

Thermografische Strömungsvisualisierung zur Bewertung des realen Strömungsverhaltens von Windenergierotorblättern

Thermographic flow visualization for evaluation of the actual flow behaviour of wind turbine rotor blades

Andreas Fischer¹, Daniel Gleichauf¹, Nicholas Balaesque², Michael Sorg¹, Nicholas Gaudern³, Christoph Dollinger¹

¹ Universität Bremen, BIMAQ, Linzer Str. 13, 28359 Bremen, E-Mail: andreas.fischer@bimaq.de

² Deutsche WindGuard Engineering GmbH, Überseering 7, 27580 Bremerhaven

³ Power Curve ApS, Stationsmestervej 81, 9200 Aalborg, Dänemark

Windenergie, Kontamination, Erosion, laminar-turbulente Transition, thermografische Strömungsvisualisierung

wind energy, contamination, erosion, laminar-turbulent transition, thermographic flow visualization

Zusammenfassung

Kontamination und Erosion an der Rotorblattvorderkante von Windenergieanlagen verringern den Auftrieb und erhöhen den Widerstand der aerodynamischen Profile, was sich negativ auf den Gesamtwirkungsgrad der Windenergieanlage auswirkt. Um den Einfluss auf den Wirkungsgrad zu quantifizieren bedarf es In-Prozess-Messungen der Grenzschichtströmung am Rotorblatt, wobei die bisher eingesetzten Messmethoden die Rotorblattoberfläche zerstören oder auf die zu messende Grenzschichtströmung rückwirken. Daher wird eine nicht-invasive berührungslose Messmethode auf Basis der thermografischen Strömungsvisualisierung vorgestellt, wobei aufbauend auf einem Positionsvergleich der laminar-turbulenten Transition mit und ohne Vorderkantenkontamination der Parameter LEC (leading edge condition) als ein quantitatives Maß der strömungsbeeinflussenden Rotorblattkontamination und -erosion eingeführt wird. Die gemessene Änderung der Transitionsposition findet anschließend in Strömungssimulationen Eingang, um die Verringerung des jährlichen Energieertrags zu berechnen. Das Verfahren wird anhand von zwei Messungen an einem Rotorblatt mit unterschiedlichen Kontaminationsgraden vorgestellt. Dabei wurde für den Fall der stark kontaminierten Oberfläche ein Kontaminationsgrad von max. LEC = 90 % und für den schwach kontaminierten Fall von max. LEC = 5 % bestimmt. Die resultierende Verringerung des jährlichen Energieertrags beträgt 4,7 % bzw. 0,2 %.

1. Einleitung

Die Vorderkantenbeschaffenheit der Rotorblätter von Windenergieanlagen (WEA) hat einen wesentlichen Einfluss auf ihre aerodynamischen Eigenschaften und damit auf die Effizienz der Umwandlung der Bewegungskraft des Windes in die Rotationskraft des Rotors [1, 11]. Den rauen Umweltbedingungen im Freifeld ausgesetzt, leiden die Rotorblätter von sich in Betrieb befindlichen WEA unter dem Einfluss von Insektenflug, Salz- und Schmutzablagerungen sowie Regen und Hagelschlag [2-4]. Die resultierende dauerhafte oder vorüberge-

hende Beeinflussung der Oberflächenrauheit beeinträchtigt die oberflächennahe Grenzschichtströmung des Rotorblattes und bewirkt einen verfrühten laminar-turbulenten Übergang (Transition), welcher einen größeren leistungshemmenden Strömungswiderstand zur Folge hat [4,5]. Bis dato existiert keine zuverlässige Methode um das Maß der Oberflächenbeeinflussung durch Kontamination oder Erosion an WEA in Betrieb zu messen und den daraus entstehenden Leistungsverlust zu quantifizieren.

Da die Bestimmung der laminar-turbulenten Transition mittels thermografischer Strömungsvisualisierung an sich in Betrieb befindlichen WEA nicht-invasiv und berührungslos möglich ist, sollen Positionen der natürlich auftretenden Transition und der durch Kontamination verfrüht auftretenden Transition thermografisch gemessen, miteinander verglichen und damit der strömungsbeeinflussende Kontaminationsgrad quantifiziert werden. Entgegen herkömmlicher Verfahren der Strömungsvisualisierung bzw. -messung bedarf eine thermografische Messung keiner aufwendigen Präparation, Modifikation oder gar dauerhaften Zerstörung der Rotorblattoberfläche [6-8] und ist auch für Freifeldmessungen geeignet [9]. Über eine Strömungssimulation wird der durch die Oberflächenkontamination hervorgerufene Abfall des Auftriebskoeffizienten und Anstieg des Widerstandskoeffizienten des Rotors bestimmt. Mit Hilfe der berechneten Unterschiede dieser Leistungskoeffizienten wird anschließend durch Anwendung einer Blade-Element-Momentum (BEM) Simulation die Verringerung des jährlichen Energieertrags (engl.: Annual Energy Production, AEP) berechnet [10].

