

# Thermografie unter wechselnden Witterungsbedingungen zur Zustandsüberwachung eines Windkraftanlagen-Rotorblattes

Tamara WORZEWSKI\*, Rainer KRANKENHAGEN\*, Manoucher DOROSHTNASIR\*,  
Henrik STEINFURTH\*, Mathias RÖLLIG\*, Christiane MAIERHOFER\*

\* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

**Kurzfassung.** Weltweit errichtet man zunehmend Offshore-Windkraftanlagen (WKA). Diese auf hoher See installierten WKA benötigen geeignete Wartungs- und Instandhaltungskonzepte. Bestehende Konzepte aus dem Landbereich geraten unter Offshore-Bedingungen an ihre Grenzen oder lassen sich überhaupt nicht anwenden, daher müssen neue Ansätze erprobt werden. Im Rahmen des BMBF geförderten Forschungsprojektes „IKARUS“ wird das Potential der berührungslosen thermografischen Fernerkundung zur Zustandsüberwachung der Rotorblätter von WKA untersucht. Dabei soll die Oberflächentemperatur der jeweiligen Rotorblätter erfasst und auf Unregelmäßigkeiten bzw. thermische Signaturen untersucht werden.

Veränderungen der Umgebungsbedingungen wie z.B. die solare Einstrahlung oder der Tagestemperaturgang führen zu Erwärmung und Abkühlung in einem Objekt, die beim Vorhandensein von Inhomogenitäten im Material oder Strukturmerkmalen thermische Signaturen hervorrufen können. Ebenso können Veränderungen der Witterungsbedingungen dazu führen, dass bereits vorhandene thermische Signaturen wieder ausgelöscht werden. Daher ist es unbedingt notwendig, systematische Langzeitmessungen bei verschiedenen Umgebungsbedingungen durchzuführen, um deren Einfluss zu verstehen und Fehlinterpretationen zu vermeiden.

In diesem Beitrag werden Zwischenergebnisse aus einem laufenden Langzeitversuch zu einem demontierten Rotorblattsegment präsentiert. Dieses wurde unter verschiedenen Witterungsbedingungen und zu verschiedenen Tages- und Jahreszeiten thermografisch beobachtet. Dabei werden verschiedene Strukturen und Defekte des Rotorblattsegmentes untersucht, die prinzipiell über thermische Signaturen nachgewiesen werden können; darüber hinaus werden die Merkmale mittels FEM simuliert und im Vergleich mit den Messergebnissen diskutiert.

## 1. Einführung

Zurzeit sind für Rotorblätter von Windkraftanlagen (WKA) regelmäßige Inspektionen im Abstand von zwei Jahren vorgeschrieben. Diese Inspektionen werden durch Industriekletterer ausgeführt, welche eine gründliche visuelle Inspektion vornehmen. Verdachtsflächen werden durch spezielle Klopftechniken untersucht. Im Vergleich zu landgestützten WKA ist die Zugänglichkeit für Offshore-Anlagen aber eingeschränkt, die bisher etablierten Instandhaltungsverfahren sind nicht ohne weiteres übertragbar.

Vor dem Hintergrund der weltweiten Installation von Offshore-Windparks müssen neue Wartungs- und Instandhaltungskonzepte entwickelt werden. Gegenwärtig werden in der Branche verschiedene Lösungsansätze diskutiert und teilweise erprobt. Eine Option ist der Einsatz von Hubschraubern als Transportmittel und Trägerplattform.

Es stellt sich die Frage, ob die berührungslose Inspektionsmethode mit Thermografie das Potential hat, von einem Hubschrauber oder einer anderen im Offshore-Bereich verfügbaren Plattform aus zur Zustandsanalyse von Rotorblättern angewandt zu werden.

Bereits 2004 präsentierten Bauer et. al. die Möglichkeiten der Thermografie zur Detektion von Rotorblattschäden [1]. Auch 2006 wiesen Meinschmidt et al. [2] darauf hin, dass Thermografie dafür geeignet sein könnte, Rotorblätter von Windkraftanlagen auf innere Fehler zu untersuchen. Als Anregungsquellen für die Erzeugung thermischer Kontraste wurden die Sonne und der Temperaturunterschied der Luft zwischen Tag und Nacht in Betracht gezogen.

Während die Messtechnik und -verfahren zur Qualitätsüberwachung bei der Rotorblattherstellung weiter entwickelt wurden [3,4,5,6,7], sind zum Thema thermografische Zustandsüberwachung auf große Entfernung keine weiter führenden Publikationen erschienen.

