwendung optimalen Wellenlängenbereichs, indem die Wärmestrahlung detektiert wird. Welche Auswirkung dies auf das zu erreichende CNR bei der thermografischen Strömungsvisualisierung an sich in Betrieb befindlichen WEA hat, wurde bisher nicht untersucht. Ohne die meisten genannten Möglichkeiten zur Steigerung des CNR zum Zeitpunkt der Bildaufnahme, leitet sich ein hoher Bedarf an die Weiterentwicklung der nachgestellten Bildverarbeitung ab.

Ein klassisches Bildverarbeitungsverfahren zur Steigerung des CNR und häufig in Windkanalexperimenten Anwendung finden, ist die zeitliche Mittelwertbildung einer Bildserie der statischen Grenzschichtströmung. Durch die Mittelung wird das Bildrauschen reduziert und somit das CNR gesteigert. Eine hohe räumliche Standardabweichung aufgrund von räumlichen systematischen Gradienten innerhalb der Bildbereiche verbleiben jedoch, was eine Grenze der CNR-Steigerung darstellt. Eine Auswertung der zeitlichen Fluktuationen durch eine Berechnung der zeitlichen Standardabweichung oder Fourier-Analyse ermöglichen unter Umständen eine Steigerung des CNR, berücksichtigen aber nicht unterschiedliche Frequenzen der Fluktuationen oder benötigen Vorwissen über die auszufilternde harmonische Basis. Was die angewandten Bildverarbeitungsverfahren eint ist die Auswertung einer Bildserie gegenüber der Einzelbildauswertung. Während die Aufnahme einer Bildserie im Windkanalexperiment aufgrund des stationären Messobjekts und Messsystems keine herausragende Schwierigkeit darstellt, muss in der Freifeldanwendung an WEA ein zusätzlicher Aufwand für die geeignete Triggerung des Infrarotsystems betrieben werden, da sich das Messobjekt in ständiger Bewegung befindet. Eine Beurteilung, welche Steigerung des CNR durch die Auswertung von Bildserien gegenüber der Einzelbildauswertung bei der thermografischen Strömungsvisualisierung an sich in Betrieb befindlichen WEA bewirkt, wurde bisher nicht untersucht. Ebenfalls ununtersucht ist das Potential erweiterter Bildverarbeitungsmethoden der Merkmalsextraktion, um neue sogenannte Merkmalsbilder zu erzeugen, die als Strömungsvisualisierung interpretiert werden können und ein erhöhtes CNR zwischen der laminaren und turbulenten Strömung aufweisen.

Eine wichtige Messaufgabe in den Strömungsvisualisierungen ist die lokale Verortung des Überganges von laminarer zu turbulenter Strömung (laminar-turbulente Transition). Die Position der laminar-turbulenten Transition bzw. der sich entlang des Rotorblattes ausprägenden Transitions-

linie hat einen entscheidenden Einfluss auf den aerodynamischen Auftrieb und Widerstand und damit die gesamte Effizienz der WEA. Daher wird eine Lokalisierung der Transitionslinie in den Strömungsvisualisierungen mit minimaler Abweichung angestrebt. Das am meisten verbreitet Verfahren ist hierbei die Lokalisierung des maximalen Temperaturgradienten in Strömungsrichtung, der sich an der Trennlinie zwischen den Strömungsbereichen ausprägt. Eine Subpixelauflösung der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition an WEA in Betrieb konnte durch Verwendung von Approximationsmodellen erreicht werden. Hierfür wird eine heuristische Modellvorstellung verwendet, die zwei Bereiche unterschiedlicher Intensität voneinander abtrennt. Für die Approximation der Intensität wird die Verwendung der Verteilungsfunktion der Normalverteilung bzw. für den Intensitätsgradienten die Dichtefunktion der Normalverteilung vorgeschlagen. Unter der Anwendung der Approximationsmodelle konnte bei einem Messabstand von 180 m die Lokalisierung mit einer Unsicherheit von 0,17% der Sehnenlänge nachgewiesen werden [Dol2018b]. Die zufällige Abweichung des Lokalisierungsverfahrens verhält sich dabei reziprok zum CNR zwischen der laminaren und turbulenten Strömung aufgrund von Abweichungen zwischen dem Intensitätsverlauf entlang der Auswertelinie und der verwendeten Modellfunktion. Die in der Literatur durchgeführten Untersuchungen stützen sich dabei lediglich auf die zufällige Abweichungen aufgrund des Rauschens in der Visualisierung. Der Einfluss von systematischen Inhomogenitäten im Intensitätsverlauf und die Auswirkung auf eine daraus resultierende systematische Abweichung der Lokalisierung wurde bisher nicht untersucht. Relevant für eine geringe Abweichung bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition ist daher eine Bildverarbeitung, die Strömungsvisualisierungen erzeugt, in denen zufällige und systematische Inhomogenitäten reduziert sind und damit eine Lokalisierung mit niedriger zufälliger und systematischer Abweichung ermöglicht.

Die im Stand der Technik vorgeschlagenen Verfahren der Lokalisierung werden aus der Windkanalanwendung motiviert und sind dafür ausgelegt, die natürlich Transitionslinie quer zur Strömungsrichtung zu lokalisieren, die auftritt, sofern keine Oberflächenstörungen vorliegen. An realen Rotorblättern von sich in Betrieb befindlichen WEA bewirken Schäden und Kontaminationen jedoch eine Oberflächenveränderung, die eine verfrühte Transition auslösen kann. Hinter der Störstelle prägt sich ein Turbulenzkeil aus, dessen Fläche ohne Oberflächenstörung laminar wäre. Durch eine Lokalisierung der verfrühten Transitionen mit geringer Abweichung besteht die Möglichkeit, die Reduzierung der laminaren Strömung (LFR) zu quantifizieren, da dies einen direkten Einfluss auf den Effizienzverlust der WEA aufgrund von Oberflächenstörungen und einer erhöhten turbulenten Grenzschichtströmung hat. Im Bereich des Turbulenzkeils verläuft die Transitionslinie jedoch nicht orthogonal zur Strömungsrichtung und damit Auswerterichtung der zuvor angesprochenen Lokalisierungsverfahren. Als Konsequenz daraus ist der lokale Gradient an der Stelle der Transition verringert, was eine Steigerung der Lokalisierungsabweichung zur Folge hat oder dafür sorgt, dass verfrühte Transitionen nicht detektiert werden. Es besteht daher der Bedarf eines Lokalisierungsverfahren der verfrühten laminar-turbulenten Transition mit minimaler Abweichung für die Anwendung an WEA in Betrieb.

6.2. Wissenschaftlicher Fortschritt

In diese Arbeit wurde das Messsystem der thermografischen Strömungsvisualisierung an sich in Betrieb befindlichen WEA erweitert, um die globale Unterscheidbarkeit der laminaren und turbulenten Strömung in Strömungsvisualisierungen zu steigern und die Abweichung bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition zu reduzieren.

Bildaufnahme

Im Bereich der Bildaufnahme wurde der Einfluss des Wellenlängenspektrum der zu detektierenden Wärmestrahlung durch die Infrarotkamera untersucht. Es wurden zwei Infrarotkamerasysteme

verglichen, die jeweils im mittelwelligen ($1,5\ \mu\text{m} - 5,7\ \mu\text{m}$) und langwelligen ($7,7\ \mu\text{m} - 10,27\ \mu\text{m}$) Infrarotspektrum sensitiv sind. Innerhalb des für die thermografische Strömungsvisualisierung relevanten Temperaturbereichs von $0\ ^\circ\text{C} - 40\ ^\circ\text{C}$ werden durch die langwellige Infrarotkamera um den Faktor 11 mehr Photonen detektiert. Bei einer Integrationszeit von nur ca. $\frac{1}{3}$ wird immer noch eine 2,7-Fache höhere Anzahl an Photonen detektiert, als bei der mittelwelligen Infrarotkamera. Hieraus ergibt sich eine höher Signalstärke und verringerter Bewegungsunschärfe, durch die der abgebildete Transitionsbereich verkürzt und Abtrennung der Strömungsbereiche schärfer dargestellt wird. Weitere Vorteile des langwelligen Infrarotspektrums sind eine um den Faktor 8 höhere Differenz der abgestrahlten Leistung bei gegebener Temperaturdifferenz der Oberfläche, eine um den Faktor 0,12 geringerer Quereinfluss durch reflektierte Sonnenstrahlung sowie ein niedrigerer Verlust durch die Wegstrecke aufgrund eines höheren Transmissionsgrads der Luft. Aus der höheren Signalstärke und gleichzeitig nicht proportional ansteigendem Rauschen der untersuchten Kamerasysteme ergab sich eine Steigerung des SNR der Temperaturmessung um bis zu 25 %. Die direkte Auswirkung auf die thermografische Strömungsvisualisierung in einer Freifeldanwendung sind eine Verdoppelung des CNR von 3,8 auf 7,6 zwischen der laminaren und turbulenten Strömung. In Messsituationen in denen ein geringer Kontrast zwischen den Strömungsbereichen existiert, kann die Wahl des Wellenlängenspektrum folglich eine signifikante Steigerung des CNR bewirken.

Für Bildverarbeitungsmethoden, die zeitliche Fluktuationen auswertet, sind Bildserien erforderlich. Für die Aufnahme von Bildserien bei der Freifeldanwendung am drehenden Rotor einer WEA wurde daher ein optisches Messsystem entwickelt, welches die Drehbewegung des Rotors erkennt und in Echtzeit auswertet. Das System erzeugt bei immer gleicher Winkelposition eines Rotorblattes ein Triggersignal für das Infrarotkamerasystem. Die verbleibende Lageabweichungen der abgebildeten Rotorblattoberflächen zwischen den Einzelaufnahmen der so aufgenommenen Bildserie wird in der Nachverarbeitung durch Anwendung eines ECC Algorithmus minimiert und konnte im Endergebnis auf 0,2 Pixel quantifiziert werden. Somit wird eine Auswertung von einzelnen Bildpunkten entlang der zeitlichen Achse ermöglicht, die für eine erweiterte Bildverarbeitung genutzt werden kann.

Strömungsvisualisierung

Um den Einfluss von zufälligen und systematischen Inhomogenitäten in den Bildbereichen bzw. Strömungsbereichen auf das CNR zu differenzieren und ihre Auswirkung auf die Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition getrennt beurteilen zu können, wurden zwei Kenngrößen der Unterscheidbarkeit eingeführt. Analog zum CNR beschreiben sie das Verhältnis der absoluten Differenz der mittleren Intensitäten und der räumlichen Standardabweichung in den zu vergleichenden Bildbereichen. Die in die Kennzahl D_{sys} einfließende räumliche Standardabweichung beschreibt dabei nur die systematischen Gradienten und D_{rand} nur die zufälligen Fluktuationen. Die Kennzahlen beschreiben damit im Gegensatz zum CNR getrennt voneinander die Unterscheidbarkeit (engl.: distinguishability) von Bildbereichen, in denen entweder systematischen Gradienten oder zufällige Fluktuationen dem absoluten Kontrast entgegen wirken. Eine Unterteilung in die beiden Kenngrößen ermöglicht einen detaillierteren Vergleich verschiedener Strömungsvisualisierungen.

Um das Potential von erweiterten Bildverarbeitungsverfahren zur Auswertung von Bildserien und der Erzeugung von Strömungsvisualisierungen mit erhöhtem CNR zu untersuchen, wurden vier Bildverarbeitungsverfahren eingeführt und an realen Messungen getestet. Als Referenz dienen zwei klassische Methoden, die unmittelbar in Betracht gezogen werden sollten, sobald die Bildverarbeitung über eine Einzelbildauswertung hinaus geht: Die zeitlichen Mittelwertbildung (MW) und die Auswertung der zeitlichen Standardabweichung (STA). Darüber hinaus wurden zwei erweiterte Bildverarbeitungsmethoden der Merkmalsextraktion, die nicht-negative Matrixfaktorisierung (NNMF) und die Hauptkomponentenanalyse (PCA) eingeführt. Untersucht wurde die

Fragestellung, wie das Potential der Mittelwertbildung Bildrauschen zu reduzieren, das Potential der zeitlichen Standardabweichung systematische Gradienten zu reduzieren und das Potential der Merkmalsextraktionsverfahren Merkmale zu extrahieren genutzt werden kann, um Strömungsvisualisierungen mit einem gesteigerten CNR im Vergleich zu den Rohaufnahmen zu erzeugen.

Die Bildverarbeitungsverfahren wurden zunächst in einem Windkanalexperiment angewandt. An einem bekannten Zylindermessobjekt mit bekannter Verteilung der Grenzschichtströmung konnte grundsätzlich validiert werden, dass alle Verfahren Bilder erzeugen, die als Strömungsvisualisierung interpretiert werden können. Es konnte gezeigt werden, dass die Standardabweichung, NNMF und PCA ein konstant überlagertes Reflexionsartefakt herauszufiltern und dadurch systematische Gradienten in den Strömungsbereichen reduziert wurden, was durch ein verdoppeltes D_{syst} quantifiziert werden konnte. Das Resultat ist eine Steigerung des CNR um 35 % gegenüber der Einzelaufnahme. Ohne die Berücksichtigung der Reflexion der Kameralinse, konnte keine Steigerung des CNR gegenüber dem Rohbild oder der MW Visualisierung erreicht werden. Grund hierfür ist ein bereits initial hohes CNR in den Einzelaufnahmen durch eine aktive Erwärmung der Strömung zum Zeitpunkt der Messdatenaufnahme. Zwei weitere Experimente im Windkanal wurden an einem DU96W180-Tragflächenprofil mit unterschiedlichem CNR in den Rohaufnahmen durchgeführt. Für die Messung mit einem hohen CNR von 1,89 konnte nur eine geringfügige Steigerung des CNR von 50 % erreicht werden. Diese Steigerung ist erneut auf eine Reduzierung der systematischen Gradienten und damit Steigerung von D_{syst} um ebenfalls 50 % zu erklären. Bei der Auswertung am gleichen Messobjekt aber mit einem sehr geringen CNR von nur 0,13 zwischen der laminaren und turbulenten Strömung und einem absoluten Kontrast von weniger als 0,2K konnte der größte Vorteil der Merkmalsextraktionsverfahren dargestellt werden. Weder die Mittelwertbildung, noch die Standardabweichung sind in der Lage, das CNR zwischen den Strömungsbereichen signifikant zu erhöhen. In der MW Visualisierung verbleiben systematische Gradienten und in der STA Visualisierung existierte kein absoluter Kontrast zwischen den Strömungsbereichen. Die erweiterten Bildverarbeitungsverfahren erreichen hingegen in den Strömungsbereichen eine deutliche Homogenisierung und Reduzierung von systematischen Gradienten und zufälligem Rauschen gegenüber dem verbleibendem absoluter Kontrast zwischen den Strömungsbereichen. Das D_{syst} ist gegenüber der MW Visualisierung um über eine Größenordnung höher. Selbst D_{rand} ist im Vergleich zur MW Visualisierung 70 % erhöht. Es resultiert eine Steigerung des CNR um eine Größenordnung von 0,2 auf ca. 2 gegenüber dem MW. Die erweiterten Bildverarbeitungsmethoden ermöglichen also bei der Auswertung von thermografischen Rohdaten mit niedrigem CNR die Erzeugung von Strömungsvisualisierungen, in denen das CNR um über eine Größenordnung gesteigert ist. Als Hauptursache wurde die Reduzierung von systematischen Gradienten, also eine Homogenisierung der Strömungsbereiche identifiziert.

Um die Eignung der vorgestellten Methoden für die Anwendung an einer WEA in Betrieb darzustellen, wurden die Verfahren an Freifeldmessungen angewandt. Aufgrund einer geringen Sonneneinstrahlung ist das CNR zwischen den Strömungsbereichen sehr gering und eine Unterscheidung der Strömungsbereiche nicht möglich. Grund hierfür sind erneut systematische Gradienten in den Strömungsbereichen und ein daraus resultierendes niedriges D_{syst} . Das D_{rand} bereits in der Einzelaufnahme hoch ist, bewirkt die Mittelwertbildung kaum eine Steigerung des CNR. In der STA Visualisierung konnte D_{syst} nur minimal um ca. 27 % erhöht werden. Auch in der Freifeldmessung wurde durch die Anwendung der Merkmalsextraktionsverfahren Strömungsvisualisierungen erzeugt, bei denen systematische Gradienten und Bildrauschen gegenüber des absoluten Kontrastes zwischen den Strömungsbereichen reduziert sind und in eine Verdopplung des CNR von 2,26 auf ca. 5 resultieren. D_{syst} konnte hierbei um einen Faktor 2 bis 3 erhöht werden. In einer zweiten Freifeldanwendung werden Strömungsvisualisierungen ausgewertet, in denen eine Unterscheidbarkeit der laminaren und turbulenten Strömung in den Rohaufnahmen möglich war. Das CNR konnte auch hier gegenüber der MW und STA Visualisierung ebenfalls von ca. 3 auf 6 verdoppelt werden. Auch bei der Auswertung von thermografischen Strömungsvisualisierungen

an sich in Betrieb befindlichen WEA besitzen die erweiterten Bildverarbeitungsmethoden das Potential Strömungsvisualisierungen mit deutlich gesteigertem CNR zwischen der laminaren und turbulenten Strömung zu erzeugen, wenn die klassischen Verfahren keine signifikante Steigerung bewirken.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die erweiterten Bildverarbeitungsmethoden der Merkmalsextraktion in der Lage sind, in Strömungsvisualisierungen mit geringem CNR und Inhomogenitäten in den Strömungsbereichen Merkmale zu extrahieren und Visualisierungen zu erzeugen, in denen das CNR höher als in den Rohbildern oder Ergebnissen der klassischen Bildverarbeitungsverfahren ist. Besonders die Reduzierung von systematischen Gradienten gegenüber dem vorhandene absoluten Kontrast konnte als Kernergebnis ermittelt werden.