Eine detailliertere Beschreibung der thermografischen Strömungsvisualisierung, die sich aus der Transitionsposition ergebene Quantifizierung des Kontaminationsgrads sowie die Zuordnung der Bildinformationen auf die tatsächliche Profilgeometrie sind in Abschnitt 2 gegeben. In Abschnitt 3 wird der Messaufbau zweier Messungen der gleichen Oberfläche bei variierender Oberflächenkontamination an einer 1,5 MW WEA im Betrieb vorgestellt. Abschnitt 4 behandelt die Messergebnisse der Transitionspositionen entlang eines vollständigen Rotorblatts sowie den daraus berechneten Kontaminationsgrad und die resultierende Verringerung des AEP. Abschließend werden in Abschnitt 5 die Ergebnisse resümiert und ein Ausblick auf weiterführende Forschungsarbeiten gegeben.

2. Messansatz

Die strömungsbeeinflussende Kontamination der Rotorblattvorderkante soll durch den LEC-Wert (Leading Edge Condition)

$$\text{LEC} = 1 - \frac{P_{\text{tr, act}}}{P_{\text{tr, nat}}} \quad (1)$$

quantifiziert werden, wobei die durch Kontamination und Erosion der Vorderkante tatsächlich vorliegende Transitionsposition $P_{\text{tr, act}}$ mit der natürlichen, unbeeinflussten Transitionsposition $P_{\text{tr, nat}}$ verglichen und auf die natürliche Transitionsposition normiert wird. Hierbei sind $P_{\text{tr, act}}$ und $P_{\text{tr, nat}}$ die auf die Profilsehne projizierten Transitionspositionen. Die tatsächlich auftretende Transitionsposition beschreibt die mittlere Lage der Transition von laminarer zur turbulenter Umströmung zum Zeitpunkt der Messaufnahme entlang des Rotorblattes. Die Lage der natürlichen Transition beschreibt den Verlauf der Transition für eine nicht kontaminierte bzw. erodierte Rotorblattoberfläche. Die Differenz zwischen tatsächlicher und natürlicher Transitionsposition beschreibt somit die Reduzierung des laminaren Strömungsbereichs auf Grund der Oberflächenkontamination und -erosion. Sie wird aus der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Signalauswertung der thermografischen Aufnahmen berechnet und relativ zur Profilsehnenlänge des Rotorblattprofils angegeben, vgl. Abschnitt 2.2.

2.1. Thermografische Strömungsvisualisierung

Die Lage der laminar-turbulenten Transition eines umströmten aerodynamischen Profils lässt sich mit Hilfe der thermografischen Strömungsvisualisierung berührungslos und rückwir-

kungsfrei detektieren. Dies wird dadurch ermöglicht, dass der laminare und der turbulente Strömungsbereich auf Grund sich unterschiedlich ausprägender Oberflächentemperaturen des umströmten Objekts in thermografischen Aufnahmen unterscheiden lassen. Die zu differenzierenden Oberflächentemperaturen ergeben sich aus unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten, die sich proportional zur Oberflächenreibung der Strömungsbereiche verhalten [12, 13]. Eine durch absorbierte Sonnenstrahlung erwärmte Oberflächentemperatur eines Rotorblattes bildet eine initiale Temperaturdifferenz zur kühleren umströmten Luft. Die relativ kalte Luft kühlt auf Grund der höheren Reibung die Rotorblattoberfläche im Bereich der turbulenten Grenzschichtströmung stärker ab, als im laminaren Strömungsbereich.

Eine Thermografieaufnahme ist in Abb. 1(a) zu sehen, wobei der laminare und der turbulente Strömungsbereich durch die hellere und dunklere Farbgebung entsprechend einer höheren und niedrigeren Oberflächentemperatur bereits optisch deutlich unterschieden werden kann. An der Position $x = 590$ Pixel ist eine verfrühte laminar-turbulente Transition zu erkennen, welche durch eine Kontamination oder Erosion der Rotorblattvorderkante hervorgerufen wird. Durch ihre Formgebung werden diese Bereiche als turbulente Strömungskeile bezeichnet.