Im Rahmen des BMBF-Förderprogramms „Validierung des Innovationspotentials“ hat die BAM 2011 eine Förderung für ein Forschungsprojekt (Kurzname „IKARUS“) erhalten, um das Potential von thermografischen Verfahren zur Zustandsinspektion von Offshore Rotorblättern zu validieren. Dabei steht das Synonym IKARUS für **Infrarot-Kameratechnologie zur berührungslosen Analyse von Rotorblättern unter Hoch-See-Bedingungen**. U. a. wurde in dem Projekt der Einfluss äußerer Umweltbedingungen und der Witterung auf thermografische Messungen untersucht. Ein Teil der Ergebnisse werden in diesem Beitrag vorgestellt.

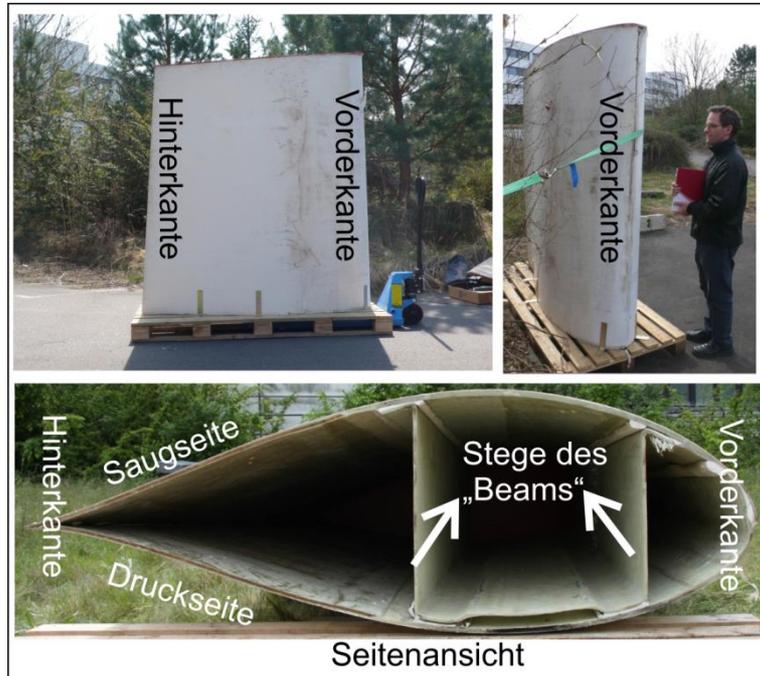
Um systematische Messreihen am gleichen Messobjekt unter den verschiedenen Randbedingungen realisieren zu können, wurde ein gebrauchtes Rotorblattsegment (Ausschnitt 1,8 x 2,2 m groß, Querschnitt maximal 0,6 m) als Probekörper bei der BAM aufgebaut (siehe Bild 1), welches fortan als „ROBAS“ bezeichnet wird. ROBAS wurde auf einer Europalette fixiert und kann mittels Hubwagen schnell in die Sonne hinein und wieder herausgedreht werden. Zudem wurde die Oberseite von ROBAS abgedeckt, um das Innere vor Regen etc. zu schützen.

ROBAS beinhaltet einen Beam (die Trägerstruktur für das Rotorblatt) mit „w-förmigen Profil“, welcher an der Druckseite des Rotorblattes zwei streifenförmige Auflageflächen hat (Stegauflage). Robas war bei Anlieferung teilweise grob verschmutzt und wies einen großen Riss an der Vorderkante auf. Die Verklebung der Hinterkante hatte sich komplett aufgelöst und wurde vor Ort mit Epoxydharz verklebt, wobei drei Stellen über jeweils einige cm Länge ausgespart wurden, um Klebefehler zu simulieren.