Eine klare Aussage, ob die NNMF oder die PCA zu bevorzugen ist, lässt sich mit den vorliegenden Messdaten nicht abschließende treffen, da die maximale Steigung des CNR und D_{sys} nicht immer aus dem gleichen Verfahren resultierte. Die Ergebnisse der gesteigerten globalen Unterscheidbarkeit der Strömungsbereiche und damit auch Vorteil gegenüber den klassischen Auswertungen liegen für beide Verfahren in der gleichen Größenordnung. Eine Nachteil bei der Anwendung der Merkmalsextraktionen ist jedoch die Auswahl des optimalen Visualisierungsergebnisses, indem das höchste CNR zu verzeichnen ist. Hierfür ist Vorwissen über die grobe Verteilung der Strömungsbereiche erforderlich. Ein weiterer Nachteil der NNMF liegt darin, dass es sich um ein nicht-deterministisches Verfahren handelt und nicht sichergestellt werden kann, dass ein optimales Ergebnis erreicht wird. Ein erhöhter Rechenaufwand für wiederholte Auswertungen stellt einen deutlichen Nachteil gegenüber der PCA dar, insbesondere im Hinblick auf ein automatisiertes Verfahren für regelmäßige Inspektionsarbeiten an WEA in Betrieb. Des Weiteren gilt zu beachten, dass beide Verfahren sehr empfindlich bezüglich Bildbereiche sind, in denen keine Strömung zu sehen ist, da diese ebenfalls als Merkmale extrahiert werden könnten. Dadurch können Merkmale, die eine Unterscheidung der Strömungsbereiche ermöglichen in den Ergebnisbildern deutlich schwächer ausgeprägt sein. Ein deutlich geringerer Rechenaufwand und eine geringere Querempfindlichkeit gegenüber nicht ideal ausgeschnittenen Oberflächenbereichen qualifiziert die Mittelwertbildung als eine gute erste Methode der Auswertung, um den auszuwertenden Oberflächenbereich und die grobe Verteilung der Strömungsbereiche zu ermitteln und damit einer Auswertung durch die erweiterten Bildverarbeitungsverfahren voraus zu gehen.

Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition

Um die Auswirkung von zufälligen und systematischen Inhomogenitäten in den Strömungsbereichen der Strömungsvisualisierungen auf die Abweichung bei der Lokalisierung der natürlichen laminar-turbulenten Transition zu untersuchen, wurden simulierte thermografische Strömungsvisualisierungen erzeugt. Die Strömungsbereiche wurden getrennt voneinander mit Bildrauschen und systematischen Gradienten überlagert und die Abweichung der Lokalisierung durch die Approximation der Intensitäts bzw. des Intensitätsgradienten mit einer Verteilungsfunktion der Normalverteilung bzw. einer Dichtefunktion der Normalverteilung, quantifiziert. Durch die Ergebnisse der Simulation konnte dargestellt werden, dass die eingeführten Kennzahlen zur Unterscheidbarkeit den jeweiligen Einfluss auf das CNR gut differenziert. Zudem konnte gezeigt werden, dass zufällige Inhomogenitäten einen direkten Einfluss auf die zufällige Abweichung und die systematischen Gradienten in den Bildbereichen einen direkten Einfluss auf die systematische Abweichung der Lokalisierung haben. Bei auftretenden systematischen Gradienten, die eine Abweichung des Intensitätsverlaufs bzw. Intensitätsgradienten von den verwendeten Modellfunktionen zur Folge haben, konnte ermittelt werden, dass die Lokalisierung durch die Approximation des Gradienten deutlich robuster ist und in geringen systematischen Abweichungen bei der Lokalisierung resultiert, als die Approximation der Intensität. Um die Auswirkung von systematischen Gradienten in den Bildbereichen auf die Messabweichung zu reduzieren, wurde das Lokalisierungsverfahren um

einen zweifache Iteration erweitert. Im zweiten Iterationsschritt wird die Approximation erneut in einem kleineren Bereich der Intensität bzw. des Intensitätsgradienten durchgeführt. Somit konnte die Abweichungen zu den verwendeten Approximationsmodellen und damit die resultierende Messabweichung der Lokalisierung reduziert werden. Aus den Simulationen folgt, dass eine minimale zufällig Abweichung bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition erreicht wird, indem D_{rand} und D_{sys} maximiert und die Approximation der Intensität als Lokalisierungsverfahren gewählt wird. Eine minimale systematische Abweichung wird hingegen erreicht, indem D_{sys} maximiert und die Approximation des Intensitätsgradienten angewandt wird. Dadurch wurden die Erkenntnisse über eine minimale Messunsicherheit bei der thermografischen Strömungsvisualisierung durch eine Approximation des Temperaturverlaufs gemäß der Literatur bestätigt. Jedoch wurden zuvor unberücksichtigte systematische Abweichungen bei der Lokalisierung betrachtet und der direkte Zusammenhang mit D_{sys} dargestellt. Die Erweiterung der Lokalisierung mit eingegrenztem Approximationsbereich konnte für geringen D_{sys} die systematische Abweichung der Lokalisierung bereits um 90 % verringern und damit den Nachteil, der bei der Approximation der Intensität in einem Verlauf mit hohen systematischen Gradienten auftritt, reduzieren.

In dem Windkanalexperiment mit einer Visualisierung mit sehr niedrigem CNR resultiert die Steigerung von D_{sys} in eine reduzierten systematischen Abweichung der Lokalisierung um eine bzw. zwei Größenordnungen bei der Approximation der Intensität bzw. des Intensitätsgradienten. Sie beträgt im vorliegenden Fall 0,1 % der Sehnenlänge und liegt damit in der Größenordnung von vergleichbaren Messsystemen wie der Oberflächendruckmessung, bei der aufgrund der diskreten Verteilung von angenommenen 100 Sensoren eine Unsicherheit von 1 % der Sehnenlänge zu erwarten ist. Die zufälligen Abweichung konnte hingegen von ca. 0,5 % der Sehnenlänge in der MW Visualisierung in der PCA Visualisierung mit ca. 0,25 % der Sehnenlänge halbiert werden. Die Verfahren reduzieren D_{sys} so weit, dass für eine minimale systematische Abweichung die Approximation der Intensität verwendet werden kann. Als Vergleich resultieren besonders die systematischen Gradienten in der MW Visualisierung in eine hohe systematische Abweichung bei der Lokalisierung durch die Approximation der Intensität.

In der Auswertung des Freifeldexperiments konnten die laminare und turbulente Strömung aufgrund eines geringen CNR nicht voneinander unterschieden werden. Eine Lokalisierung der Transition ist auch in der MW und STA Visualisierung nicht möglich gewesen. Ein deutlicher Anstieg von D_{sys} und D_{rand} in den Strömungsvisualisierungen der NNMF und PCA ermöglichten hingegen eine Lokalisierung. Aufgrund der nicht bekannten Lage der laminar-turbulenten Transition mangels Referenzmessung sind die berechneten Abweichungen mit Vorsicht zu bewerten. Die systematische Abweichungen wird jedoch in beiden Fällen und für beide Lokalisierungsverfahren auf $< 2,2\%$ der Profilhnenlänge geschätzt. Die zufällige Abweichung beträgt in der PCA Visualisierung weniger als $< 0,6\%$ der Profilhnenlänge.

In Messreihen mit hohem initialen CNR konnte die zufällige und systematische Abweichung bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition nicht signifikant reduziert werden. In Messungen mit niedrigem CNR in den Rohdaten hat die Reduzierung von systematischen Gradienten zur Folge, dass sich die Abweichung zwischen Intensitätsverlauf und Approximationskurve verringert und somit die systematische Abweichung der Lokalisierung reduziert wurde. Die zufällige Abweichung konnte durch die Anwendung der erweiterten Bildverarbeitungsmethoden jedoch nicht das niedrige Niveau erreichen, dass in der Literatur für Messdaten mit initial hohem CNR erreicht wird. Bei Messungen mit sehr geringem CNR in den Einzelaufnahmen ermöglichen die erweiterten Bildverarbeitungsmethoden jedoch eine Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition mit den vorgestellten Approximationsfunktionen, wenn sie in den Rohdaten nicht möglich ist. Damit stellen die Methoden eine Möglichkeit dar, thermografische Strömungsvisualisierungen auszuwerten, die aufgrund der Messbedingungen ein niedriges CNR haben und eine Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition durch die verwendeten Lokalisierungsverfahren nicht möglich ist. Eine klare Aussage, ob die NNMF oder die PCA für eine minimale Abweichung zu bevorzugen

ist, lässt sich mit den vorliegenden Messdaten nicht abschließende treffen, da die Ergebnisse in der gleichen Größenordnung liegen. Eine klare Aussage über das zu bevorzugende Approximationsverfahren lässt sich ebenfalls nicht aus den vorliegenden Messdaten ableiten. Sowohl die geringere zufällige Abweichung durch Approximation der Intensität, als auch die geringere systematische Abweichung durch die Approximation des Intensitätsgradienten, wie es aus der Simulation resultiert, konnten in den Messdaten nicht allgemeingültig bestätigt werden. Ein klares Ergebnis konform mit der Simulationsuntersuchung ist jedoch, dass beide Abweichungen minimiert werden, wenn zufällige und systematische Inhomogenitäten in den Strömungsbereichen durch geeignete Bildverarbeitungsverfahren reduziert werden. Wird ein hohes D_{syst} und D_{rand} erreicht, treffen die zuvor genannten Präferenzen der beiden Approximationsverfahren bei nur einer Auswertung vollständig zu. In anderen Auswertungen von Visualisierungen mit hohem D_{syst} und D_{rand} liegen die erreichten Abweichungen der Lokalisierung jedoch nur um max. 0,02 % der Sehnenlänge über bzw. unter dem Approximationsverfahren, dass als ideal vermutet wurde. Die Steigerung von D_{syst} und D_{rand} ermöglicht also eine höhere Freiheit bei der Wahl des Approximationsverfahrens mit dem Ziel einer Minimierung der Abweichungen bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition.

Das bisher verwendeten Verfahren zur Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition in einem Temperatur- bzw. Intensitätsverlauf beschränken sich auf die eindimensionale Auswertung entlang der Strömungsrichtung und ist für die Lokalisierung der natürlichen Transitionslinie quer zu Strömungsrichtung ausgelegt. Um die Abweichung der Lokalisierung in Bereichen mit verfrühten Transitionen entlang den Flanken von Turbulenzkeilen zu reduzieren, wurden zwei neue Lokalisierungsmethoden eingeführt, die auf einer zweidimensionalen Kantenerkennung bzw. auf eine Bildrotation mit nachfolgender eindimensionaler Gradientenauswertung basieren. Durch beide Methoden werden verfrühte Transitionen mit erhöhter Empfindlichkeit lokalisiert, da die lokalen Gradienten maximiert werden. In Simulationen konnte eine höhere Empfindlichkeit nachgewiesen werden, indem beide Methoden im Vergleich zur Stand-der-Technik Methode die verfrühten Transitionen an einem Turbulenzkeil mit relativen Kontrast von nur 40 %, anstatt $> 90\%$ detektierten und dabei die gleiche Abweichung, gemessen an dem euklidischen Abstand zwischen lokalisierter und Referenz-Transitionslinie von 2 Pixel erreichten. Gegenüber Rauschen stellten sich die neu eingeführten Methoden zur Lokalisierung der verfrühten Transition ebenfalls als robuster und verzeichneten erst ab dem 1,5-Fachen der Rauschamplitude aus echten Messdaten einen Anstieg der Lokierungsabweichung. Anhand einer realen thermografischen Strömungsvisualisierung konnte nachgewiesen werden, dass die neu eingeführten Lokalisierungsmethoden die verfrühten Transitionen zuverlässiger und mit geringerer Abweichung lokalisieren konnten. Von insgesamt 14 vorhandenen Turbulenzkeilen konnten von der Stand-der-Technik Methode nur 4 und durch die neuen Methoden alle 10 Keile, die über dem minimalen relativen Kontrast von 40 % liegen, detektiert werden. Die Abweichung gegenüber einer manuellen Referenz wurde damit um einen Faktor 3 verbessert. Daraus resultiert eine Reduzierung der Abweichung bei der Quantifizierung der Reduktion der laminaren Strömung aufgrund von Oberflächenstörungen von zuvor 19 Prozentpunkte auf nur ca. 3 Prozentpunkte. Damit besitzen die neu eingeführten Lokalisierungsmethoden die Möglichkeit, verfrühte Transitionen in der Freifeldanwendung mit höherer Empfindlichkeit zu detektieren und die Reduktion der laminaren Strömung präziser berechnen zu können.

6.3. Ausblick auf weiterführende Arbeiten

Die vorliegende Arbeit lieferte in den Bereichen der Bildaufnahme, der spatio-temporalen Bildverarbeitung durch Erzeugung neuer Strömungsvisualisierungen und der Lokalisierung der natürlichen und verfrühten Transition Fortschritte gegenüber dem Stand der Technik und Forschung

und ebnete damit den Weg für weiterführende Arbeiten in allen drei Gebieten.

Durch die Verwendung der langwelligen Infrarotkamera konnte das CNR gegenüber einer Bildaufnahme mit einer mittelwelligen Infrarotkamera erhöht und durch die geringere Integrationszeit gleichzeitig eine Reduzierung der Bewegungsunschärfe erreicht werden. Eine weitere Verkürzung der Integrationszeit reduziert die Bewegungsunschärfe am Strömungsübergang und begünstigt damit die Lokalisierung hinsichtlich einer geringeren Abweichung. Das daraus resultierende geringere SNR bewirkt hingegen einen Anstieg der Abweichung. Das Verhältnis zwischen SNR und der Bewegungsunschärfe sollte daher näher untersucht werden, um ein Optimum beider Größen hinsichtlich einer minimalen Messabweichung bei der Lokalisierung zu ermitteln.

Zusätzlich zur Änderung des Wellenlängenbereichs sollte bei der Infrarotkamertechnik eine Erhöhung der geometrischen Auflösung angestrebt werden, um feiner aufgelöste Bildinformationen auch bei weiten Messabständen zu ermöglichen. Der dichte Informationsgehalt durch eine höher geometrische Auflösung ist hierbei insbesondere mit der zuvor genannten Thematik einer geringen Bewegungsunschärfe zu bewerten. Die Robustheit des Messsystems bezüglich höherer Messabstände wird in Zukunft speziell für die stetig ansteigende Bauhöhe von WEA an Relevanz gewinnen. Ein weiterer Forschungsbedarf besteht in der Verwendung von automatisierten Flugsystemen, auf denen die Messtechnik positioniert wird, um die Messabstände für große Anlagen und speziell bei schwerer Zugänglichkeit (z.B. im Bereich der Offshore-Windenergie) weiter zu reduzieren.

Bis dato beschäftigt sich die thermografische Strömungsvisualisierung an WEA in Betrieb nur mit der Auswertung der statischen Grenzschichtströmung bzw. der Strömung an bestimmten Rotorblattpositionen. Zukünftige Arbeiten sollten sich mit der Fragestellung beschäftigen, welche dynamischen Veränderungen in der Grenzschichtströmung aufgrund von sich verändernden Anströmbedingungen wie die Geschwindigkeit oder dem Angriffswinkel auftreten. Dafür muss die Bildaufnahme weiter entwickelt werden, um beispielsweise ein Rotorblatt während der Umdrehung zu verfolgen und/oder länger Datenaufnahmen trotz einer sich aufgrund der Windnachführung bewegenden Gondel der WEA zu ermöglichen.

Im Themengebiet der Strömungsvisualisierung durch die Verfahren der Merkmalsextraktion sollte die Auswirkung der strömungsphysikalischen Unterschiede in den Strömungsbereichen auf die Varianz der Temperatur- bzw. Intensitätswerte in der Bildserie näher untersucht werden, um die als Merkmale extrahierten Informationen in den Ergebnisvisualisierungen auch theoretisch begründen zu können. Die Messkette der thermografischen Strömungsvisualisierung sollte inklusive der Anwendung von Merkmalsextraktionen neu untersucht werden. Hierdurch könnten Parameter der Auswertung wie zum Beispiel die ideale Messfrequenz und Anzahl an ausgewerteten Bildern auf Grundlage der Strömungsparameter bestimmt werden, um so das Potential der CNR Steigerung bei minimalem Rechenaufwand der Algorithmen auszuschöpfen. Hierbei sollte auch eine vollständige Untersuchung des Einflusses der Materialeigenschaften wie der Emissionsgrad oder Unterschiede verschiedene Lackierungen der Oberfläche auf das Ergebnis der Merkmalsextraktion durchgeführt werden.

Des Weiteren sollte eine Auswertung der thermografischen Rohdaten bezüglich einer besten Bildverarbeitungsmethode angestrebt werden. Bei welchem CNR oder anderen Parametern der Strömungsvisualisierung ist die Wahl der deutlich weniger aufwändigen Mittelwertbildung einer komplexen Auswertung durch die erweiterten Bildverarbeitungsverfahren zu bevorzugen?

In dieser Arbeit wurden die erweiterten Bildverarbeitungsmethoden zunächst nur an Strömungsvisualisierungen ohne Turbulenzkeile, also mit einer Ausprägung der natürlichen Transitionlinie angewandt. Es leitet sich die Forschungsfrage ab, welchen Vorteil die Merkmalsextraktionen für eine bessere Darstellung der Turbulenzkeile hinsichtlich eines hohen relativen Kontrasts zur umgebenden laminaren Strömung bewirken können.