Abb. 1(b) zeigt in grau gestrichelter Linie das Temperaturprofil $T(y)$ der an der Position $x = 480$ Pixel in der Thermografieaufnahme in Abb. 1 (a) gekennzeichneten Bildspalte. Die Position der Rotorblattvorderkante und -hinterkante lässt sich anhand des deutlichen Anstiegs und Abfalls der Temperatur bei $y = 70$ Pixel und $y = 270$ Pixel ermitteln. Der Ort der Transition ist durch den starken Temperaturanstieg innerhalb dieser Grenzen gekennzeichnet. Durch Approximation des Temperaturprofils $T(y)$ mit einer Gaußschen Verteilungsfunktion im Bereich der Rotorblattoberfläche kann eine Lokalisierung der Transition mit Messunsicherheiten im Subpixelbereich ermittelt werden [14]. Die Position des Wendepunkts entspricht der Position y_{tr} der laminar-turbulenten Transition.

Die auf die Rotorblattvorderkante und -hinterkante bezogene relative Position der laminar-turbulenten Transition $p_{tr, act}$ in der Bildebene wird aus den in den einzelnen Bildspalten

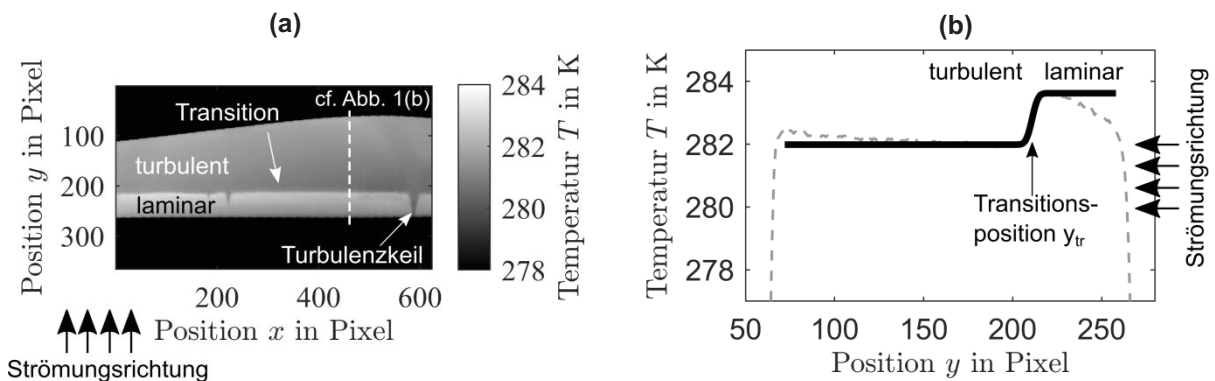


Abb. 1: (a) Thermografieaufnahme eines Rotorblattes an einer WEA in Betrieb. Die laminar-turbulente Transition ist anhand eines Temperaturunterschiedes zwischen laminarem und turbulentem Strömungsbereich zu erkennen. Der gekennzeichnete Schnitt markiert die Position des in Abb. 1(b) dargestellten Temperaturprofils $T(y)$ an der Stelle $x = 480$. [9]

ermittelten Transitionpositionen $y_{tr,j}$ bestimmt. Bei J Bildspalten und pro Bildspalte einer gefundenen Position der Vorderkante (engl.: leading edge, LE) $y_{LE,j}$ und Hinterkante (engl.: trailing edge, TE) $y_{TE,j}$, errechnet sich die relative Position der tatsächlichen Transition aus

$$\text{der Mittelwertbildung } p_{tr, act} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \frac{y_{tr,j} - y_{LE,j}}{y_{TE,j} - y_{LE,j}}.$$

Aus dem ermittelten Verlauf $y_{tr,j}$, $j = 1, \dots, J$, der tatsächlichen Transition wird der Verlauf der natürlichen Transition über die Approximation mit einer Geraden (gewichtete lineare Regression) berechnet. Die $y_{tr,j}$ -Werte an den Strömungskeilen werden dabei als Ausreißer betrachtet und gehen gemäß der implementierten Wichtung weniger stark in die Approximation ein, so dass die sich ergebende Gerade dem natürlichen Transitionsverlauf entspricht, d.h. ohne verfrühte laminar-turbulente Übergänge durch Kontaminatin oder Erosion. Die durch die Approximation berechneten Transitionspositionen der einzelnen Bildspalten werden analog über die Mittelwertbildung zu einer relativen Gesamtposition $p_{tr, nat}$ berechnet.