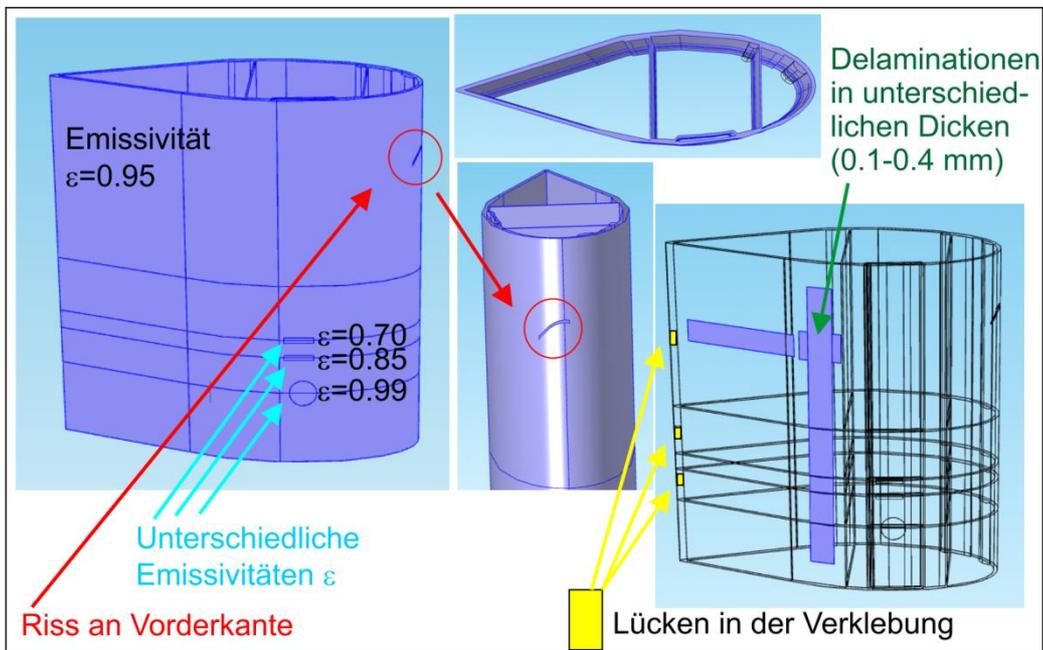
Im Laufe des letzten Jahres wurde ROBAS systematisch unter verschiedenen Witterungsbedingungen und zu verschiedenen Tages- und Jahreszeiten thermografisch beobachtet. Gleichzeitig wurden FEM-Simulationen mit COMSOL an einem 3D-Modell

von ROBAS mit den erwähnten Strukturmerkmalen und Defekten durchgeführt, um die Beobachtungsergebnisse besser verstehen zu können (siehe Bild 2).

Die modellierte Stegauflage dient in der Simulation als thermisches Modell für tiefe Strukturen. Die ebenfalls im Modell erhaltenen Delaminationen in geringerer Tiefe wurden so konstruiert, dass bestimmte an ROBAS auftretende thermische Kontraste (T-förmige Anomalie, die später diskutiert wird) durch die Simulation beschrieben werden können. Die Delaminationen simulieren hierbei oberflächennähere Defekte.



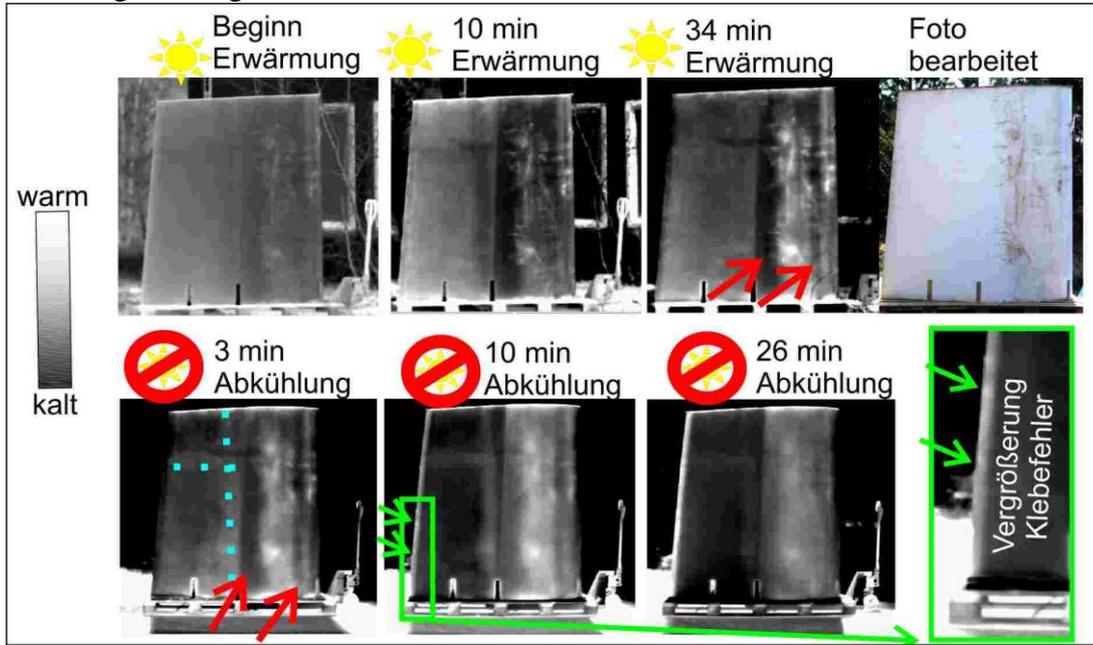
**Bild 1:** Probekörper Rotorblattsegment „ROBAS“