Der größte Forschungsbedarf bzw. Optimierungspotential bei der Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition liegt in der Wahl der Approximationsmodelle, die für eine Subpixelauflö-

sung der Lokalisierung genutzt werden. Eine Untersuchung der in den Strömungsvisualisierungen der sowohl klassischen, als auch erweiterten Bildverarbeitungsmethoden zu erwartenden Verteilung der Intensität könnte in die Definition von neuen Modellvorstellungen münden. Hierdurch könnten Abweichungen zwischen den Messdaten und dem Modell und damit Abweichungen bei der Lokalisierung weiter reduziert werden. Fehlen erforderliche Messparameter der Anströmung um die Intensitätsverteilung in den Strömungsvisualisierungen vorherzusagen, kann parallel die Weiterentwicklung von heuristischen Modellvorstellungen gewinnbringend für präzisere Approximationsmodelle genutzt werden. Damit steigert das Messsystem seine Robustheit gegenüber Messsituationen in denen limitiertes Vorwissen bezüglich der Strömung vorliegt.

Bezüglich verfrühter Transitionen gilt es zu untersuchen, wie die Verfahren der Subpixelauflösung unter Anwendung von Approximationsmodellen mit den vorgestellten Verfahren der Lokalisierung bei verfrühten Transitionen kombiniert werden können. Die vorgestellten heuristischen Approximationsmodelle beschränken sich auf ein einziges Auftreten der laminar-turbulenten Transition pro Auswertelinie. Eine Auswertung orthogonal zu den schräg verlaufenden Transitionslinien an den Turbulenzkeilen resultiert jedoch in mehrere Strömungstransitionen innerhalb der Auswertelinie. Die beiden Approximationsmodelle für eine Lokalisierung der natürlichen laminar-turbulenten Transition können folglich nicht direkt angewandt werden. Für eine zuverlässigere Erkennung der Turbulenzkeile zur Quantifizierung der Reduktion der laminaren Strömung sollten zudem modellbasierte Auswertungen gemäß einer Mustererkennung untersucht werden.

Für eine automatisierte Auswertung der Strömungszustände unter Anwendung der erweiterten Bildverarbeitungsmethoden ist zu untersuchen, wie Vorwissen genutzt oder durch Vorauswertungen ermittelt werden kann, um die Auswahl der optimalen Visualisierung hinsichtlich eines maximalen CNR in den Ergebnissen der Merkmalsextraktionen zu treffen. Hierbei ist eine Auswertung im Ergebnis der klassischen Bildverarbeitungsmethoden in Betracht zu ziehen. Neben der Auswahl der optimalen Ergebnisvisualisierung muss auch der auszuwertende Bildbereich für die erweiterten Verfahren bestimmt werden. Darüber hinaus gilt es frühzeitig abzuschätzen, ob sich dieser zusätzliche Aufwand für eine CNR Steigerung lohnt. Dafür müssen Qualitätskennzahlen eingeführt werden, welche die Rohdaten hinsichtlich dieser Entscheidung bewerten.

Ebenfalls interessant bei der Visualisierung der Strömung ist die Fragestellung, ob die eingeführten erweiterten Bildverarbeitungsmethoden auch in Messsituationen mit anderen Wetterbedingungen, aus denen ein geringes CNR in den Rohdaten resultiert, Vorteile für die Unterscheidbarkeit bieten. Hierzu zählen Einflüsse, die das CNR negativ beeinflussen, wie z.B. leichter Regen, Schneefall oder eine Messung bei Nacht.

Da die Auswertung der Merkmalsextraktionsverfahren sehr rechenaufwändig ist lohnt es sich zudem zu prüfen, ob schneller zu ermittelnde Vorergebnisse relevante Informationen über die Messung liefern, die kurz nach der Messaufnahme bei der Entscheidung helfen, ob Messdaten brauchbar sind oder nicht. Eine detaillierte, rechenaufwändige und vollständige Auswertung kann im Nachgang durchgeführt werden.

Die aus der Lokalisierung der verfrühten Transition resultierende Quantifizierung der LFR muss zudem näher bewertet werden, um eine aussagekräftige Interpretation des Rotorblattzustandes zu ermöglichen. Fragen die hierbei beantwortet werden müssen sind, welchen Einfluss die Stärke, also der Kontrast, eines Turbulenzkeils auf die Steigerung des aerodynamischen Luftwiderstandes des Rotorblattes hat und ob die Art der Störung aus der Form und Art des Turbulenzkeils abgeleitet werden kann.

Literaturverzeichnis

- [Abd2010] Abdi, H.; Williams, L. J.: Principal component analysis. In: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics* 2 (2010), Nr. 4, S. 433–459. – ISSN 19395108
- [Ast2012] Astarita, T.; Carlomagno, G. M.: *Infrared Thermography for Thermo-Fluid-Dynamics*. Springer Berlin Heidelberg, 2012 (Experimental Fluid Mechanics). – ISBN 9783642295089
- [Bae2016] Baehr, H. D.; Stephan, K.: Wärmestrahlung. In: Baehr, H. D.; Stephan, K. (Hrsg.): *Wärme- und Stoffübertragung*. Berlin, Heidelberg : Springer Vieweg, 2016, S. 615–748. – ISBN 978-3-662-49677-0
- [Bæk2009] Bæk, P.; Fuglsang, P.: Experimental detection of transition on wind turbine airfoils. In: *European Wind Energy Conference & Exhibition 2009*. Red Hook, NY : Curran Associates Inc, 2009, S. 1628–1652. – ISBN 9781615677467
- [Bak2011a] Bak, C.: Aerodynamic design of wind turbine rotors. In: Sørensen, J. D. (Hrsg.): *Wind energy systems*. Oxford : Woodhead Publ, 2011 (Woodhead Publishing series in energy), S. 161–207. – ISBN 9781845695804
- [Bak2011b] Bak, C.; Aagaard Madsen, H.; Schmidt Paulsen, U.; Gaunaa, M.; Fuglsang, P.; Romb-lad, J.; Olesen, N. A.; Enevoldsen, P.; Laursen, J.; Jensen, L.: DAN-AERO MW: Detailed aerodynamic measurements on a full scale MW wind turbine. In: *European Wind Energy Conference & Exhibition 2010, (EWEC 2010)*. Red Hook, NY : Curran, 2011. – ISBN 9781617823107
- [Bal2016] Balaesque, N.; Bicker, S.; Dollinger, C.; Fandrich, A.; Gatz, S.; Hölling, M.; Irschik, K.; Reichstein, T.; Schaffarczyk, A. P.; v. Zengen, C.: Investigations for Improvement of Energy Yield of Rotor-blades from the 1.5 MW Class. In: *Journal of Physics: Conference Series* 753 (2016), Nr. 7, S. 072012. – ISSN 1742-6596
- [Ben2018] Benallou, A.: *Energy Transfers by Convection*. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc, 2018. – ISBN 9781119476962
- [Ber2001] Bertalmio, M.; Bertozzi, A. L.; Sapiro, G.: *Navier-Stokes, Fluid Dynamics, and Image and Video inpainting*. 2001
- [Ber2007] Berry, M. W.; Browne, M.; Langville, A. N.; Pauca, V. P.; Plemmons, R. J.: Algorithms and applications for approximate nonnegative matrix factorization. In: *Computational Statistics & Data Analysis* 52 (2007), Nr. 1, S. 155–173
- [Ber2014] Bernhard, F.: *Handbuch der Technischen Temperaturmessung*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014 (VDI-Buch). – ISBN 9783642245060
- [Bet1926] Betz, A.: *Wind-Energie und ihre ausnutzung durch Windmühlen*. Vandenhoeck & Ruprecht, 1926
- [Bou1983] Bouchardy, A.-M.; Durand, G.: Processing Of Infrared Thermal Images For Aero-dynamic Research. In: Oosterlinck, A. J.; Tescher, A. G. (Hrsg.): *Applications of Digital Image Processing V*, SPIE, 1983 (SPIE Proceedings), S. 304–309

- [Bud2011] Budzier, H.; Gerlach, G.: *Thermal infrared sensors: Theory, optimisation and practice / Helmut Budzier and Gerald Gerlach*. Chichester : Wiley, 2011. – ISBN 9780470871928
- [Bun2021] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie ; Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): *Erneuerbare Energien in Zahlen: Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2020*. 2021
- [But1990] Butterfield, C. P.; Jenks, M.; Simms, D. A.; Musial, W.: Aerodynamic pressure measurements on a rotating wind turbine blade. In: *36th International Instrumentation Symposium* (1990), S. 517–524
- [Car1988] Carlomagno, G. M.; De Luca, L.; Buresti, G.; Lombardi, G.: Characterization Of Boundary Layer Conditions In Wind Tunnel Tests Through Ir Thermography Imaging. In: *SPIE Proceedings*, International Society for Optics and Photonics, 1988, S. 23–31
- [Car1989] Carlomagno, G. M.: Infrared thermography in heat transfer. In: *Handbook of Flow Visualization* (1989)
- [Che2004] Chen, Q.; Wu, H.; Wada, T.: Camera Calibration with Two Arbitrary Coplanar Circles. In: Pajdla, T.; Matas, J. (Hrsg.): *Computer Vision - ECCV 2004*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2004, S. 521–532. – ISBN 978-3-540-24672-5
- [Che2007] Chen, J.; Zhou, Y.; Nan, Q.; Sun, Y.; Ye, X.; Wang, Z.: Synthesis, characterization and infrared emissivity study of polyurethane/TiO₂ nanocomposites. In: *Applied Surface Science* 253 (2007), Nr. 23, S. 9154–9158. – ISSN 01694332
- [Che2020] Chen, L.; Suzuki, T.; Nonomura, T.; Asai, K.: Flow visualization and transient behavior analysis of luminescent mini-tufts after a backward-facing step. In: *Flow Measurement and Instrumentation* 71 (2020), S. 101657. – ISSN 09555986
- [Chi2019] Chin, C. S.; Ji, X.; Woo, W. L.; Kwee, T. J.; Yang, W.: Modified multiple generalized regression neural network models using fuzzy C-means with principal component analysis for noise prediction of offshore platform. In: *Neural Computing and Applications* 31 (2019), Nr. 4, S. 1127–1142
- [Cor2001] Corten, G. P.; Veldkamp, H. F.: Insects can halve wind-turbine power. In: *Nature* 412 (2001), S. 41
- [Cra2013] Crawford, B. K.; Duncan, G. T.; West, D. E.; Saric, W. S.: Laminar-Turbulent Boundary Layer Transition Imaging Using IR Thermography. In: *Optics and Photonics Journal* 3 (2013), Nr. 3, S. 233–239
- [Cra2015] Crawford, B. K.; Duncan, G. T.; West, D. E.; Saric, W. S.: Robust, automated processing of IR thermography for quantitative boundary-layer transition measurements. In: *Experiments in Fluids* 56 (2015), Nr. 7, S. 149
- [Dal2009] Dalili, N.; Edrisy, A.; Carriveau, R.: A review of surface engineering issues critical to wind turbine performance. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009), Nr. 2, S. 428–438
- [Dan2016] Dannenberg, L.: Rotorblätter. In: Schaffarczyk, A. (Hrsg.): *Einführung in die Windenergietechnik*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2016 (Hanser-eLibrary). – ISBN 9783446449824

- [Dho1990] Dhome, M.; Lapreste, J. T.; Rives, G.; Richetin, M.: Spatial localization of modelled objects of revolution in monocular perspective vision. In: Faugeras, O. (Hrsg.): *Computer Vision — ECCV 90*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1990, S. 475–485. – ISBN 978-3-540-47011-3
- [Doe2019] Does, M. D.; Olesen, J. L.; Harkins, K. D.; Serradas-Duarte, T.; Gochberg, D. F.; Jespersen, S. N.; Shemesh, N.: Evaluation of principal component analysis image denoising on multi-exponential MRI relaxometry. In: *Magnetic Resonance in Medicine* (2019)
- [Dol2018a] Dollinger, C.: *Thermografische Strömungsvisualisierung an Rotorblättern von Windenergieanlagen*. Shaker Verlag, 2018
- [Dol2018b] Dollinger, C.; Sorg, M.; Balaesque, N.; Fischer, A.: Measurement uncertainty of IR thermographic flow visualization measurements for transition detection on wind turbines in operation. In: *Experimental Thermal and Fluid Science* 97 (2018), S. 279–289
- [Dol2018c] Dollinger, C.; Balaesque, N.; Sorg, M.; Fischer, A.: IR thermographic visualization of flow separation in applications with low thermal contrast. In: *Infrared Physics & Technology* 88 (2018), Nr. 2018, S. 254–264
- [Dol2019] Dollinger, C.; Balaesque, N.; Gaudern, N.; Gleichauf, D.; Sorg, M.; Fischer, A.: IR thermographic flow visualization for the quantification of boundary layer flow disturbances due to the leading edge condition. In: *Renewable Energy* 138 (2019), S. 709–721
- [Egg1990] Eggleston, D. M.; Starcher, K.: A Comparative Study of the Aerodynamics of Several Wind Turbines Using Flow Visualization. In: *Journal of Solar Energy Engineering* 112 (1990), Nr. 4, S. 301–309. – ISSN 0199-6231
- [Ehr2013] Ehrmann, R. S.; White, E. B.; Maniaci, D. C.; Chow, R.; Langel, C. M.; van Dam, C. P.: *Realistic Leading-Edge Roughness Effects on Airfoil Performance*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2013
- [Eva2008] Evangelidis, G. D.; Psarakis, E. Z.: Parametric image alignment using enhanced correlation coefficient maximization. In: *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 30 (2008), Nr. 10, S. 1858–1865. – ISSN 0162-8828
- [Fal2018] Falkovich, G.: *Fluid Mechanics*. Cambridge University Press, 2018. – ISBN 9781316416600
- [Fis2007] Fischer, A.; Büttner, L.; Czarske, J.; Eggert, M.; Grosche, G.; Müller, H.: Investigation of time-resolved single detector Doppler global velocimetry using sinusoidal laser frequency modulation. In: *Measurement Science and Technology* 18 (2007), Nr. 11, S. 3672. – ISSN 0957-0233
- [Fre2020] Frenz, W.: *Handbuch Industrie 4.0: Recht, Technik, Gesellschaft*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2020. – ISBN 978-3-662-58473-6
- [Gar1989] Gartenberg, E.; Roberts, A. S.; McRee, G. J.: Infrared imaging and tufts studies of boundary layer flow regimes on a NACA 0012 airfoil, IEEE, 1989, S. 168–178
- [Gar1991] Gartenberg, E.; Roberts, A. S.: Airfoil transition and separation studies using an infrared imaging system. In: *Journal of Aircraft* 28 (1991), Nr. 4, S. 225–230
- [Gar1992] Gartenberg, E.; Johnson, W. G.; Wright, R. E.; Carraway, D. L.; Johnson, C. B.: Boundary-layer transition-detection in a cryogenic wind tunnel using infrared imaging. In: *AIAA Journal* 30 (1992), Nr. 2, S. 444–446

- [Gar1994] Gartenberg, E.; Wright, R. E.: Boundary-layer transition detection with infrared imaging emphasizing cryogenic applications. In: *AIAA Journal* 32 (1994), Nr. 9, S. 1875–1882. – ISSN 0001-1452
- [Gar2016] Gardner, A. D.; Wolf, C. C.; Raffel, M.: A new method of dynamic and static stall detection using infrared thermography. In: *Experiments in Fluids* 57 (2016), Nr. 9, S. 149
- [Gar2020] Gardner, A. D.; Wolf, C. C.; Heineck, J. T.; Barnett, M.; Raffel, M.: Helicopter Rotor Boundary Layer Transition Measurement in Forward Flight Using an Infrared Camera. In: *Journal of the American Helicopter Society* 65 (2020), Nr. 1, S. 2–14. – ISSN 2161-6027
- [Gas2005] Gasch, R.; Twele, J.; Bade, P.; Conrad, W.; Heilmann, C.; Kaiser, K.; Kortenkamp, R.; Kühn, M.; Langreder, W.; Liersch, J.; Maurer, J.; Reuter, A.; Schubert, M.; Sundermann, B.; Stoffel, A.: Auslegung von Windturbinen nach Betz und Schmitz. In: Gasch, R.; Twele, J.; Bade, P.; Conrad, W.; Heilmann, C.; Kaiser, K.; Kortenkamp, R.; Kühn, M.; Langreder, W.; Liersch, J.; Maurer, J.; Reuter, A.; Schubert, M.; Sundermann, B.; Stoffel, A. (Hrsg.): *Windkraftanlagen*. Wiesbaden and s.l. : Vieweg+Teubner Verlag, 2005, S. 179–217. – ISBN 978-3-322-99446-2
- [Gau1994] Gaussorgues, G.: *Infrared thermography*. London : Chapman & Hall, 1994 (Microwave and RF Techniques and Applications). – ISBN 9780412479007
- [Gau2014] Gaudern, N.: A practical study of the aerodynamic impact of wind turbine blade leading edge erosion. In: *Journal of Physics: Conference Series* 524 (2014), Nr. 1, S. 012031
- [Gaw2016] Gawel, E.; Purkus, A.: EEG 2017 — Mehr Markt bei der Erneuerbare-Energien-Förderung? In: *Wirtschaftsdienst* 96 (2016), Nr. 12, S. 910–915. – ISSN 0043-6275
- [Han2018] Han, W.; Kim, J.; Kim, B.: Effects of contamination and erosion at the leading edge of blade tip airfoils on the annual energy production of wind turbines. In: *Renewable Energy* 115 (2018), S. 817–823
- [Hau2016] Hau, E.: *Windkraftanlagen*. Springer Berlin Heidelberg, 2016
- [He2012] He, D.; Liu, X.; Yin, Y.; Li, A.; Peng, X.: Correction of circular center deviation in perspective projection. In: Tescher, A. G. (Hrsg.): *Applications of Digital Image Processing XXXV*, SPIE, 2012 (SPIE Proceedings), S. 84991V
- [Hei2014] Heineck, J. T.; Schüle, E.; Raffel, M.: Boundary layer transition detection on a rotor blade using rotating mirror thermography. In: *5th decennial AHS Aeromechanics Specialists' Conference 2014*. Alexandria, VA and Red Hook, NY : American Helicopter Society International and Printed from e-media with permission by Curran Associates, 2014. – ISBN 9781634391788
- [Hei2018] Heier, S.: *Windkraftanlagen*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. – ISBN 978-3-8348-1426-5
- [Her1800] Herschel, W.: XIV. Experiments on the refrangibility of the invisible rays of the sun. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 90 (1800), S. 284–292. – ISSN 0261-0523
- [Hey1990] Heywang, W.; Müller, R.: *Halbleiter-Elektronik, Eine aktuelle Buchreihe für Studierende und Ingenieure*. Bd. 15: *Rauschen: Zweite, überarbeitete und erweiterte Auflage*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1990. – ISBN 9783642615016