Abb. 2 zeigt den Bildausschnitt aus Abb. 1 mit eingezeichnetem Verlauf der tatsächlichen (schwarz) und natürlichen (grau) Transition. Die Strömungskeile sind erwartungsgemäß im Verlauf der natürlichen Transition nicht enthalten.

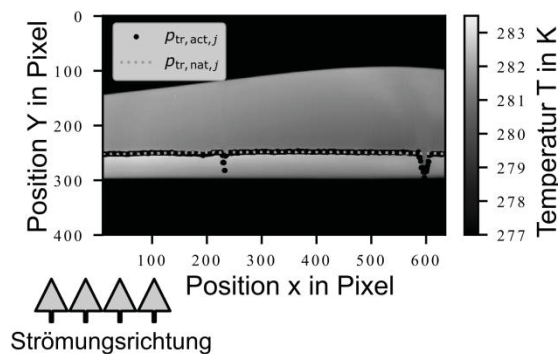


Abb. 2: Ausgewerteter Bildausschnitt aus Abb. 1 (a) mit berechnetem Verlauf der tatsächlichen Transition $p_{tr, act}$ (schwarze Linie) und der durch die gewichtete Approximation ermittelten natürlichen Transition $p_{tr, nat}$ (graue Linie). [10]

2.2. Geometrische Zuordnung

Auf Grund der zweidimensionalen Abbildung der Rotorblattoberfläche auf die Bildebene der Thermografiekamera, ist zur Positionsangabe der laminar-turbulenten Transition bezogen auf die Profilschneide und zur Berechnung des LEC -Wertes eine geometrische Zuordnung erforderlich. Unter Berücksichtigung der Messsituation werden durch die geometrische Anordnung und Ausrichtung der Kamera und des Rotorblattprofils die einzelnen Bildpunkte der Thermografieaufnahme den Oberflächenpunkten des Rotorblattprofils zugeordnet.

Abb. 3 zeigt hierzu exemplarisch die Messsituation während einer Freifeldmessung an einer WEA in Betrieb. Die Kamera befindet sich im Ursprung des Kamerakoordinatensystems, während die bekannten Oberflächenpunkte des Rotorblattprofils um die Messentfernung ΔX in der Horizontalen und um die Nabenhöhe der WEA ΔY in der Vertikalen verschoben sind. Zusätzlich ist das Rotorblattprofil um den Winkel θ aus der Horizontalen gegen den Uhrzeigersinn gedreht, so dass die Saugseite der Kamera zugewandt ist. Der oberste und unterste in der Thermografieaufnahme noch betrachtbare Oberflächenpunkt des Profils lässt sich als maximaler und minimaler Polarwinkel der Oberflächenkoordinaten ermitteln. Der Winkel zwischen ihnen beschreibt den Öffnungswinkel $\varphi_{max}^K - \varphi_{min}^K$ unter dem das Rotorblattprofil in der Thermografieaufnahme sichtbar ist. Die auf die in der Thermografieaufnahme abgebildete Strecke zwischen sichtbarer Vorder- und Hinterkante normierte Position der laminar-turbulenten Transition p_{tr} lässt sich direkt auf den Öffnungswinkel $\varphi_{max}^K - \varphi_{min}^K$ beziehen, um den Winkel unter dem die laminar-turbulente Transition zu sehen ist zu ermitteln: $\varphi_{tr}^K = p_{tr} \cdot (\varphi_{max}^K - \varphi_{min}^K) + \varphi_{min}^K$.