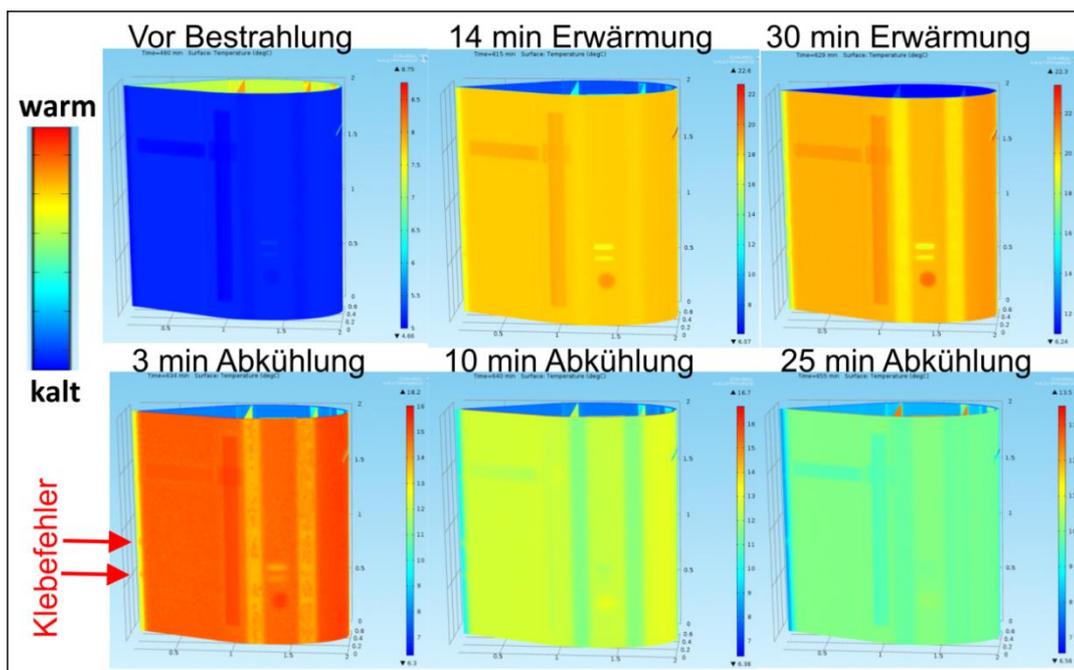
**Bild 2:** 3D- FEM Modell von ROBAS mit implementierten Schäden

## 2. Identifizierbare thermische Strukturen in/an ROBAS unter idealen Bedingungen

Zunächst wurde ROBAS unter „idealen“ Bedingungen untersucht, d.h. bei starker und direkter solarer Einstrahlung, wobei die IR-Kamera auf kurze Entfernung nahe dem Objekt stand. Zu Beginn wurde die Druckseite (s. Bild 1) von ROBAS zunächst in die Sonne gerichtet und die Erwärmung über eine halbe Stunde lang thermografisch beobachtet. Danach wurde ROBAS um 180° gedreht, so dass die Druckseite nun im Schatten war, um die Abkühlung thermografisch zu erfassen.



**Bild 3:** Experiment unter idealen Bedingungen: Obere Reihe zeigt Thermogramme während der Erwärmung, untere Reihe während der Abschattung. Rote Pfeile zeigen auf Stege, grüne Pfeile auf Klebefehler, cyan-gepunktete Linie deutet die T-förmige Anomalie an, welche in vielen Thermogrammen zu sehen ist.



**Bild 4:** FEM Simulation von ROBAS unter idealen Bedingungen. Simuliert wurde eine Situation, bei der zunächst der normale Tagestemperaturgang und dann eine 30minütige solare Erwärmung mit  $500 \text{ W/m}^2$  erfolgte. Danach beginnt ROBAS sich wieder abzukühlen.