- [Hoe2017] v. Hoesslin, S.; Stadlbauer, M.; Gruendmayer, J.; Kähler, C. J.: Temperature decline thermography for laminar–turbulent transition detection in aerodynamics. In: *Experiments in Fluids* 58 (2017), Nr. 9. – ISSN 1432-1114
- [Hoe2020] v. Hoesslin, S.; Gruendmayer, J.; Zeisberger, A.; Sommer, M. S.; Klimesch, J.; Behre, S.; Brandies, H.; Kähler, C. J.: Visualization of laminar–turbulent transition on rotating turbine blades. In: *Experiments in Fluids* 61 (2020), Nr. 6. – ISSN 1432-1114
- [Hot1933] Hotelling, H.: Analysis of a complex of statistical variables into principal components. In: *Journal of Educational Psychology* 24 (1933), Nr. 6, S. 417–441. – ISSN 0022-0663
- [Huc1993] Hucho, W.; Sovran, G.: Aerodynamics of Road Vehicles. In: *Annual Review of Fluid Mechanics* 25 (1993), Nr. 1, S. 485–537. – ISSN 0066-4189
- [Huc2012] Hucho, W.-H.: *Aerodynamik der stumpfen Körper: Physikalische Grundlagen und Anwendungen in der Praxis ; mit 56 Tabellen.* 2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2012. – ISBN 9783834882431
- [Jam2018] Jamieson, P.: *Innovation in wind turbine design.* Second edition. Hoboken, N.J : Wiley, 2018. – ISBN 9781119137900
- [Jos2016] Joseph, L. A.; Borgoltz, A.; Devenport, W.: Infrared thermography for detection of laminar-turbulent transition in low-speed wind tunnel testing. In: *Experiments in Fluids* 57 (2016), Nr. 5, S. 77
- [Kal1997] Kaltschmitt, M.; Wiese, A.: *Erneuerbare Energien.* Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1997. – ISBN 978-3-540-63219-1
- [Kee2013] Keegan, M. H.; Nash, D. H.; Stack, M. M.: On erosion issues associated with the leading edge of wind turbine blades. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 46 (2013), Nr. 38, S. 383001
- [Kir1860] Kirchhoff, G.: Ueber das Verhältniss zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht. In: *Annalen der Physik und Chemie* 185 (1860), Nr. 2, S. 275–301. – ISSN 00033804
- [Kre1958] Kreith, F.: *Principles of heat transfer.* 1958
- [Kue2015] Kuester, M. S.; Brown, K.; Meyers, T.; Intaratep, N.; Borgoltz, A.; Devenport, W. J.: *Wind Tunnel Testing of Airfoils for Wind Turbine Applications.* (2015)
- [Lan2015] Lang, W.; Gardner, A. D.; Mariappan, S.; Klein, C.; Raffel, M.: Boundary-layer transition on a rotor blade measured by temperature-sensitive paint, thermal imaging and image derotation. In: *Experiments in Fluids* 56 (2015), Nr. 6, S. 1–14. – ISSN 1432-1114
- [Lee1998] Lee, T.; Basu, S.: Measurement of unsteady boundary layer developed on an oscillating airfoil using multiple hot-film sensors. In: *Experiments in Fluids* 25 (1998), Nr. 2, S. 108–117. – ISSN 1432-1114
- [Lee1999] Lee, D. D.; Seung, H. S.: Learning the parts of objects by non-negative matrix factorization. In: *Nature* 401 (1999), Nr. 6755, S. 788–791
- [Luc1990] d. Luca, L.; Carlomagno, G. M.; Buresti, G.: Boundary layer diagnostics by means of an infrared scanning radiometer. In: *Experiments in Fluids* 9 (1990), Nr. 3, S. 121–128

- [Luc1995] d. Luca, L.; Guglieri, G.; Cardone, G.; Carlomagno, G. M.: Experimental analysis of surface flow on a delta wing by infrared thermography. In: *AIAA Journal* 33 (1995), Nr. 8, S. 1510–1512
- [Mad2018] Madsen, H. A.; Sørensen, N. N.; Bak, C.; Troldborg, N.; Pirrung, G.: Measured aerodynamic forces on a full scale 2MW turbine in comparison with EllipSys3D and HAWC2 simulations. In: *Journal of Physics: Conference Series* 1037 (2018), Nr. 2, S. 022011. – ISSN 1742-6596
- [Mal2001] Maldague, X.: *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. John Wiley & Sons, 2001
- [Mal2008] Malerba, M.; Argento, M.; Salviuolo, A.; Rossi, G.: A boundary layer inspection on a wing profile through high resolution thermography and numerical methods. 3 (2008), Nr. 1, S. 18–28
- [Mas2006] Massey, B. S.; Ward-Smith, A. J.: *Mechanics of fluids*. 8th ed. London and New York : Taylor & Francis, 2006. – ISBN 0203012321
- [Mat2016] Matsuoka, R.; Maruyama, S.: *Eccentricity on an image caused by projection of a circle and a sphere*. 2016
- [Med2011] Medina, P.; Schreck, S.; Johansen, J.; Fingersh, L.: Oil-flow visualization on a SWT-2.3-101 wind turbine. In: *29th AIAA Applied Aerodynamics Conference*. [Reston, VA] : [American Institute of Aeronautics and Astronautics], 2011. – ISBN 9781624101458
- [Mei1977] Meinel, A. B.; Meinel, M. P.: Applied solar energy: An introduction /2nd edition. In: *NASA STI/Recon Technical Report A 77* (1977), S. 33445
- [Mey1994] Meyers, J.: Development of Doppler global velocimetry for wind tunnel testing. In: *25th Plasmadynamics and Lasers Conference*. Reston, Virginia : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1994
- [Mø2013] Møhlholt Jensen, F.; Branner, K.: Introduction to wind turbine blade design. In: Brøndsted, P.; Nijssen, R. P. L. (Hrsg.): *Advances in wind turbine blade design and materials*. Oxford : Woodhead Publishing, 2013 (Woodhead Publishing series in energy, 2044-9364), S. 3–28. – ISBN 9780857094261
- [Mon2004] Montelpare, S.; Ricci, R.: A thermographic method to evaluate the local boundary layer separation phenomena on aerodynamic bodies operating at low Reynolds number. In: *International Journal of Thermal Sciences* 43 (2004), Nr. 3, S. 315–329
- [Mor1969] Morkovin, M. V.: The Many Faces of Transition. In: Wells, C. S. (Hrsg.): *Viscous Drag Reduction*. Plenum Press, 1969
- [Mun2007] Muneer, T.: *Solar Radiation and Daylight Models*. Routledge, 2007. – ISBN 9780080474410
- [Nav1827] Navier, M.: Mémoire sur les lois du mouvement des fluides. In: *Mémoires de l'Académie royale des sciences* 6 (1827), S. 389–416
- [Nil2020] Nili-Ahmadabadi, M.; Nematollahi, O.; Fatehi, M.; Cho, D. S.; Kim, K. C.: Evaluation of aerodynamic performance enhancement of Risø_B1 airfoil with an optimized cavity by PIV measurement. In: *Journal of Visualization* 23 (2020), Nr. 4, S. 591–603. – ISSN 1343-8875

- [Nis2011] Nischwitz, A.; Fischer, M.; Haberäcker, P.; Socher, G.: *Computergrafik und Bildverarbeitung: Band II: Bildverarbeitung*. 3., neu bearbeitete Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2011 (SpringerLink Bücher). – ISBN 9783834883001
- [Nit1993] Nitsche, W.; Szodruch, J.: Laminar-flow instrumentation for wind-tunnel and flight experiments. In: *Journal of Aircraft* 30 (1993), Nr. 2, S. 192–200. – ISSN 0021-8669
- [Nit2006] Nitsche, W.; Brunn, A.: *Strömungsmesstechnik*. 2., aktualisierte und bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006 (VDI-Buch). – ISBN 9783540324874
- [Par2011] Parent, O.; Ilinca, A.: Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: Critical review. In: *Cold Regions Science and Technology* 65 (2011), Nr. 1, S. 88–96. – ISSN 0165232X
- [Pea1977] Peake, D. J.; Bowker, A. J.; Lockyear, S. J.; Ellis, F.: Non-obtrusive detection of transition region using an infra-red camera. In: *In AGARD Laminar-Turbulent Transition 17 p (SEE N78-14316 05-34 (1977))*
- [Pla1900] Planck, M. K. E. L.: Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum. In: *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* Bd. 2. 1900, S. 237
- [Pol2009] Polifke, W.; Kopitz, J.: *Wärmeübertragung: Grundlagen, analytische und numerische Methoden*. 2. aktual. Aufl. München u.a : Pearson Studium, 2009 (Always learning). – ISBN 9783863266707
- [Pop2008] Popov, A. V.; Botez, R. M.; Labib, M.: Transition Point Detection from the Surface Pressure Distribution for Controller Design. In: *Journal of Aircraft* 45 (2008), Nr. 1, S. 23–28. – ISSN 0021-8669
- [Pra1904] Prandtl, L.: Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung. In: *Verhandlungen des III Internationalen Mathematiker-Kongresses*. 1904
- [Qua1987] Quast, A.: Detection of Transition by Infrared Image Techniques. In: *Technical Soaring*, 1987
- [Rei2012] Reider, G. A.: *Photonik: Eine Einführung in die Grundlagen*. 3. Aufl. 2012. Vienna : Springer Vienna, 2012. – ISBN 9783709115213
- [Rey1874] Reynolds, O.: On the Extent and Action of the Heating Surface of Steam Boilers. In: *Memoirs and proceedings of the Manchester Literary & Philosophical Society* 14 (1874), S. 7–12
- [Rey1883] Reynolds, O.: XXIX. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 174 (1883), S. 935–982. – ISSN 0261-0523
- [Ric2009] Ricci, R.; Montelpare, S.: Analysis of boundary layer separation phenomena by infrared thermography Use of acoustic and/or mechanical devices to avoid or reduce the laminar separation bubble effects. In: *Quantitative InfraRed Thermography Journal* 6 (2009), Nr. 1, S. 101–125. – ISSN 1768-6733
- [Ric2014] Richter, K.; Schülein, E.: Boundary-layer transition measurements on hovering helicopter rotors by infrared thermography. In: *Experiments in Fluids* 55 (2014), Nr. 7, S. 1755

- [Rod2020] Rodriguez-Molares, A.; Rindal, O. M. H.; D’hooge, J.; Masoy, S.-E.; Austeng, A.; Lediju Bell, M. A.; Torp, H.: The Generalized Contrast-to-Noise Ratio: A Formal Definition for Lesion Detectability. In: *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 67 (2020), Nr. 4, S. 745–759. – ISSN 0885-3010
- [Sag2013] Sagol, E.; Reggio, M.; Ilinca, A.: Issues concerning roughness on wind turbine blades. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 23 (2013), S. 514–525
- [Sar2014] Sareen, A.; Sapre, C. A.; Selig, M. S.: Effects of leading edge erosion on wind turbine blade performance. In: *Wind Energy* 17 (2014), Nr. 10, S. 1531–1542
- [Sch2004] Schuster, N.; Kolobrodov, V. G.: *Infrarotthermographie*. 2., überarb. und erw. Ausg. Weinheim : Wiley-VCH, 2004. – ISBN 1282022040
- [Sch2006] Schlichting, H.; Gersten, K.: *Grenzschicht-Theorie*. Springer, 2006
- [Sch2012] Schubel, P. J.; Crossley, R. J.: Wind Turbine Blade Design Review. In: *Wind Engineering* 36 (2012), Nr. 4, S. 365–388
- [Sch2014a] Schaffarczyk, A. P.; Schwab, D.; Ingwersen, S.; Breuer, M.: Pressure and hot-film measurements on a wind turbine blade operating in the atmosphere. In: *Journal of Physics: Conference Series* 555 (2014), S. 012092. – ISSN 1742-6596
- [Sch2014b] Schieferdecker, J.: Infrarot-Strahlungssensoren zur berührungslosen Temperaturmessung. In: Reindl, L. M.; Tränkler, H.-R. (Hrsg.): *Sensortechnik*. Berlin Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg and Imprint: Springer Vieweg, 2014 (VDI-Buch), S. 929–1003. – ISBN 978-3-642-29942-1
- [Sch2016] Schütt, R. J.: Steuerung und Regelung von Windenergiesystemen. In: Schaffarczyk, A. (Hrsg.): *Einführung in die Windenergietechnik*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2016 (Hanser-eLibrary), S. 353–382. – ISBN 9783446449824
- [Sch2017] Schaffarczyk, A. P.; Schwab, D.; Breuer, M.: Experimental detection of laminar-turbulent transition on a rotating wind turbine blade in the free atmosphere. In: *Wind Energy* 20 (2017), Nr. 2, S. 211–220. – ISSN 1095-4244
- [Sei2007] Seitz, P.: Photon-noise limited distance resolution of optical metrology methods, SPIE, 2007, S. 109–118
- [Sér2003] Séraudie, A.; Perraud, J.; Moens, F.: Transition measurement and analysis on a swept wing in high lift configuration. In: *Aerospace Science and Technology* 7 (2003), Nr. 8, S. 569–576. – ISSN 1270-9638
- [Sie2016] Siegfriedsen, S.; Krämer, P.: Der Triebstrang. In: Schaffarczyk, A. (Hrsg.): *Einführung in die Windenergietechnik*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2016 (Hanser-eLibrary), S. 212–163. – ISBN 9783446449824
- [Sim2016] Simon, B.; Filius, A.; Tropea, C.; Grundmann, S.: IR thermography for dynamic detection of laminar-turbulent transition. In: *Experiments in Fluids* 57 (2016), Nr. 5, S. 93
- [Slo2015] Slot, H. M.; Gelinck, E. R. M.; Rentrop, C.; van der Heide, E.: Leading edge erosion of coated wind turbine blades: Review of coating life models. In: *Renewable Energy* 80 (2015), S. 837–848

- [Sør2010] Sørensen, B. F.; Holmes, J. W.; Brøndsted, P.; Branner, K.: Blade materials, testing methods and structural design. In: Tong, W. (Hrsg.): *Wind power generation and wind turbine design*. Southampton : WIT Press, 2010, S. 417–460. – ISBN 9781845642051
- [Ste2020] Steinfurth, B.; Cura, C.; Gehring, J.; Weiss, J.: Tuft deflection velocimetry: a simple method to extract quantitative flow field information. In: *Experiments in Fluids* 61 (2020), Nr. 6. – ISSN 1432-1114
- [Sto1849] Stokes, G. G.: On the theories of the internal friction of fluids in motion, and of the equilibrium and motion of elastic solids. In: *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* 8 (1849), S. 287–319
- [Swy2014] Swytink-Binnema, N.; Johnson, D. A.: Novel Image Analysis Method for Blade Aerodynamic Performance on Operational Turbine. In: *Journal of Physics: Conference Series* 524 (2014), Nr. 1, S. 012016. – ISSN 1742-6596
- [Tim2013] Timmer, W. A.; Bak, C.: Aerodynamic characteristics of wind turbine blade airfoils. In: Brøndsted, P.; Nijssen, R. P. L. (Hrsg.): *Advances in wind turbine blade design and materials*. Oxford : Woodhead Publishing, 2013 (Woodhead Publishing series in energy, 2044-9364), S. 109–149. – ISBN 9780857094261
- [Tra] Traphan, D.; Gülker, G.; Meinschmidt, P.: *"Infrarot-Thermographie als Messtechnik zur Visualisierung von Vortex-Strukturen auf rotierenden Rotorblättern" : Überprüfung dieser Hypothese und Ermittlung der Auswirkungen auf die Leistungskennlinien von WEA : Akronym: IR-Vortex : Schlussbericht*
- [Tra2015] Traphan, D.; Meinschmidt, P.; Schlüter, F.; Lutz, O.; Peinke, J.; Gülker, G.: High-speed measurements of different laminar-turbulent transition phenomena on rotor blades by means of infrared thermography and stereoscopic PIV. In: *Proceedings of the 10th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing*, 2015, S. 207
- [Tra2018] Traphan, D.; Herráez, I.; Meinschmidt, P.; Schlüter, F.; Peinke, J.; Gülker, G.: Remote surface damage detection on rotor blades of operating wind turbines by means of infrared thermography. In: *Wind Energy Science* 3 (2018), Nr. 2, S. 639–650
- [Tru2008] Truckenbrodt, E.: *Fluidmechanik 2: Elementare Strömungsvorgänge dichteveränderlicher Fluide sowie Potential- und Grenzschichtströmungen*. Springer, 2008
- [Tur1991] Turk, M.; Pentland, A.: Eigenfaces for Recognition. In: *Journal of Cognitive Neuroscience* 3 (1991), Nr. 1, S. 71–86
- [Twe2005] Twele, J.; Heilmann, C.; Schubert, M.: Konstruktiver Aufbau von Windkraftanlagen. In: Gasch, R.; Twele, J.; Bade, P.; Conrad, W.; Heilmann, C.; Kaiser, K.; Kortenkamp, R.; Kühn, M.; Langreder, W.; Liersch, J.; Maurer, J.; Reuter, A.; Schubert, M.; Sundermann, B.; Stoffel, A. (Hrsg.): *Windkraftanlagen*. Wiesbaden and s.l. : Vieweg+Teubner Verlag, 2005, S. 51–122. – ISBN 978-3-322-99446-2
- [Vey2014] Vey, S.; Lang, H. M.; Nayeri, C. N.; Paschereit, C. O.; Pechlivanoglou, G.: Extracting quantitative data from tuft flow visualizations on utility scale wind turbines. In: *Journal of Physics: Conference Series* 524 (2014), Nr. 1, S. 012011
- [Vol2016] Vollheim, B.; Gärtner, M.; Dammasch, G.; Krausz, M.: Application of cooled IR focal plane arrays in thermographic cameras. In: Holst, G. C.; Krapels, K. A. (Hrsg.): *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXVII*, SPIE, 2016 (SPIE Proceedings), S. 982017