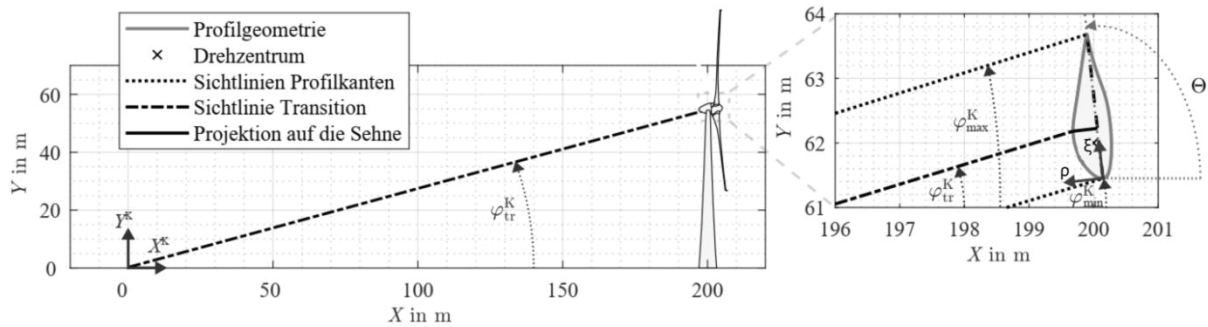


Abb. 3: Exemplarische Messsituation im Freifeld an einer WEA in Betrieb. Die Thermografiekamera befindet sich im Ursprung des Kamerakoordinatensystems K und beobachtet die Saugseite der Rotorblätter. Der Öffnungswinkel unter dem die Rotorblattoberfläche in der Thermografieaufnahme sichtbar ist $\varphi_{\max}^K - \varphi_{\min}^K$ und der Winkel unter dem sich die Transition befindet ist φ_{tr}^K .

Der Schnittpunkt des Sichtvektors unter dem Winkel φ_{tr}^K mit den Oberflächenkoordinaten des Rotorblattprofils ergibt den Punkt im Raum, an dem sich die Transition auf der Oberfläche des Rotorblatts befindet. Die gesuchte Größe zur Lagebestimmung der Transition ist der ξ -Abschnitt im Profilkordinatensystem dessen Ursprung in der Profilspitze liegt und die Ausrichtung der ξ -Achse entlang der Profelsehne c verläuft. Durch eine Koordinatentransformation kann der gefundene Schnittpunkt in dieses Profilkordinatensystem umgerechnet werden und die auf die Profelsehne projizierte Transitionsposition ξ_{tr} direkt aus den Koordinaten abgelesen werden. Der relative Bezug zur Profelsehne c ergibt dann

$$P_{\text{tr}} = \frac{\xi_{\text{tr}}}{c}. \quad (2)$$

Damit ist die relative Bildposition p_{tr} der Transition in die auf die Profelsehne projizierte und normierte Transitionsposition P_{tr} überführt und kann zur Berechnung des LEC-Wert verwendet werden.

3. Messaufbau

Im Folgenden wird der experimentelle Aufbau der Freifeldmessung an einer WEA in Betrieb für die thermografische Strömungsvisualisierung vorgestellt. Die in dieser Arbeit präsentierten Beispielmessungen wurden an einer 1,5 MW General Electric (GE) Windenergieanlage durchgeführt. Die Anlage hat einen Rotor mit einem Durchmesser von 77 m des Zulieferers LM Wind Power bei einer Nabenhöhe von $\Delta Y = 62$ m. Es wurde Messungen an zwei unterschiedlich stark kontaminierten Rotorblättern durchgeführt. Für die 1. Messung beträgt die Entfernung zwischen Thermografiekamera und Fuß der WEA $\Delta X = 180$ m und während der 2. Messung $\Delta X = 110$ m. In beiden Fällen lief die WEA im Teillastbereich mit einer Umdrehung von ca. 10 min^{-1} und einem konstanten Blatteinstellwinkel von $\vartheta = 2^\circ$.

Die Thermografieaufnahmen wurden mit einer aktiv gekühlten Kamera mit Indiumantimonid-Detektor-Array des Herstellers InfraTec durchgeführt. Das Detektor-Array hat eine Auflösung von 640×512 Pixel und die Pixelgröße in der Sensorebene beträgt $15 \mu\text{m}$. Die Integrationszeit kann zwischen $1 \mu\text{s}$ und $20.000 \mu\text{s}$ manuell der Messsituation angepasst werden. Das verwendete 200 mm Teleobjektiv bietet ein augenblickliches Gesichtsfeld (IFOV, Instantaneous Field of View) von $0,08 \text{ mrad}$, was bei einem Messabstand von ca. 180 m eine geometrische Auflösung von 16 mm Kantenlänge pro Pixel ermöglicht. Über einen optischen Trigger werden einzelne Aufnahmen ausgelöst, sofern ein Rotorblatt das Blickfeld der Thermografiekamera durchquert. Somit können abschnittsweise Einzelaufnahmen des Rotor-

blatts von der Rotorblattnabe bis zur Rotorblattspitze aufgenommen und anschließend zu einer Gesamtaufnahme zusammengeführt werden.