Bild 3 zeigt besonders aussagekräftige Thermogramme der Druckseite während der Erwärmung und während der Abkühlung. Die vielen kleinen, thermisch kontrastreichen (warme) Bereiche resultieren aus Oberflächenverfärbungen (Verschmutzungen), was man im direkten Vergleich mit dem kontrast-verstärkten Foto sieht (Bild 3, oben rechts). Verschmutzungen haben eine andere Emissivität (hier: eine höhere Emissivität als die des Rotorblattes), was von der IR-Kamera mit einer veränderten Temperatur registriert wird. Bereiche höherer Emissivität absorbieren proportional zur Emissivität auch entsprechend mehr Energie, was zu einer stärkeren Erwärmung an den entsprechenden Stellen führt. Die durch Verschmutzung bedingten thermischen Kontraste verblassen im Zuge der Abkühlung, während andere thermische Signaturen bestehen bleiben bzw. überhaupt erst hervortreten, wie sowohl in Bild 3 als auch in der Simulation in Bild 4 beobachtet werden kann.

Im Laufe der Erwärmung bzw. Abkühlung erkennbare Signaturen traten folgende thermische Signaturen auf (siehe Bild 3):

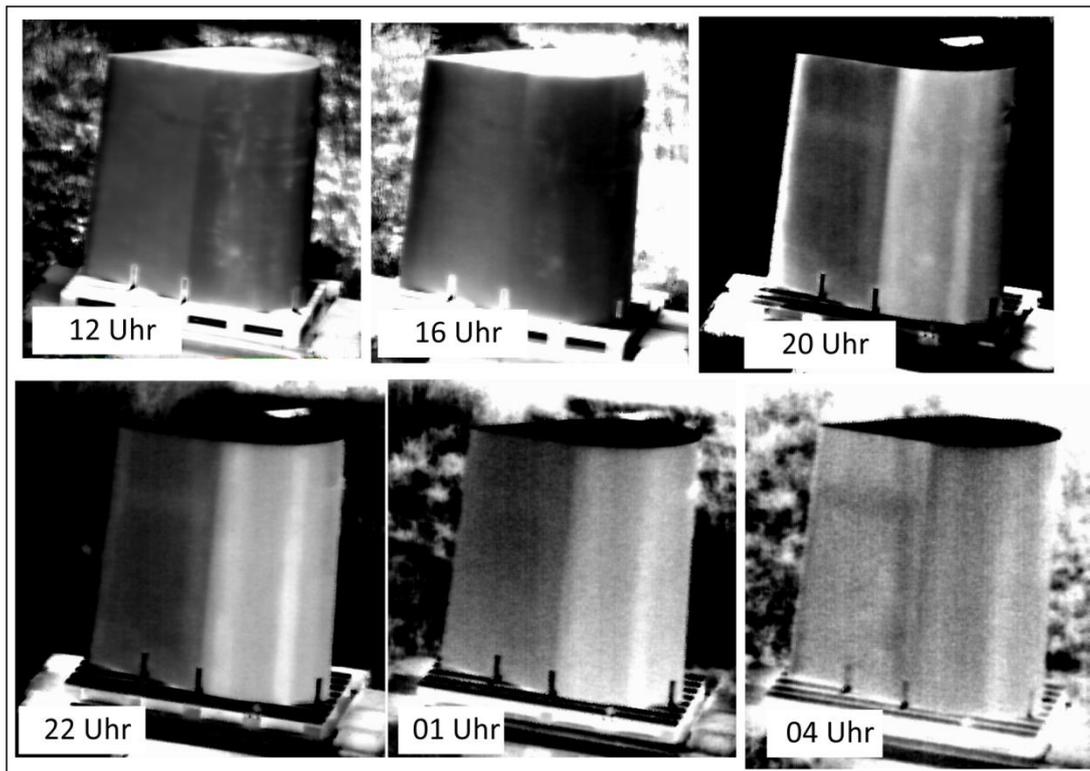
- Verschmutzungen (Temperaturkontraste bis zu maximal  $\Delta T \sim 3$  K),
- die eingebrachten Klebefehler der Hinterkante (maximales  $\Delta T \sim 0.8$  K),
- der Riss an der Vorderkante (maximales  $\Delta T \sim 1$  K),
- die breite Auflagefläche der Stege des Beams (die „w-förmige“ Trägerstruktur der Rotorblatthülle, maximales  $\Delta T \sim 0.7$  K) und
- eine T-förmige Anomalie, die wohlmöglich auf eine Delamination oder Ablösung im Inneren hindeutet (maximales  $\Delta T \sim 0.5$  K).