- [Vol2018] Vollmer, M.; Möllmann, K.-P.: *Infrared thermal imaging: Fundamentals, research and applications*. Second edition. Weinheim : Wiley-VCH, 2018. – ISBN 3527693300
- [Wal2001] Wallrabe, A.: *Nachtsichttechnik: Infrarot-Sensorik: physikalische Grundlagen, Aufbau, Konstruktion und Anwendung von Wärmebildgeräten*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2001. – ISBN 9783663081005
- [Wei2019] Weigand, B.; Mitra, N.-K.: M9 Konvektive Wärmeübertragung bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten. In: Stephan, P.; Kabelac, S.; Kind, M.; Mewes, D.; Schaber, K. (Hrsg.): *VDI-Wärmeatlas*. Berlin, Germany : Springer Vieweg, 2019 (Springer Reference Technik, 2522-8196), S. 1795–1810. – ISBN 978-3-662-52988-1
- [Whi2006] White, F. M.; Corfield, I.: *Viscous Fluid Flow*. McGraw-Hill, 2006
- [Wie1893] Wien, W.: Eine neue Beziehung der Strahlung schwarzer Körper zum zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie. In: *Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin* 1 (1893), S. 55–62
- [Wol1987] Wold, S.; Esbensen, K.; Geladi, P.: Principal component analysis. In: *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 2 (1987), Nr. 1-3, S. 37–52
- [Wol2020] Wolf, C.; Gardner, A. D.; Raffel, M.: Infrared thermography for boundary layer transition measurements. In: *Measurement Science and Technology* 31 (2020), Nr. 11, S. 112002. – ISSN 0957-0233
- [Yu2009] Yu, H.; Xu, G.; Shen, X.; Yan, X.; Cheng, C.: Low infrared emissivity of polyurethane/Cu composite coatings. In: *Applied Surface Science* 255 (2009), Nr. 12, S. 6077–6081. – ISSN 01694332
- [Zha2008] Zhang, W.; Hain, R.; Kähler, C. J.: Scanning PIV investigation of the laminar separation bubble on a SD7003 airfoil. In: *Experiments in Fluids* 45 (2008), Nr. 4, S. 725–743. – ISSN 1432-1114
- [Zid2016] Zidane, I. F.; Saqr, K. M.; Swadener, G.; Ma, X.; Shehadeh, M. F.: On the role of surface roughness in the aerodynamic performance and energy conversion of horizontal wind turbine blades: a review. In: *International Journal of Energy Research* 40 (2016), Nr. 15, S. 2054–2077

A. Thermografie

Anzahl detektierter Photonen

Die mittlere Anzahl an detektierten Photonen, die für die Messung eines Temperaturwertes auf ein Detektorelement fallen, kann analog zur Berechnung der emittierten Photonenstromdichte aus Abschnitt 2.3.1 berechnet werden. Im Gegensatz zur Abstrahlung in den gesamten Halbraum muss der Anteil der emittierten Strahlungsenergie berechnet werden, der durch die Kameraoptik auf ein einzelnes Detektorelement fällt. Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass ein schwarzer Strahler betrachtet wird, also der Emissionsgrad $\varepsilon_{\text{obj}} = 1$ ist. Außerdem wird eine Transmission von $\tau_{\text{atm}} = 1$ verwendet.

Zunächst wird angenommen, dass die Temperatur des von einem Detektorelement betrachteten Oberflächenbereichs für den Zeitraum der Messung räumlich und zeitlich konstant ist. Aus der Gleichung (2.19) für die Photonenstromdichte folgt das Flächenelement ΔA und den Zeitraum Δt :

$$N_{\text{P},\lambda} = \Delta A \Delta t \cdot \frac{1}{E_{\text{P},\lambda}} \cdot M_{\lambda}. \quad (\text{A.1})$$

Anstatt die spektrale spezifische Ausstrahlung M_{λ} zu verwenden, welche die Abstrahlung in den gesamten Halbraum beschreibt, muss das Raumwinkelelement berücksichtigt werden, durch welches die Strahlung des Flächenelements wirkt. Hierfür wird die spektrale Strahldichte L_{λ} über das Raumwinkelelement $d\Omega$ integriert, das dem objektseitigen Objektivöffnungswinkel der Infrarotkamera entspricht und unter dem Winkel β zum Flächennormal des abstrahlenden Flächenelements liegt, vgl. Gleichung (2.14). Es folgt für eine Intergration zwischen den Azimutwinkeln ζ bis $\zeta + d\zeta$, sowie den Polarwinkeln β und $\beta + d\beta$ des Raumwinkelelements $d\Omega$:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} L_{\lambda} \cos(\beta) d\Omega &= L_{\lambda} \cdot \int_{\beta=0}^{\omega} \cos(\beta) \sin(\beta) d\beta \cdot \int_{\zeta=0}^{2\pi} d\zeta \\ &= L_{\lambda} \cdot \pi \sin^2(\omega). \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

Anwendung des Planckschen Strahlungsgesetz ergibt:

$$L_{\lambda} \cdot \pi \sin^2(\omega) = \frac{2hc_0^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc_0}{\lambda kT}} - 1} \cdot \pi \sin^2(\omega). \quad (\text{A.3})$$

Einsetzen in Gleichung (A.1), Anwendung der Energiegleichung eines Photons aus Gleichung (2.8) und Integration über den Wellenlängenbereich $\lambda_1 - \lambda_2$ ergibt:

$$N_{\text{P},\lambda_1-\lambda_2} = \pi \sin^2(\omega) \Delta A \Delta t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2c_0}{\lambda^4} \frac{1}{e^{\frac{hc_0}{\lambda kT}} - 1} d\lambda. \quad (\text{A.4})$$

Einfluss der Integrationszeit auf das Photonenschrotrauschen

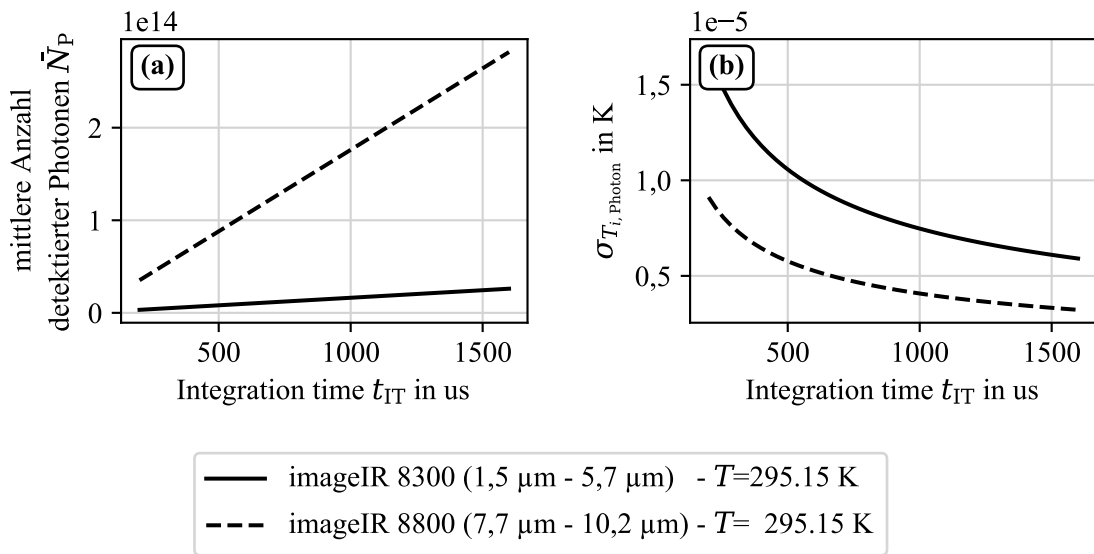


Abb. A.1.: Anzahl der emittierten Photonen in den Wellenlängenbereichen der beiden Infrarotsysteme in den gesamten Halbraum über der abstrahlenden Oberfläche die ein Pixel bei einer Temperatur von $T \approx 295,15 \text{ K} = 21,85^\circ \text{C}$ und einer Fläche von $\Delta A = 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$. (a) Anzahl emittierter Photonen pro Fläche für verschiedene Integrationszeiten. (b) Rauschanteil des Temperaturrauschens, welches aus dem Photonenschrotrauschen der in (a) emittierten Photonenzahl resultiert.

B. Rotorposition-Trigger

Kreisprojektion

Sobald Drehachse und Blickachse eines optischen Kamerasystems nicht koaxial sind, bildet die zweidimensionale Abbildung einer dreidimensionalen Kreisbewegung eine Ellipse auf der Kameraebene. Hierbei gilt es besonders zu beachten, dass der im Kamerabild projizierte Drehmittelpunkt der Rotationsebene nicht deckungsgleich mit dem Mittelpunkt der Ellipse ist, die aus der Projektion des Kreises entsteht [He2012]. Die Form der Kreisprojektion hängt dabei von der Brennweite und Sensorgröße des Kamerasystems ab. Eine Transformation zwischen der Rotationsebene im dreidimensionalen Raum und der zweidimensionalen Projektion im Kamerabild erlaubt eine Echtzeitanalyse der Drehbewegung einer WEA, siehe Abschnitt 3.2. Im folgenden werden die analytischen Transformationen, die in dieser Arbeit Anwendung gefunden haben, vorgestellt.

Transformation 2D-Ellipse auf 3D-Kreisbahn

Ist die perspektivische Projektion eines Kreises in Form einer Ellipse in der zweidimensionalen Kameraebene eines Bildes vorhanden, gilt es, den Ort des Drehpunktes und die Lage der Drehebene im Kamerakoordinatensystem zu berechnen. Basierend auf der Arbeit von Dhome et al. [Dho1990] fassen Chen et al. [Che2004] die algebraische Berechnung wie folgt zusammen:

Man definiere das Kamerakoordinatensystem mit dem Ursprung im optischen Zentrum und der z -Achse entlang der optischen Achse. Die elliptische Projektion eines Kreises sei folglich definiert als:

$$Ax_e^2 + 2Bx_e y_e + Cy_e^2 + 2Dx_e + 2Ey_e + F = 0. \quad (\text{B.1})$$

Für die weitere Darstellung wird die Formel in Matrixform dargestellt als:

$$\begin{pmatrix} x_e & y_e & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & B & D \\ B & C & E \\ D & E & F \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_e \\ y_e \\ 1 \end{pmatrix} = 0 \quad (\text{B.2})$$

Mit einer Brennweite f der Kamera, kann die Ellipse mit den Koordinaten $(x_e y_e - f)^T$ beschrieben werden. Die Sehstrahlen, die durch das optische Zentrum verlaufen und die Ellipse darstellen bilden einen schiefen eiliptischen Kegel, der durch

$$\mathbf{P} = k \begin{pmatrix} x_e & y_e & -f \end{pmatrix}^T, \quad (\text{B.3})$$

beschrieben wird, wobei k die Entfernung vom optischen Zentrum ist. Aus Gleichung (B.2) und Gleichung (B.3) ergibt sich die Gleichung, die den Kegel beschreibt, zu:

$$\mathbf{P}^T \mathbf{Q} \mathbf{P} = 0 \quad (\text{B.4})$$

mit

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} A & B & -\frac{D}{f} \\ B & C & -\frac{E}{f} \\ -\frac{D}{f} & -\frac{E}{f} & \frac{F}{f^2} \end{pmatrix}. \quad (\text{B.5})$$

Als nächstes definiere man eine Hilfsebene mit eigenem Koordinatensystem, dessen Ursprung im optischen Zentrum liegt. Die z -Achse der Hilfsebene sei dabei durch den Normalvektor der Kreisebene definiert. Damit ist die z -Koordinate aller Kreispunkte in diesem Hilfskoordinatensystem gleich und sei z_0 . Die Punkte des Kreises sind dann in diesem Koordinatensystem definiert als:

$$\begin{cases} (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2 \\ z = z_0, \end{cases} \quad (\text{B.6})$$

wobei (x_0, y_0, z_0) das Drehzentrum und r der Radius des Kreises ist.

Aus dem optischen Zentrum stammende Sehstrahlen, die durch den Kreis verlaufen, werden durch einen kreisförmigen Kegel beschrieben:

$$\mathbf{P}_c^T \mathbf{Q}_c \mathbf{P}_c = 0, \quad (\text{B.7})$$

wobei

$$\mathbf{Q}_c = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\frac{x_0}{z_0} \\ 0 & 1 & -\frac{y_0}{z_0} \\ -\frac{x_0}{z_0} & -\frac{y_0}{z_0} & \frac{x_0^2 + y_0^2 - r^2}{z_0^2} \end{pmatrix} \quad (\text{B.8})$$

Das Kamerakoordinatensystem und das Koordinatensystem der Hilfsebene teilen das gleiche Zentrum, das optische Zentrum der Kamera. Eine Transformation zwischen den Systemen ist folglich nur eine Rotation. Darüber hinaus, haben der schräge elliptische Kegel und der schräge kreisförmige Kegel die gleiche Oberfläche. Daher kann eine Rotationsmatrix \mathbf{R}_c beschrieben werden, die \mathbf{P}_c in \mathbf{P} transformiert:

$$\mathbf{P} = \mathbf{R}_c \mathbf{P}_c. \quad (\text{B.9})$$

Da $k\mathbf{Q}_c$ für $k \neq 0$ den gleichen Kegel wie \mathbf{Q}_c beschreibt, folgt aus Gleichung (B.4), Gleichung (B.7) und Gleichung (B.9):

$$k\mathbf{R}_c^T \mathbf{Q} \mathbf{R}_c = \mathbf{Q}_c \quad (\text{B.10})$$

Um \mathbf{R}_c und \mathbf{Q}_c zu bestimmen, wird zunächst \mathbf{Q} in eine Diagonalmatrix überführt. Hierfür werden normierten Eigenvektoren von \mathbf{Q} , $\mathbf{v}_1 = (v_{1x} v_{1y} v_{1z})^T$, $\mathbf{v}_2 = (v_{2x} v_{2y} v_{2z})^T$ und $\mathbf{v}_3 = (v_{3x} v_{3y} v_{3z})^T$ bestimmt und \mathbf{Q} wie folgt dargestellt:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^T, \quad (\text{B.11})$$

mit

$$\begin{cases} \mathbf{\Lambda} = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\} \\ \mathbf{V} = (\mathbf{v}_1 \mathbf{v}_2 \mathbf{v}_3). \end{cases} \quad (\text{B.12})$$

Einsetzen von \mathbf{Q} von Gleichung (B.11) in Gleichung (B.10) ergibt:

$$k\mathbf{R}_c^T \mathbf{\Lambda} \mathbf{R}_c = \mathbf{Q}_c, \quad (\text{B.13})$$

wobei

$$\mathbf{R}_c = \begin{pmatrix} r_{1x} & r_{2x} & r_{3x} \\ r_{1y} & r_{2y} & r_{3y} \\ r_{1z} & r_{2z} & r_{3z} \end{pmatrix} = \mathbf{V}^T \mathbf{R}_c. \quad (\text{B.14})$$

Aus Gleichung (B.13) ergeben sich folgende Gleichungen:

$$\begin{cases} \lambda_1 (r_{1x}^2 - r_{2x}^2) + \lambda_2 (r_{1y}^2 - r_{2y}^2) + \lambda_3 (r_{1z}^2 - r_{2z}^2) = 0 \\ \lambda_1 r_{1x} r_{2x} + \lambda_2 r_{1y} r_{2y} + \lambda_3 r_{1z} r_{2z} = 0 \end{cases} \quad (\text{B.15})$$

Ohne Verlust der Allgemeingültigkeit nehmen wir an, dass

$$\begin{cases} \lambda_1 \lambda_2 > 0 \\ \lambda_1 \lambda_3 < 0 \\ |\lambda_1| \geq |\lambda_2|. \end{cases} \quad (\text{B.16})$$

Eine Vereinfachung der Gleichung (B.15) und $\mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{I}$ erhält man

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} g \cos \alpha_1 & S_1 g \sin \alpha_1 & S_2 h \\ \sin \alpha_1 & -S_1 \cos \alpha_1 & 0 \\ S_1 S_2 h \cos \alpha_1 & S_2 h \sin \alpha_1 & -S_1 g, \end{pmatrix} \quad (\text{B.17})$$

wobei α_1 eine freie Variable, S_1 und S_2 undefinierte Vorzeichen und

$$\begin{cases} g = \sqrt{\frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_1 - \lambda_3}} \\ h = \sqrt{\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_3}} \end{cases} \quad (\text{B.18})$$

gilt.