4. Messergebnisse

Abb. 4 zeigt die Ergebnisse der thermografischen Strömungsvisualisierung der in Abschnitt 3 beschriebenen Messungen. Es sind jeweils fünf Auswertebereiche in radialen Abschnitten r_1 bis r_5 gekennzeichnet in denen die Profilgeometrie bekannt ist und die in Abschnitt 2 beschriebene Auswertung der Transitionsposition angewandt wurde. Der Verlauf der tatsächlichen Transition ist mit einer schwarzen Linie und der natürlichen Transition mit einer grau gepunkteten Linie eingezeichnet.

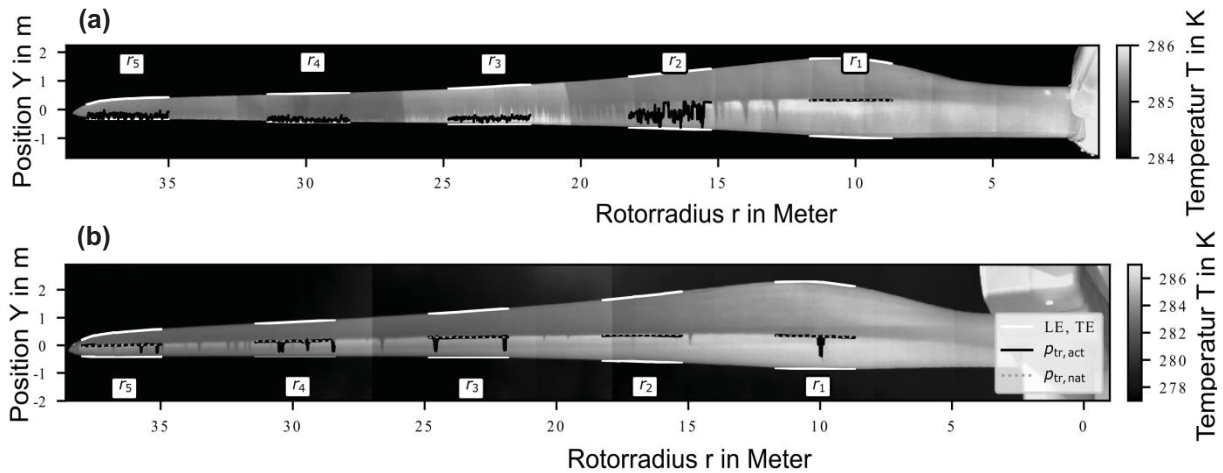


Abb. 4: Zwei Thermografiemessungen der Saugseite eines Rotorblattes. (a) Messung aus einer Messentfernung von 180 m mit stark kontaminierter Oberfläche (1. Messung) und (b) Messung der gleichen Oberfläche aus einer Entfernung von 100 m bei kontaminationsarmer Oberfläche (2. Messung). Die Auswertung der jeweils fünf radialen Abschnitte ist in Tabelle 1 und Tabelle 2 zu sehen. [10]

Tabelle 1(a) listet die Ergebnisse der Transitionspositionen in den fünf radialen Abschnitten sowie den resultierenden LEC-Wert für die 1. Messung auf, vgl. Abb. 4(a). Die äußere Hälfte des Rotorblattes weist nahezu keinen laminaren Strömungsbereich auf und die Transition findet nahezu vollständig an der Vorderkante bzw. kurz dahinter statt. Der Maximalwert des LEC lässt sich im Rotorblattabschnitt bei r_4 finden und beträgt 90,4 %. Zum Vergleich listet Tabelle 1(b) die Ergebnisse der Transitionsposition und LEC-Berechnungen für die 2. Messung auf, vgl. Abb. 4(b). Der LEC-Wert hat hier ein Maximum von lediglich 5,2 % bei r_4 , was einer relativ kontaminationsfreien Oberfläche entspricht.