Das Auftreten der jeweiligen Signaturen lässt sich in der FEM-Simulation mit den implementierten Defekten gut nachbilden (siehe Bild 4).

Damit ist das Funktionsprinzip an einem realen Rotorblattausschnitt gezeigt worden, allerdings unter idealen Randbedingungen. In der Praxis ist mit diversen Einflüssen zu rechnen, welche das Messprinzip behindern könnten, wie z.B. ein größerer Abstand zum Rotorblatt, eine schräge Beobachtungsposition in Bezug zur Rotorblattoberfläche und verschiedene Witterungsbedingungen.

Um ein realistisches Szenario nachzubilden, wurde die IR-Kamera vom 3. Stock aus durch einen schmalen Fensterspalt in einer Entfernung von 34 m Luftlinie auf ROBAS gerichtet. Die Betrachtungsposition ist leicht schräg wegen eines Höhenunterschiedes von 8 m.

Von dieser Position aus wurde ROBAS bei verschiedenen Tages-, Jahreszeiten und Witterungsbedingungen thermografisch vermessen. Prinzipiell lässt sich feststellen, dass man auch aus der größeren Entfernung und leicht schrägen Betrachtungsposition bei guten Bedingungen viele Kontraste erkennen kann, wie in Bild 5 für den Fall eines warmen Sonnentages exemplarisch gezeigt wird. In Bild 5 treten während der Mittagssonne die Verschmutzungen besonders stark hervor. Nach einigen Stunden der Erwärmung sind nachmittags praktisch keine Kontraste erkennbar, während zum abkühlenden Abend hin die erwärmten Stege und die T-förmige Anomalie gut erkennbar sind, was in diesem Fall zu einem besonders kontrastreichen Thermogramm eine halbe Stunde nach Sonnenuntergang führte. Auch nachts sind noch Kontraste zu erkennen.



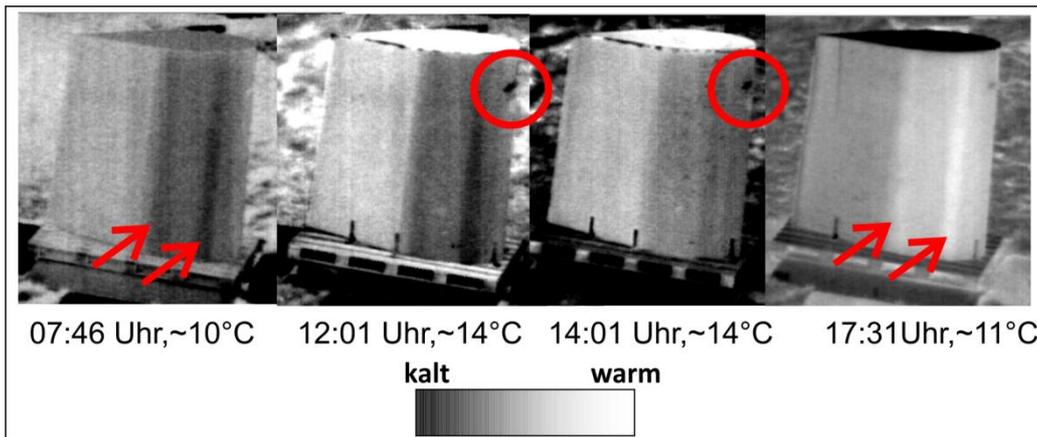
**Bild 5:** ROBAS aus größerer Entfernung und schräger Position (34 m Entfernung Luftlinie, 8 m Höhenunterschied) während eines warmen Sommertags mit Sonneneinstrahlung und der darauffolgenden Nacht. Viele der Strukturen, die beim Experiment unter Idealbedingungen entdeckt werden konnten, sind je nach Zeitpunkt auch von dieser Messkonfiguration aus erkennbar (Sonnenaufgang bzw. -untergang: 4:44 bzw. 21:34 Uhr).