Setzt man Gleichung (B.17) für \mathbf{R} in Gleichung (B.13), können die Elemente von \mathbf{Q} bestimmt werden:

$$\begin{cases} k = \lambda_2 \\ \frac{x_0}{z_0} = -S_2 \frac{\sqrt{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_2 - \lambda_3)} \cos \alpha_1}{\lambda_2} \\ \frac{y_0}{z_0} = -S_1 S_2 \frac{\sqrt{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_2 - \lambda_3)} \sin \alpha_1}{\lambda_2} \\ \frac{r^2}{z_0^2} = \frac{\lambda_1 \lambda_3}{\lambda_2^2} \end{cases} \quad (\text{B.19})$$

Da die z -Achse des Hilfskoordinatensystems der Normalvektor \mathbf{N} der Kreisfläche ist, kann \mathbf{N} und der Mittelpunkt des Kreises \mathbf{C} in Kamerakoordinaten berechnet werden:

$$\begin{cases} z_0 = S_3 \frac{\lambda_2 r}{\sqrt{-\lambda_1 \lambda_3}} \\ \mathbf{C} = z_0 \mathbf{V} \mathbf{R} \begin{pmatrix} x_0/z_0 \\ y_0/z_0 \\ 1 \end{pmatrix} = z_0 \mathbf{V} \begin{pmatrix} S_2 \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \sqrt{\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_3}} \\ 0 \\ -S_1 \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_1 - \lambda_3}} \end{pmatrix}, \\ \mathbf{N} = \mathbf{V} \mathbf{R} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{V} \begin{pmatrix} S_2 \sqrt{\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_3}} \\ 0 \\ -S_1 \sqrt{\frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_1 - \lambda_3}} \end{pmatrix} \end{cases} \quad (\text{B.20})$$

wobei S_3 ein weiteres unbekanntes Vorzeichen ist.

Für die Berechnung der Kreisebene im Kamerakoordinatensystem sind folglich nur die Eigenvektoren von \mathbf{Q} erforderlich. Undefiniert bleiben dabei die drei Vorzeichen S_1 , S_2 und S_3 . Grund hierfür ist, dass die Kreisfläche vor und hinter der Kamera liegen kann und die Kreisebene durch zwei Normalvektoren beschrieben werden kann. Definiert man den Ort der Kreisfläche vor der Kamera und den Normalvektor der Kreisfläche in Richtung Kamera, bleiben nur zwei Sets von mögliche Lösungen für \mathbf{N} und \mathbf{C} bestehen. Im Anwendungsfall einer auf dem Boden positionierten Kamera, die welche die Rotationsebene einer WEA betrachtet, verläuft der Normalvektor der Rotorebene immer über der Kamera und kann somit eingegrenzt werden. Es verbleibt eine eindeutige Lösung, mit der aus der zweidimensionalen ellipsenförmigen Projektion der Rotorebene im Kamerabild die Lage und Ausrichtung der Rotorebene im Kamerakoordinatensystem

berechnet werden kann.

Transformation 3D-Kreisbahn auf 2D-Ellipse

Im folgenden wird eine algebraische Lösung nach Matsuoka et al. [Mat2016] vorgestellt, mit der die ellipsenförmige perspektivische Projektion eines Kreises auf der Kameraebene berechnet werden kann. Es sei das Kamerakoordinatensystem XYZ . Voraussetzung für die Berechnung ist, dass die Brennweite f des optischen Systems, der normierte Normalvektor $\mathbf{N} = [l, m, n]^T$ der Kreisebene, der Kreismittelpunkt $\mathbf{C} = (X_c, Y_c, Z_c)$ und der Kreisradius r bekannt sind. Die Kreisebene \mathbf{H} ist definiert als

$$\mathbf{H} : l(X - X_c) + m(Y - Y_c) + n(Z - Z_c) = 0, \quad (\text{B.21})$$

wobei gilt: $l^2 + m^2 + n^2 = 1$.

Es wird ein Hilfskoordinatensystem $X'Y'Z'$ definiert, dessen z' -Achse parallel zum Normalvektor \mathbf{N} der Ebene \mathbf{H} verläuft. Die Transformation ist dann definiert als:

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 \\ 1 & \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}. \quad (\text{B.22})$$

Da die Ausrichtung des Hilfskoordinatensystems so gewählt ist, dass die z' -Achse parallel zum Normalvektor \mathbf{N} verläuft, können die Rotationswinkel α_1 und β wie folgt bestimmt werden:

$$\begin{cases} \alpha_1 &= \tan^{-1} \left(\frac{m}{\sqrt{l^2 + n^2}} \right) \\ \beta &= -\tan^{-1} \left(\frac{l}{n} \right). \end{cases} \quad (\text{B.23})$$

Für die folgenden Schritte wird die Transformation durch die Transformationsmatrix

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 \\ 1 & \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \quad (\text{B.24})$$

beschrieben.

Es sei ein Punkt $\mathbf{K} = (X_K, Y_K, Z_K)^T$ auf dem Kreis der Kreisebene \mathbf{H} , der auf die Bildebene mit dem Koordinatensystem xy projiziert wird, dann ergibt sich:

$$\begin{cases} (x_K \ y_K \ -f)^T &= k_K (X_K \ Y_K \ z_K)^T \\ k_K &= -\frac{f}{Z_K} \end{cases} \quad (\text{B.25})$$

Mit Hilfe der Transformation \mathbf{T} können diese Koordinaten in das Hilfskoordinatensystem überführt werden:

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} X'_K \\ Y'_K \\ Z'_K \end{pmatrix} &= \frac{1}{k_K} \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_K \\ y_K \\ -f \end{pmatrix} \\ \frac{1}{k_K} &= \frac{Z'_K}{b_{31} x_K + b_{32} y_K - b_{33} f} \end{cases} \quad (\text{B.26})$$

Aus Gleichung (B.26) ergibt sich

$$\begin{pmatrix} X'_K \\ Y'_K \end{pmatrix} = \frac{Z'_K}{b_{31} x_K + b_{32} y_K - b_{33} f} \begin{pmatrix} b_{11} x_K + b_{12} y_K - b_{13} f \\ b_{21} x_K + b_{22} y_K - b_{23} f \end{pmatrix} \quad (\text{B.27})$$

Wird so der gesamte Kreis in das $X'Y'Z'$ -Koordinatensystem überführt, bewirkt die Transformation, dass der Normalvektor \mathbf{N} der Kreisebene \mathbf{H} parallel zur Z' -Achse verläuft. Für den so transformierten Mittelpunkt des Kreises $\mathbf{C} = (X'_C, Y'_C, Z'_C)$ und dem Kreisradius r gilt dann:

$$\begin{cases} (X'_K - X'_C)^2 + (Y'_K - Y'_C)^2 & = r^2 \\ Z'_K & = Z'_C \end{cases}, \quad (\text{B.28})$$

mit dem transformierten Mittelpunkt

$$\begin{pmatrix} X'_C \\ Y'_C \\ Z'_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{pmatrix} \quad (\text{B.29})$$

Einsetzen von Gleichung (B.27) in Gleichung (B.28) ergibt folglich:

$$\left(Z'_C \frac{b_{11}x_K + b_{12}y_K - b_{13}f}{b_{31}x_K + b_{32}y_K - b_{33}f} - X'_C \right)^2 + \left(Z'_C \frac{b_{21}x_K + b_{22}y_K - b_{23}f}{b_{31}x_K + b_{32}y_K - b_{33}f} - Y'_C \right)^2 = r^2 \quad (\text{B.30})$$

Eine Umformung von Gleichung (B.30) in eine generelle Ellipsengleichung führt zu:

$$Ax_e^2 + 2Bx_e y_e + Cy_e^2 + 2Dx_e + 2Ey_e + F = 0, \quad (\text{B.31})$$

mit

$$\begin{cases} A & = Z_C'^2 - 2(b_{11}b_{31}X'_C Z'_C + b_{21}b_{31}Y'_C Z'_C) + (X_C'^2 + Y_C'^2 - Z_C'^2 - r^2)b_{31}^2 \\ B & = -((b_{11}b_{32} + b_{31}b_{12})X'_C Z'_C + (b_{21}b_{32} + b_{31}b_{22})Y'_C Z'_C) + (X_C'^2 + Y_C'^2 - Z_C'^2 - r^2)b_{31}b_{32} \\ C & = Z_C'^2 - 2(b_{12}b_{32}X'_C Z'_C + b_{22}b_{32}Y'_C Z'_C) + (X_C'^2 + Y_C'^2 - Z_C'^2 - r^2)b_{32}^2 \\ D & = f((b_{11}b_{33} + b_{31}b_{13})X'_C Z'_C + (b_{21}b_{33} + b_{31}b_{23})Y'_C Z'_C) - (X_C'^2 + Y_C'^2 - Z_C'^2 - r^2)b_{31}b_{33} \\ E & = f((b_{12}b_{33} + b_{32}b_{13})X'_C Z'_C + (b_{22}b_{33} + b_{32}b_{23})Y'_C Z'_C) - (X_C'^2 + Y_C'^2 - Z_C'^2 - r^2)b_{32}b_{33} \\ F & = f^2(Z_C'^2 - 2(b_{13}b_{33}X'_C Z'_C + b_{23}b_{33}Y'_C Z'_C) + (X_C'^2 + Y_C'^2 - Z_C'^2 - r^2)b_{33}^2) \end{cases}. \quad (\text{B.32})$$

Einsetzen der Gleichungen (B.23), (B.24) und (B.29) in Gleichung (B.32) ergibt schlussendlich:

$$\begin{cases} A & = (l^2 + m^2)Y_C^2 + (n^2 + l^2)Z_C^2 + 2mnY_C Z_C - l^2 r^2 \\ B & = lmZ_C^2 - nlY_C Z_C - mnZ_C X_C - (l^2 + m^2)X_C Y_C - lmr^2 \\ C & = (l^2 + m^2)X_C^2 + (m^2 + n^2)Z_C^2 + 2nlZ_C X_C - m^2 r^2 \\ D & = f(-nlY_C^2 + lmY_C Z_C + (n^2 + l^2)Z_C X_C + mnX_C Y_C + nlr^2) \\ E & = f(-mnX_C^2 + (m^2 + n^2)Y_C Z_C + lmZ_C X_C + nlX_C Y_C + mnr^2) \\ F & = f^2((n^2 + l^2)X_C^2 + (m^2 + n^2)Y_C^2 + 2lmX_C Y_C - n^2 r^2) \end{cases} \quad (\text{B.33})$$

Damit ist die Ellipsengleichung (B.31) nur noch von dem Normalvektor $\mathbf{N} = [l, m, n]^T$ der Kreisebene, der Lage des Kreismittelpunktes $\mathbf{C} = (X_C, Y_C, Z_C)$, dem Kreisradius r und der Brennweite f der Kamera abhängig.

Rotor-Winkelposition

Abb. B.1 skizziert die Winkelposition eines Rotorblattes zwischen $[0, 2\pi]$. Der positive Drehsinn ist im Uhrzeigersinn definiert, wenn die Betrachtungsrichtung entlang der Windrichtung, also auf die Druckseite des Rotors, gerichtet ist. Der Nullpunkt beschreibt die senkrechte Lage des

Rotorblattes nach oben. Bei der Betrachtung der Saugseite bleiben die Positionen wie definiert. Der positive Drehsinn verläuft aus dieser Betrachtungsrichtung entgegen dem Uhrzeigersinn.

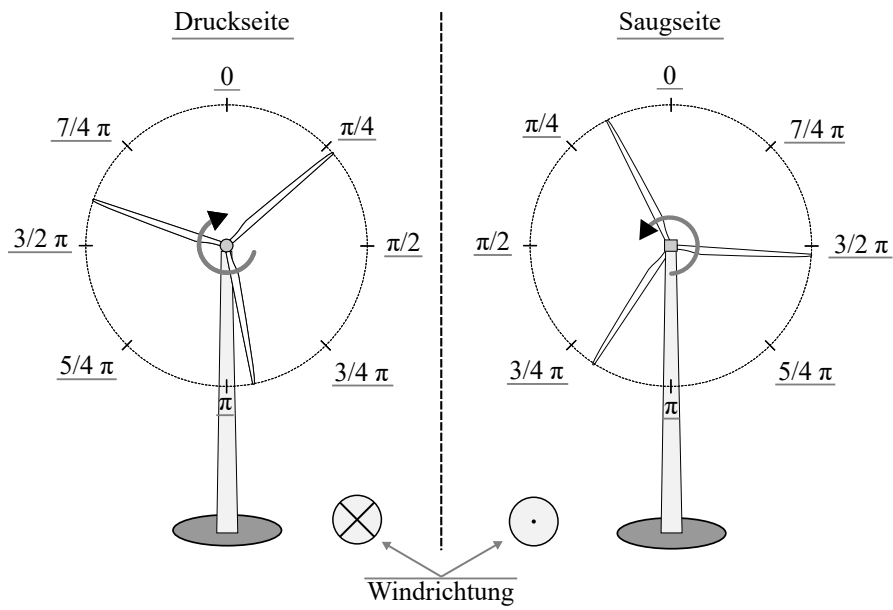


Abb. B.1.: Definition der Winkelposition eines Rotorblattes. Positiver Drehsinn im Uhrzeigersinn bei Blick entlang der Windrichtung, auf die Druckseite. Der Nullpunkt ist senkrecht nach oben.

C. Visualisierungsergebnisse

Windkanal (DU96W180) - hoher Kontrast

In diesem Experiment wurde eine Bildserie von $N = 1000$ Einzelaufnahmen mit einer Messfrequenz von $f = 20\text{Hz}$ aufgenommen und ausgewertet. Abb. C.1 zeigt die ersten fünf NNC und Abb. C.2 zeigt die ersten fünf PC der NNMF und PCA Auswertung und die zugehörigen Werte für das CNR. Die Unterscheidbarkeitsparameter der einzelnen Visualisierungen sind in Tab. C.1 und Tab. C.2 aufgelistet. Das maximale CNR der NNC Visualisierungen tritt in NNC 1 auf und hat einen Wert von $\text{CNR} = 2,80$. Diese Visualisierung hat auch die größten Werte der Unterscheidbarkeitsparameter D_{sys} und D_{rand} . Dem zu Folge wird NNC 1 als beste Visualisierung der NNMF Auswertung ausgewählt. Bei der PCA Auswertung liegt das Maximum des CNR in PC 1, obwohl das Maximum von D_{sys} in PC 2 zu finden ist. Das PC 1 ein deutlich höheres D_{rand} aufweist, wird diese Visualisierung als beste Strömungsvisualisierung der PCA Auswertung ausgewählt.

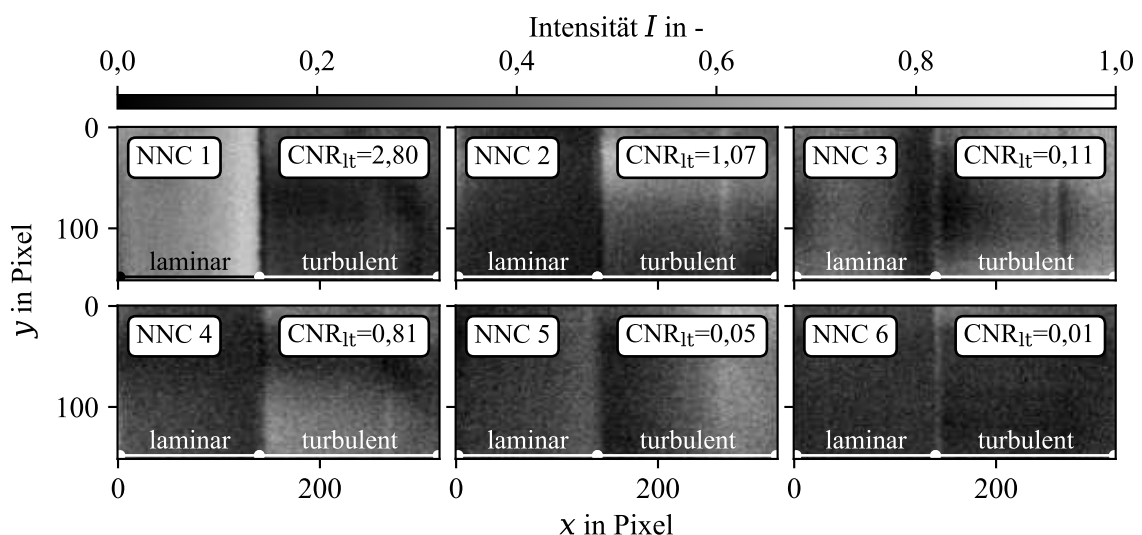


Abb. C.1.: Ergebnis der NNMF Auswertung der Bildserie mit $N = 1000$ Einzelaufnahmen und einer Messfrequenz von $f = 20\text{Hz}$ im DU96W180 (hoher Kontrast) Experiment. Maximales CNR zwischen laminarem und turbulenten Strömungsbereich in NNC 1.

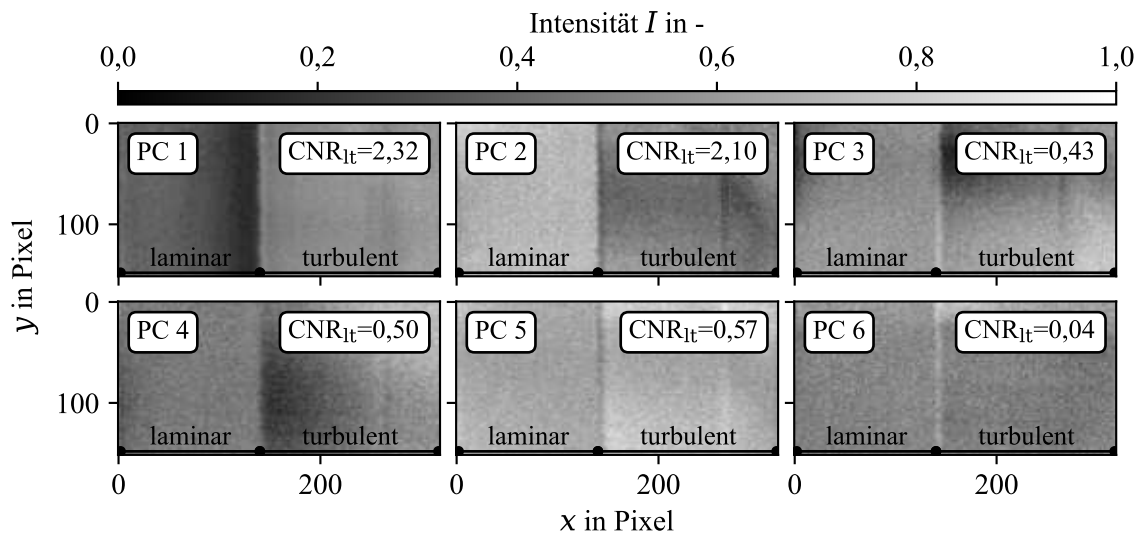


Abb. C.2.: Ergebnis der PCA Auswertung der Bildserie mit $N = 1000$ Einzelaufnahmen und einer Messfrequenz von $f = 20\text{Hz}$ im DU96W180 (hoher Kontrast) Experiment. Maximales CNR zwischen laminarem und turbulenten Strömungsbereich in PC 1.