Tabelle 1: Vorderkantenkontamination (LEC) in der 1. Messung (a) und 2. Messung (b) für die fünf radialen Abschnitte $r_i = 1, \dots, 5$ mit bekannter Profilgeometrie basierend auf den Vergleich der tatsächlichen und natürlichen Transitionspositionen $P_{tr,act}$ und $P_{tr,nat}$ relativ zur Profilsehne

(a)

1. Messung	$r_1=10,45$ m	$r_2=17,05$ m	$r_3=23,55$ m	$r_4=30,15$ m	$r_5=36,75$ m
$P_{tr,act}$	0,340	0,154	0,090	0,039	0,129
$P_{tr,nat}$	0,340	0,357	0,393	0,405	0,442
LEC	0,0 %	56,9 %	76,4 %	90,4 %	70,8 %

(b)

2. Messung	$r_1=10,45$ m	$r_2=17,05$ m	$r_3=23,55$ m	$r_4=30,15$ m	$r_5=36,75$ m
$P_{tr, act}$	0,338	0,356	0,381	0,384	0,426
$P_{tr, nat}$	0,346	0,357	0,393	0,405	0,442
LEC	2,3 %	0,3 %	3,0 %	5,2 %	3,6 %

Die Minderung der jährlichen Energieproduktion auf Grund des gemessenen Kontaminationsgrads wurde berechnet, indem zunächst eine Strömungssimulation mit der Software Xfoil (v6.97) [15] durchgeführt und die Veränderung des Auftriebs- und Widerstandskoeffizienten berechnet wurde. Die Simulation wurde für beide Messungen durchgeführt und die resultierenden Leistungswertänderungen auf Grund der Kontamination in einer Blade Element Momentum (BEM) Simulation verwendet, um die Minderung der jährlichen Energieproduktion zu berechnen. Die Ergebnisse der mit der open-source Software Qblade (v0.96) [16] durchgeführten BEM-Simulation sind in Tabelle 2 aufgelistet. Die Berechnung wurde für vier verschiedene typische mittlere Windgeschwindigkeiten durchgeführt. Die deutlich höhere Kontamination der Oberfläche in Messung 1 hat eine Minderung der Energieproduktion bis 5 % bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 6 m/s zur Folge. Trotz einer Verschiebung der laminar-turbulenten Transition und einer resultierenden durchschnittlichen Kontamination von $LEC = 58,9$ % in den 5 radialen Abschnitte r_1 bis r_5 , sind die aerodynamischen Eigenschaften des Rotorblattprofils so geringfügig beeinflusst, dass ein zahlenmäßig geringer Energieverlust von lediglich 5 % im Jahr zu verzeichnen ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die kontaminationsbedingten Verluste durch höhere Windgeschwindigkeiten ausgeglichen werden können und bei hinreichenden Windgeschwindigkeiten auch die Nennleistung erreichbar ist. Würde die Windenergieanlage vermehrt im Teillastbetrieb betrieben, so ergeben sich höhere Ertragseinbußen. Die deutlich niedrigere Kontamination in Messung 2 weist bei den verschiedenen mittleren Windgeschwindigkeiten keine signifikante Verminderung der Energieproduktion auf.

Tabelle 2: Verringerung des jährlichen Energieertrags (AEP) in den beiden Fällen der stark (1. Messung) und schwach (2. Messung) kontaminierten Rotorblattorderkante für verschiedene mittlere Windgeschwindigkeiten.

AEP Verringerung	6 m/s		7,5 m/s		8 m/s		9 m/s	
	in %	in MWh	in %	in MWh	in %	in MWh	in %	in MWh
1. Messung	-4,7	-143	-3,6	-171	-3,3	-173	-2,7	-171
2. Messung	-0,2	-7	-0,2	-8	-0,2	-8	-0,1	-8

5. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein Verfahren vorgestellt, welches mit Hilfe der Thermografie eine Quantifizierung der strömungsbeeinflussenden Kontamination von Rotorblattvorderkanten an Windenergieanlagen in Betrieb ermöglicht. Durch die Betrachtung der resultierenden Positionsverschiebung der laminar-turbulenten Transition konnte die direkte Auswirkung der Vorderkantenkontamination auf die Grenzschichtströmung in Form des hier eingeführten Kontaminationsgrads LEC (engl.: Leading Edge Condition) quantifiziert werden. Die quasi-rückwirkungsfreie Messung der Grenzschichtströmung ermöglicht dabei erstmals einen direkten Bezug der Kontamination zur aerodynamischen Performance des Rotorblattes.