### 3. Der Einfluss von Umgebungs- und Hintergrundtemperatur

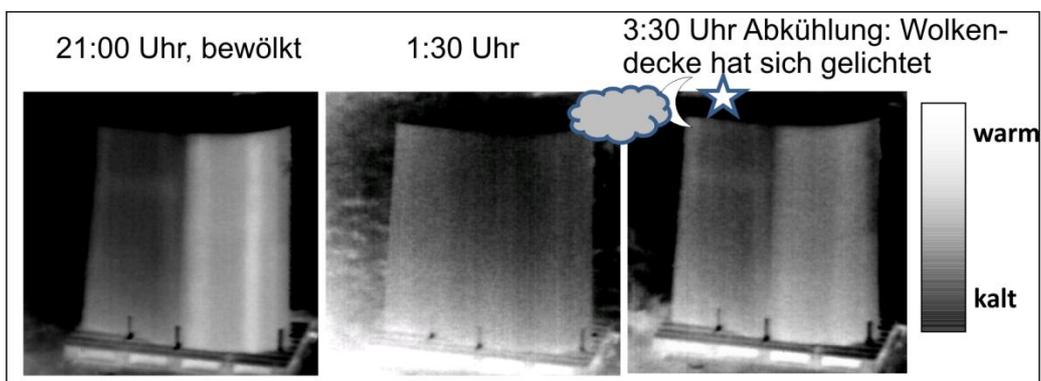
Während die Umgebungstemperatur sich auf die Lufttemperatur bezieht, beschreibt die Hintergrundtemperatur die Temperatur der abstrahlenden Umgebung. Die abstrahlende Umgebung umfasst den kompletten Halbraum über einem auf der Erde stehenden Körper, also vor allem den kompletten Himmel und den Boden. Im Labor und bei flächendeckender Bewölkung entspricht die Hintergrundtemperatur der Lufttemperatur. Hingegen bei klarem Himmel sinkt die Hintergrundtemperatur deutlich unter die Umgebungstemperatur ab, was einen zusätzlichen Abkühlungseffekt zur Folge haben kann.

Die tageszeitliche Änderung der Umgebungstemperatur allein reicht aber bereits aus, um im thermisch trägen ROBAS Temperaturgradienten zu erzeugen, die zu Kontrasten an der Oberfläche führen. Bild 6 zeigt beispielhaft an einem warmen Novembertag mit flächendeckender Bewölkung (also ohne jegliche Sonneneinstrahlung), wie Stege und Vorderkantenriss deutlich identifizierbar sind, die „T-Struktur“ ist tagsüber nur erahnbar. Zum Abend hin kommt es auch zu einer Temperaturinversion bei den Stegen: während diese tagsüber noch kälter im Vergleich zum restlichen ROBAS wirkten, „glühten“ die Stege abends noch eine Zeit lang warm nach.

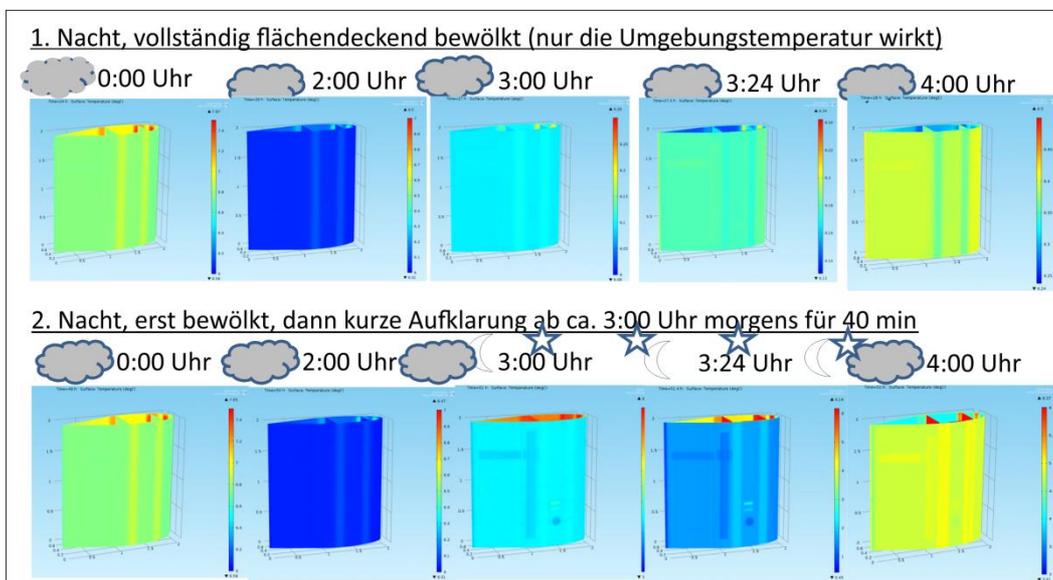
In Bild 7 ist eine Situation zu sehen, bei der sich in einer bewölkten Nacht die Wolkendecke plötzlich nachts um 3:30 lichtete. Die daraus resultierende Abkühlung führte zu einem Temperaturkontrast auf ROBAS, die T-förmige Anomalie wie auch die Stege werden thermisch erkennbar. Dieses Verhalten lässt sich auch in einer Simulation bestätigen wie in Bild 8 demonstriert.