	CNR	D_{sys}	D_{rand}
NNC 1	2,80	3,98	5,29
NNC 2	1,07	3,63	2,44
NNC 3	0,11	0,18	0,22
NNC 4	0,81	2,66	1,36
NNC 5	0,05	0,08	0,07
NNC 6	0,01	0,04	0,01

Tab. C.1.: CNR und Unterscheidbarkeitsparameter zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich in Abb. C.1

	CNR	D_{sys}	D_{rand}
PC 1	2,32	2,68	5,29
PC 2	2,10	6,81	3,04
PC 3	0,43	1,23	1,01
PC 4	0,50	0,89	0,91
PC 5	0,57	1,76	0,79
PC 6	0,04	0,12	0,05

Tab. C.2.: CNR und Unterscheidbarkeitsparameter zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich in Abb. C.2

Windkanal (DU96W180) - geringer Kontrast

Die Auswertung der NMF und PCA in Abb. C.3 und Abb. C.4, sowie die zugehörigen Unterscheidbarkeitsparameter in Tab. C.3 und Tab. C.4 zeigen auf, dass erweiterten Bildverarbeitungsverfahren der Merkmalsextraktion Visualisierungen mit hohem CNR zwischen der laminaren und turbulenten Strömung erzeugen. Ausgewertet wurde hierfür jeweils eine Bildserie von $N = 1000$ Einzelaufnahmen mit einer Aufnahme Frequenz von $f = 20\text{Hz}$. Ein maximales CNR ist jeweils in NNC1 und PC 1 zu verzeichnen. In beiden Visualisierungen sind auch die Werte für D_{sys} und D_{rand} maximal, was darauf hindeutet, dass sowohl das Auftreten von Gradienten, als auch Rauschen gegenüber dem vorherrschenden Kontrast der mittleren Intensitäten gesteigert wurde. Aus diesem Grund werden diese beiden Visualisierungen aus den Ergebnissen ausgewählt und im weiteren mit den Ergebnissen der klassischen Verfahren verglichen.

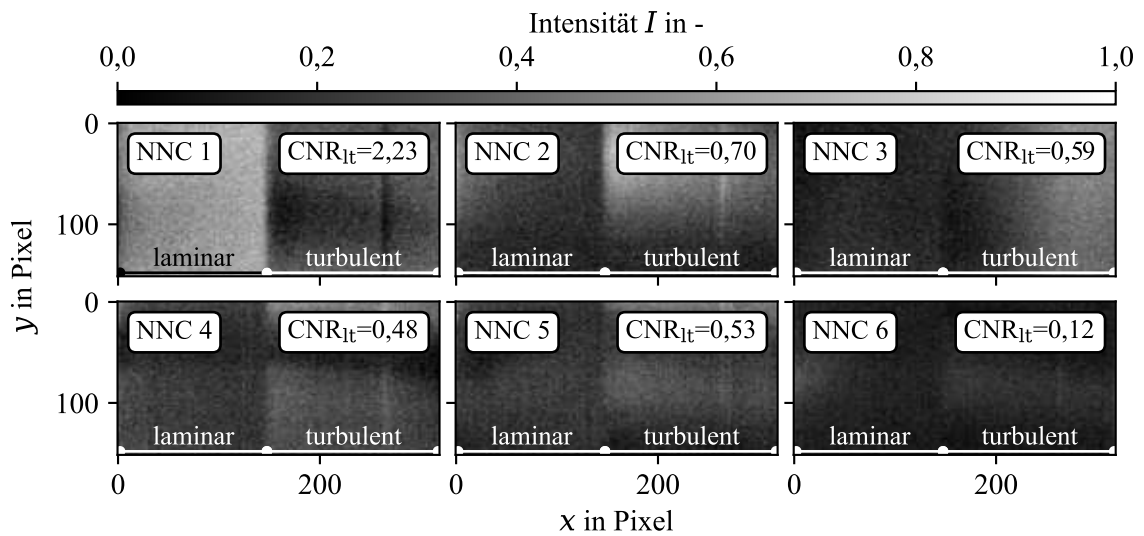


Abb. C.3.: Ergebnis der NNMf Auswertung der Bildserie im DU96W180 (niedriger Kontrast) Experiment. Maximales CNR, D_{sys} und D_{rand} zwischen laminarem und turbulenten Strömungsbereich in NNC 1.

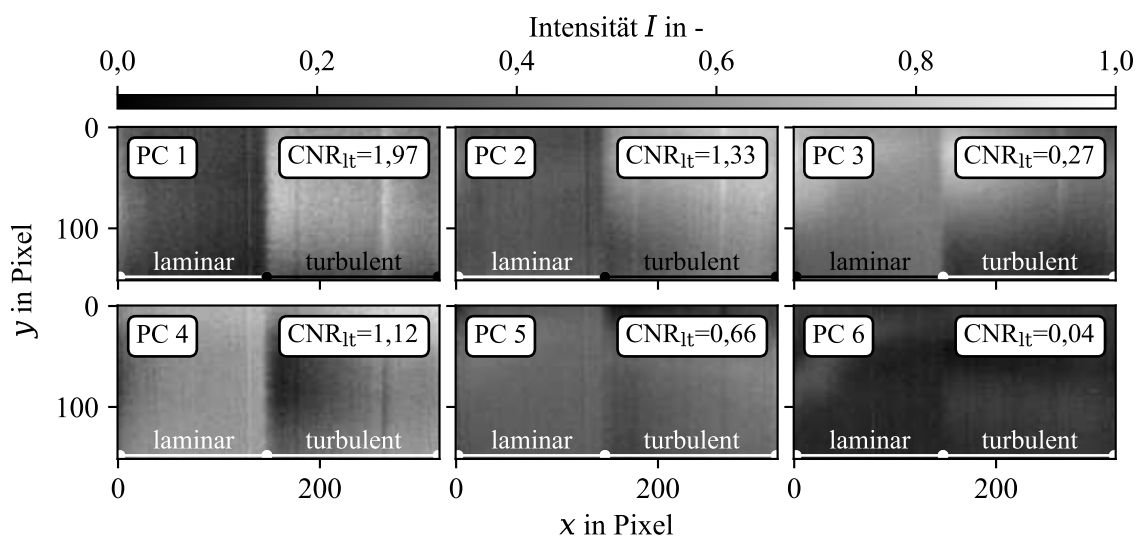


Abb. C.4.: Ergebnis der PCA Auswertung der Bildserie im DU96W180 (geringer Kontrast) Experiment. Maximales CNR, D_{sys} und D_{rand} zwischen laminarem und turbulenten Strömungsbereich in PC 1.

	CNR	D_{sys}	D_{rand}
NNC 1	2,23	5,37	3,49
NNC 2	0,70	2,40	1,76
NNC 3	0,59	0,94	0,90
NNC 4	0,48	1,69	0,75
NNC 5	0,53	1,75	0,80
NNC 6	0,12	0,31	0,17

Tab. C.3.: CNR und Unterscheidbarkeitsparameter zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich in Abb. C.3

	CNR	D_{sys}	D_{rand}
PC 1	1,97	4,78	4,55
PC 2	1,33	4,16	3,73
PC 3	0,27	1,02	1,49
PC 4	1,12	1,97	3,43
PC 5	0,66	1,66	1,60
PC 6	0,04	0,08	0,08

Tab. C.4.: CNR und Unterscheidbarkeitsparameter zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich in Abb. C.4

Freifeld - 1

In Abb. C.5 und Abb. C.6 sind die aus der NNMF und PCA Auswertung resultierenden Visualisierungen dargestellt. Ausgewertet wurde eine Bildserie von $N = 80$ Einzelaufnahmen, die mit dem in Abschnitt 3.2 beschriebenen Triggersystem einmal pro Umdrehung des Rotors getriggert wurden und daher in eine Messfrequenz von $f = 0,3\text{Hz}$ resultieren.

In einigen NNC und PC Visualisierungen sind deutlich zwei voneinander zu unterscheidende Bereiche zu erkennen. Das größte CNR zwischen der laminaren und turbulenten Strömung liegt bei der NNMF in NNC3 mit 5,27 und bei der PCA in PC3 mit 5,49. Die maximalen Werte für D_{sys} sind ebenfalls in den jeweiligen Visualisierungen zu finden. Das jeweils Maximale D_{rand} liegt in NNC1 und PC1, vgl. Tab. C.5 und vgl. Tab. C.6.

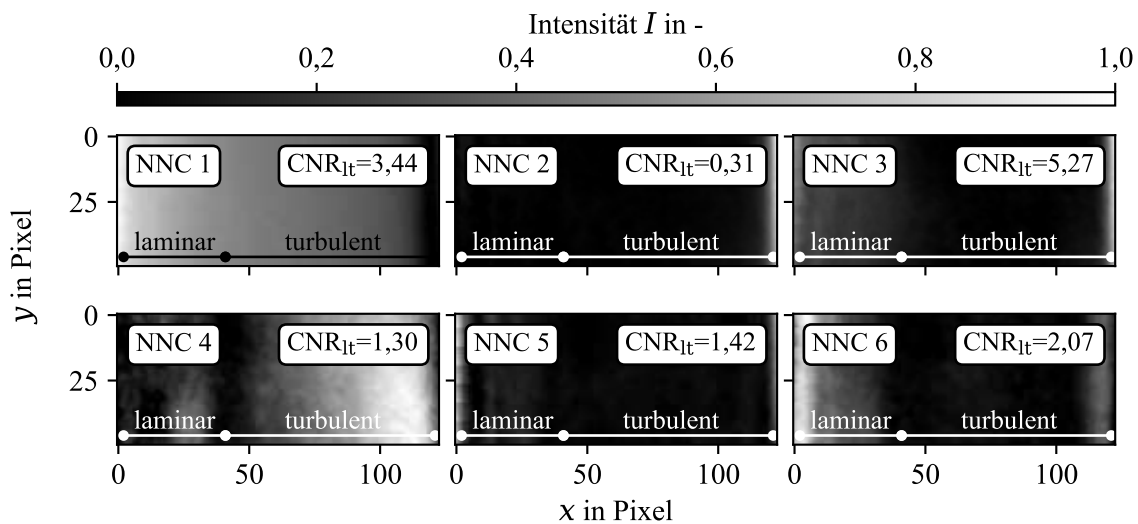


Abb. C.5.: Ergebnis der NNMF Auswertung der Bildserie mit $N = 80$ Einzelaufnahmen und einer Messfrequenz von $f = 0,3\text{Hz}$ im Freifeld-Experiment Nr. 1. Maximales CNR und D_{sys} zwischen laminarem und turbulenten Strömungsbereich in NNC 3.

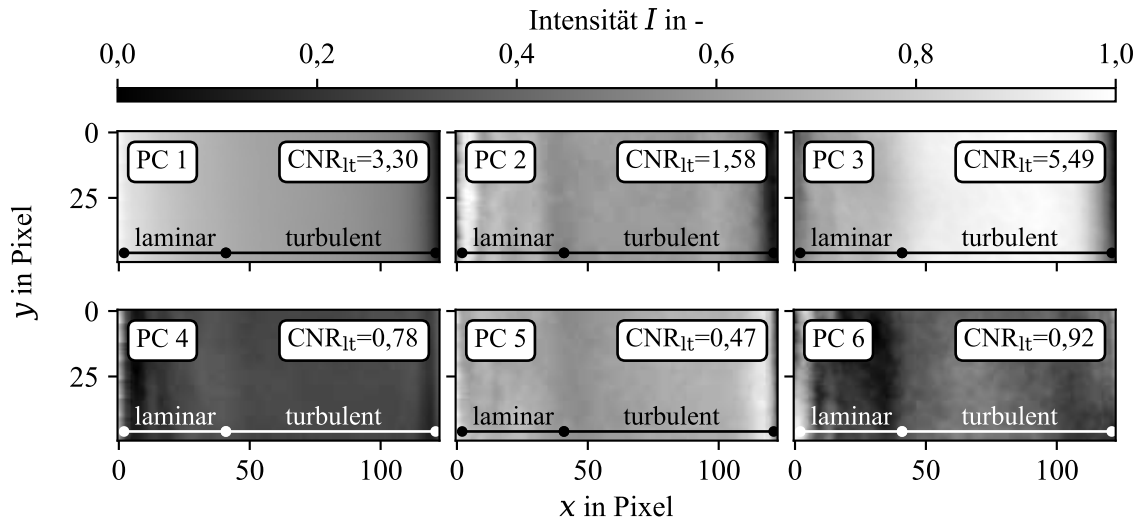


Abb. C.6.: Ergebnis der PCA Auswertung der Bildserie mit $N = 80$ Einzelaufnahmen und einer Messfrequenz von $f = 0,3\text{Hz}$ im Freifeld-Experiment Nr. 1. Maximales CNR und D_{sys} zwischen laminarem und turbulenten Strömungsbereich in PC 3.

	CNR	D_{sys}	D_{rand}
NNC 1	3,44	3,85	20,50
NNC 2	0,31	0,68	0,55
NNC 3	5,27	7,56	16,20
NNC 4	1,30	1,47	6,16
NNC 5	1,42	3,33	2,00
NNC 6	2,07	2,67	6,44

Tab. C.5.: CNR und Unterscheidbarkeitsparameter zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich in Abb. C.5

	CNR	D_{sys}	D_{rand}
PC 1	3,30	3,67	24,97
PC 2	1,58	3,19	2,33
PC 3	5,49	7,95	17,99
PC 4	0,78	0,99	2,22
PC 5	0,47	0,63	1,23
PC 6	0,92	1,43	1,96

Tab. C.6.: CNR und Unterscheidbarkeitsparameter zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich in Abb. C.6

Freifeld - 2

In Abb. C.7 ist eine weitere thermografische Strömungsvisualisierung aus einer Freifeldmessung an der gleichen WEA bei höherer Sonneneinstrahlung dargestellt. In dieser Aufnahme lässt sich die laminar-turbulente Transition anhand eines deutlichen Abfalls der Intensität in Strömungsrichtung bei ca. $\frac{1}{3}$ der Strecke zwischen Vorder- und Hinterkante erkennen. Als Referenzposition für die laminar-turbulente Transition dient ebenfalls die Annahme $x_{\text{tr,ref}} = 33,33\%c = 54$ Pixel. Das CNR_{lt} zwischen der laminaren und turbulenten Strömung beträgt in dieser Messung $\text{CNR}_{\text{lt}} = 2,57$.

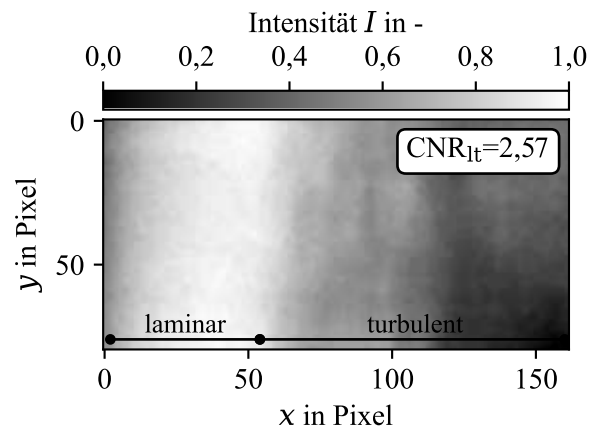


Abb. C.7.: Thermografische Strömungsvisualisierung der laminaren und turbulenten Strömung auf einem Rotorblatt an einer WEA in Betrieb. Strömungsrichtung von links nach rechts. Das CNR_{lt} zwischen den Strömungsbereichen beträgt 2,57.

Strömungsvisualisierung

Für Anwendung der Bildverarbeitungsmethoden wird erneut eine Bildserie aus $N = 80$ Einzelaufnahmen mit einer Messfrequenz von ca. $f = 0,3\text{Hz}$ ausgewertet. Obwohl der Kontrast in der Einzelaufnahme bei dieser Messung ausreichend ist, um zwei Strömungsbereiche voneinander unterscheiden zu können, ist es möglich durch Anwendung der NMF und PCA Strömungsvisualisierungen mit gesteigertem CNR zu erzeugen. So weist NNC 6 und PC 2 in Abb. C.8 und Abb. C.9 ein CNR von 6,00 und 6,93 auf. Die Unterscheidbarkeitsparameter D_{rand} für die Visualisierungen sind ebenfalls in diesen beiden Visualisierungen maximal, vgl. C.7 und C.8.