Das vorgestellte Messprinzip wurde an einer 1,5 MW WEA angewandt und eine stark mit einer schwach kontaminierten Oberfläche verglichen. Die Messung der stark kontaminierten Oberfläche ergab einen Kontaminationsgrad bis $LEC = 90$ %. Die Messung der kontaminationsarmen Oberfläche ergab einen maximalen Kontaminationsgrad von $LEC = 5,2$ %. Für beide Fälle wurde eine BEM Simulation durchgeführt, welche die Verringerung des jährlichen Energieertrags anhand der strömungsbeeinflussenden Kontamination berechnet. Die Ver-

ringerung des Energieertrags (AEP) bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 6 m/s ergab 0,2 % für den Fall der schwachen Kontamination und 4,7 % für den Fall der starken Kontamination.

Der quasi-rückwirkungsfreie Ansatz der thermografischen Strömungsvisualisierung und die hohe Datenrate auf Grund der flächenhaften Messung der Grenzschichtströmung erlauben erstmals eine Kontaminationsbestimmung bei realen Windenergieanlagen während des Betriebs. Die vorgestellte Messmethode kann somit zukünftig für eine präzise Abschätzung des jährlichen Energieertrages eingesetzt werden.

6. Dankesworte

Für die finanzielle Unterstützung der Arbeiten gilt der Dank der Bremerhavener Gesellschaft für Investitionsförderung und Stadtentwicklung mit Mitteln des Landes Bremen (Förderkennzeichen: 59203). Der Firma InfraTec GmbH sei für die wertvolle Unterstützung während der experimentellen Arbeiten gedankt.

7. Literatur

- [1] W. Han, J. Kim, B. Kim: Effects of contamination and erosion at the leading edge of blade tip airfoils on the annual energy production of wind turbines. *Renew. Energy* 115, 817-823, 2018
- [2] N. Dalili, A. Edrisy, R. Carriveau: A review of surface engineering issues critical to wind turbine performance. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13, 2428-438, 2009
- [3] M.H. Keegan, D.H. Nash, M.M. Stack: On erosion issues associated with the leading edge of wind turbine blades. *J. Phys. Appl. Phys.* 46(38), 38300, 2013
- [4] H. Slot, E. Gelinck, C. Rentrop, E. van der Heide: Leading edge erosion of coated wind turbine blades: review of coating life models. *Renew. Energy* 80, 837-848, 2015
- [5] E. Sagol, M. Reggio, A. Ilinca: Issues concerning roughness on wind turbine blades, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 23, 514-525, 2013
- [6] A. P. Schaffarczyk, D. Schwab und M. Breuer: Experimental detection of laminar-turbulent transition on a rotating wind turbine blade in the free atmosphere. *Wind Energy*, 20(2), 211–220, 2017
- [7] N. Swytink-Binnema und D. A. Johnson: Digital tuft analysis of stall on operational wind turbines. *Wind Energy*, 19(4) 703–715, 2016
- [8] G. P. Corten und H. F. Veldkamp: Insects can halve windturbine power. *Nature*, 412(41), 2001
- [9] T. Reichstein, A. P. Schaffarczyk, C. Dollinger, N. Balaesque, E. Schülein, C. Jauch, A. Fischer: Investigation of Laminar–Turbulent Transition on a Rotating Wind-Turbine Blade of Multimewatt Class with Thermography and Microphone Array. *Energies* 12(11), 2102, 2019
- [10] C. Dollinger, N. Balaesque, N. Gaudern, D. Gleichauf, M. Sorg, A. Fischer: IR thermographic flow visualization for the quantification of boundary layer flow disturbances due to the leading edge condition. *Renewable Energy* 138, 709-721, 2019
- [11] N. Gaudern: A practical study of the aerodynamic impact of wind turbine blade leading edge erosion. *J. Phys. Conf.* 524(1), 012031, 2014
- [12] L. de Luca, G. M. Carlomagno und G. Buresti: Boundary layer diagnostics by means of an infrared scanning radiometer. *Experiments in Fluids* 9(3), 121–128, 1990
- [13] A. Quast: Detection of Transition by Infrared Image Techniques. In 12th international congress on instrumentation in aerospace simulation facilities, 1987
- [14] C. Dollinger, M. Sorg, N. Balaesque und A. Fischer: Measurement uncertainty of IR thermographic flow visualization measurements for transition detection on wind turbines in operation. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 97, 279–289, 2018
- [15] M. Drela: XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils. In: *Low Reynolds Number Aerodynamics: Proceedings of the Conference Notre Dame*, 1989
- [16] D. Marten, J. Wendler: QBlade Guidelines v0.9 : Technical University of Berlin, Berlin, Germany, 2015