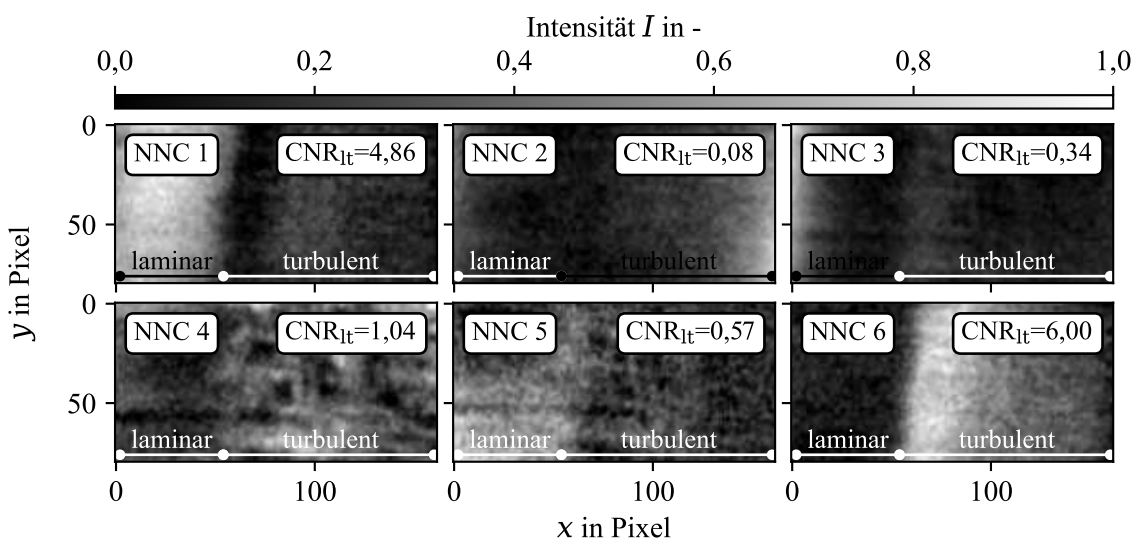


Abb. C.8.: Ergebnis der NMF Auswertung der Bildserie mit $N = 80$ Einzelaufnahmen und einer Messfrequenz von $f = 0,3\text{Hz}$ im Freifeld-Experiment Nr. 2. Maximales CNR und D_{sys} zwischen laminarem und turbulenten Strömungsbereich in NNC 6.

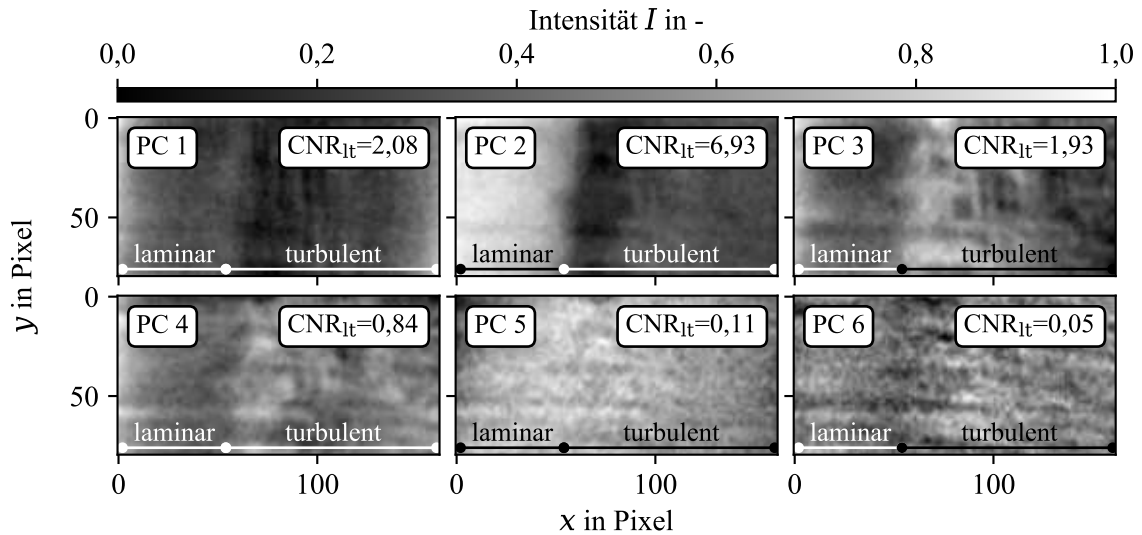


Abb. C.9.: Ergebnis der PCA Auswertung der Bildserie mit $N = 80$ Einzelaufnahmen und einer Messfrequenz von $f = 0,3\text{Hz}$ im Freifeld-Experiment Nr. 2. Maximales CNR und D_{sys} zwischen laminarem und turbulenten Strömungsbereich in PC 2.

	CNR	D_{sys}	D_{rand}
NNC 1	4,86	6,84	15,52
NNC 2	0,08	0,13	0,16
NNC 3	0,34	0,45	1,00
NNC 4	1,04	2,12	2,32
NNC 5	0,57	1,84	1,26
NNC 6	6,00	10,41	12,01

Tab. C.7.: CNR und Unterscheidbarkeitsparameter zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich in Abb. C.8

	CNR	D_{sys}	D_{rand}
PC 1	2,08	3,31	4,41
PC 2	6,93	9,65	22,25
PC 3	1,93	3,84	4,86
PC 4	0,84	1,50	2,38
PC 5	0,11	0,23	0,23
PC 6	0,05	0,11	0,12

Tab. C.8.: CNR und Unterscheidbarkeitsparameter zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich in Abb. C.9

Die Ergebnisse der NMF und PCA werden in Anhang C dargestellt. Die für den folgenden Vergleich ausgewählte Strömungsvisualisierung wird anhand des maximalen CNR_{lt} ausgewählt. Für Anwendung der Bildverarbeitungsmethoden wird erneut eine Bildserie aus $N = 80$ Einzelaufnahmen mit einer Messfrequenz von ca. $f = 0,3\text{Hz}$ ausgewertet. Analog zu den vorherigen Ergebnissen erreicht die MW-Bildung eine Reduzierung des Bildrauschens und erhöht damit das CNR_{lt} auf einen Wert von 3,02. Die STA Visualisierung weißt hingegen keine Informationen über die räumliche Verteilung der Strömungszustände auf, weshalb das CNR_{lt} noch geringer als in der Einzelaufnahme ausfällt. Ein Blick auf die Tab. C.9, zeigt auf, dass die NNC 6 und PC 2 Visualisierung deutlich gesteigerte Werte für das CNR_{lt} , D_{sys} und D_{rand} aufweisen. Der maximale Wert für CNR_{lt} und D_{rand} liegen hierbei in PC 2, während das maximale D_{sys} in der NNC 6 Visualisierung zu verzeichnen ist.

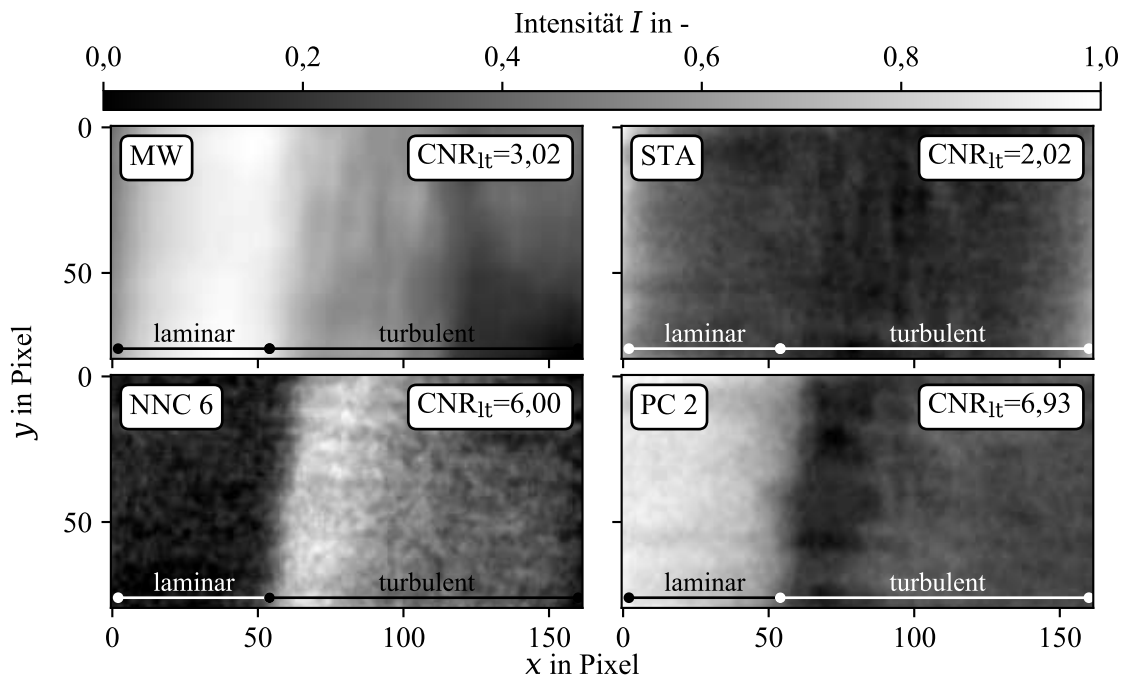


Abb. C.10.: Vergleich der Strömungsvisualisierungen resultierend aus den klassischen Auswertemethoden der MW-Bildung und der zeitlichen Standardabweichung (STA), sowie den erweiterten Methoden der Merkmalsextraktion NMF (NNC) und PCA (PC). Das maximale CNR_{lt} und D_{rand} zwischen der laminaren und turbulenten Strömung kann im Ergebnis der PCA mit 6,93, und 22,25 verzeichnet werden. Das maximale D_{syst} existiert in NNC 6 mit 10,41.

Tab. C.9.: CNR_{lt} und Unterscheidbarkeitsparameter zwischen dem laminaren und turbulenten Strömungsbereich in Abb. C.10.

	CNR_{lt}	D_{syst}	D_{rand}
MW	3,02	3,69	15,18
STA	2,02	2,79	5,05
NNC 6	6,00	10,41	12,01
PC 2	6,93	9,65	22,25

Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition

Eine Auswertung der Intensitätsverläufe in Abb. C.11 verdeutlicht den Vorteil einer Lokalisierung der Transition in der NNC 6 und PC 2 Visualisierung. Zwei deutlich voneinander zu unterscheidende Intensitätsniveaus mit starken Gradienten im Bereich der laminar-turbulente Transition ermöglichen eine Lokalisierung mit den beiden Approximationsverfahren mit minimaler Abweichung von der Referenzposition. Die Intensitätsstufe zwischen den Strömungsbereichen ist in den Visualisierungen der erweiterten Methoden deutlich höher, als in der MW Visualisierung, was eine geringere zufällige Abweichung bedeutet.

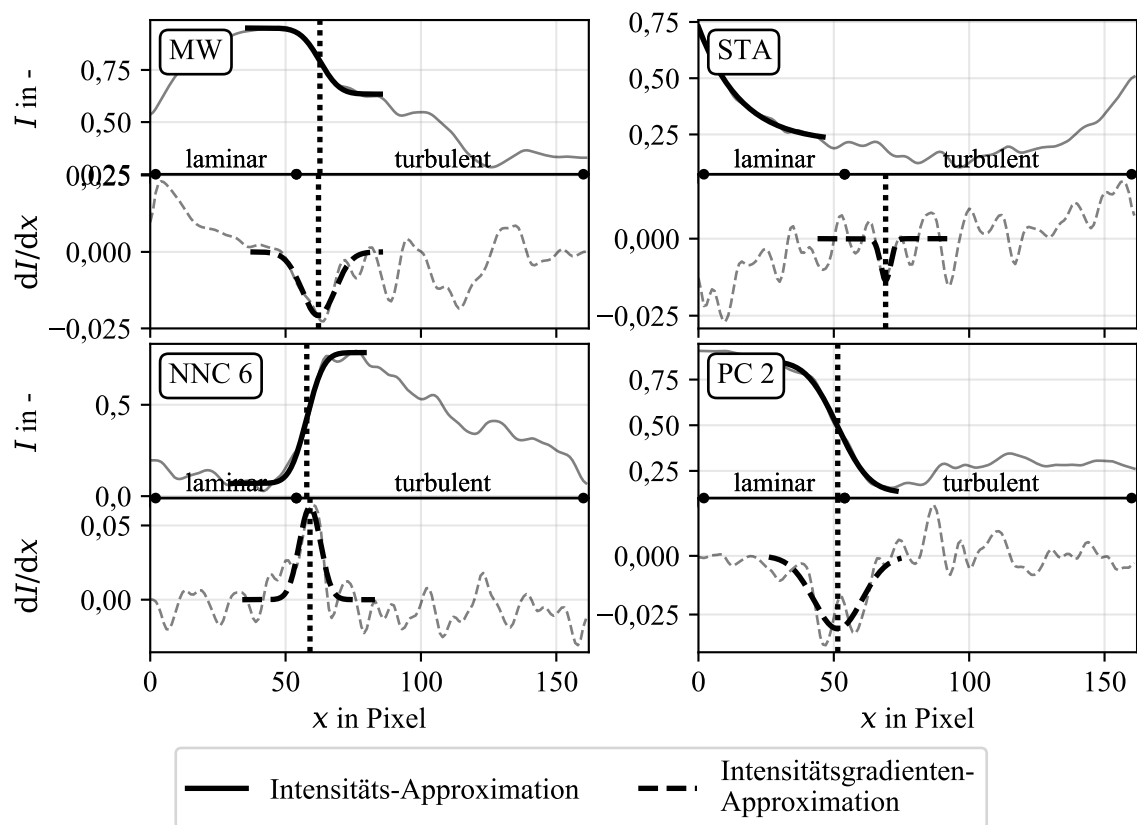


Abb. C.11.: Verlauf der Intensität I und zugehörigen Gradienten dI/dx der mittleren Bildzeile in den Strömungsvisualisierungen in Abb. C.10. In fett dargestellt sind die Approximationen der Verläufe als Ergebnis der eingeführten Lokalisierungsverfahren mit zweifacher Iteration, vgl. Abschnitt 2.6.1. Die Position der lokalisierten Transition ist mit einer vertikalen gepunkteten Linie eingezeichnet.

Veröffentlichungsliste des Autors

Zeitschriften mit Peer-Review

Gleichauf, D.; Dollinger, C.; Balaesque, N.; Gardner, A.D.; Sorg, M.; Fischer, A.: Thermographic flow visualization by means of non-negative matrix factorization. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 82:108528 (2020)

Gleichauf, D.; Sorg, M.; Fischer, A.: Contactless localization of premature laminar-turbulent flow transitions on wind turbine rotor blades in operation. *Applied Sciences* 10(18):6552 (2020)

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

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

Parrey, A.-M.; Gleichauf, D.; Sorg, M.; Fischer, A.: Automated Detection of Premature Flow Transitions on Wind Turbine Blades Using Model-Based Algorithms. *Applied Sciences* 11:8700 (2021)

Dollinger, C.; Balaesque, N.; Gaudern, N.; Gleichauf, D.; Sorg, M.; Fischer, A.: IR thermographic flow visualization for the quantification of boundary layer flow disturbances due to the leading edge condition. *Renewable Energy* 138:709-721 (2019)

Tagungsbeiträge

Gleichauf, D.; Jacob, D.; Sorg, M.; Fischer, A.: Advanced image processing for turbulence wedge detection in thermographic flow visualization. *Journal of Physics: Conference Series* 1618:032029 (2020)

Zeitschriften ohne Peer-Review

Dollinger, C.; Gleichauf, D.; Balaesque, N.; Fischer, A.: Messung des strömungsbeeinflussenden Kontaminationsgrads von Rotorblättern mittels thermografischer Strömungsvisualisierung. *tm – Technisches Messen* 85 (S1) (2018)

Renken, V.; Gleichauf, D.; Pastors, F.; Lübbert, L.; von Freyberg, A.; Fischer, A.: Reducing process variation within powder bed fusion by a closed-loop control in real-time. *Lasers in Manufacturing Conference*, (2019)

Fischer, A.; Gleichauf, D.; Balaesque, N.; Sorg, M.; Gaudern, N.; Dollinger, C.: Thermografische Strömungsvisualisierung zur Bewertung des realen Strömungsverhaltens von Windenergie rotorblättern. *Conference: 27. Fachtagung „Experimentelle Strömungsmechanik“* (2019)

Gleichauf, D.; Sorg, M.; Fischer, A.: Lokalisierung der laminar-turbulenten Transition mittels thermografischer Strömungsvisualisierung und Hauptkomponentenanalyse. *Conference: 28. Fachtagung „Experimentelle Strömungsmechanik“* (2022)

Betreute studentische Arbeiten

In der vorliegenden Arbeit sind Ergebnisse enthalten, die im Rahmen der Betreuung und Begutachtung folgender studentischer Arbeiten entstanden sind:

- Poeck, N.:
Kontraststeigerung in Messungen zur thermografischen Strömungsvisualisierung durch Merkmalextraktion von Bildinformationen.
Bachelorarbeit, Universität Bremen (2018)
- Jakob, D.:
Verteilung der laminar-turbulenten Transition auf Rotoren von Windenergieanlagen.
Masterarbeit, Universität Bremen (2019)
- Poeck, N.:
Optische Detektion der Rotordrehbewegung von Windenergieanlagen in Betrieb.
Masterarbeit, Universität Bremen (2020)

Darüber hinaus wurden folgende studentische Arbeiten während der Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Universität Bremen betreut:

- Nieto Belano, A.:
Analyse des Kontaminationsgrades an Rotorblättern von Windenergieanlagen im Betrieb.
Masterarbeit, Universität Bremen (2019)
- Tiefensee, J.:
Automatisiertes Entzerren und Zusammensetzen von Einzelaufnahmen für die thermografische Strömungsvisualisierung.
Bachelorarbeit, Universität Bremen (2020)
- Ohlrogge, C.:
Messung von quasi-stationären Strömungszuständen an Windenergieanlagen in Betrieb.
Bachelorarbeit, Universität Bremen (2021)