**Bild 6:** Einfluss Tagestemperaturgang, Messung erfolgte aus größerer Entfernung. Stege (durch rote Pfeile angegeben) und Vorderkantenriss (roter Kreis) sind deutlich erkennbar. T-Struktur um 12:01 Uhr erahnbar. Sonnenaufgang bzw. -untergang: 7:15 bzw. 16:28 Uhr.



**Bild 7:** Abkühlung durch Veränderung der Hintergrundtemperatur



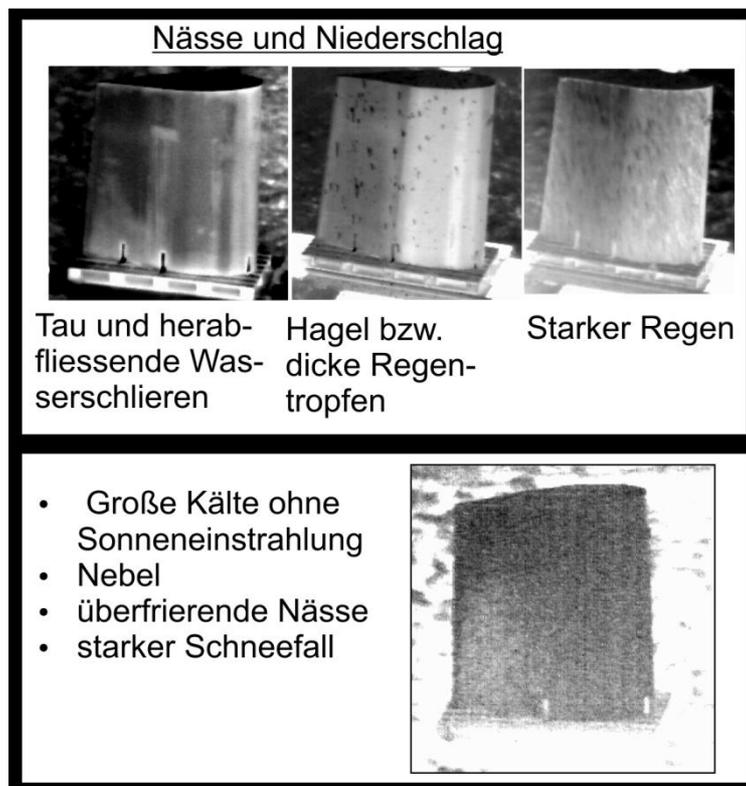
**Bild 8:** Simulation einer veränderten Hintergrundtemperatur an einem Sommertag, bei der die Lufttemperatur ab 3 Uhr morgens langsam ansteigt (früher Sonnenaufgang). In der ersten Nacht ist die Hintergrundtemperatur gleich der Umgebungstemperatur, in der zweiten Nacht klart sich um etwa 3 Uhr morgens der Himmel für 40 min auf und in dieser Zeit sinkt die Hintergrundtemperatur rapide ab. Je nach eingestellter Hintergrundtemperatur treten Kontraste stärker/schwächer auf. Hier ist Simulationsergebnis für den Fall gezeigt, dass die Hintergrundtemperatur auf  $-30^{\circ}\text{C}$  absinkt.

#### 4. Schlechte Bedingungen

Während ein kurzer Schauer eine abkühlende Wirkung auf ROBAS haben kann, was wiederum in manchen Fällen zur Verstärkung thermischer Kontraste führte, ist Nässe in der Regel störend für die Beobachtung strukturbedingter Kontraste. Bild 9 (obere Reihe) zeigt einige Beispiele für störende „Fehlanzeigen“, die durch Regen, Tau oder herablaufendes Wasser auf ROBAS produziert wurden.

Messungen bei Nebel führten zu keiner Tageszeit zu brauchbaren Ergebnissen. Es wurde mit verschiedenen IR-Kameras, die in verschiedenen spektralen Bereichen empfindlich sind, zeitgleich gemessen, doch die atmosphärische Absorption ist bei Nebel zu hoch, um eventuell vorhandene schwache Kontraste beobachten zu können

Auch starker Schneefall und Umgebungstemperaturen unter  $-3^{\circ}\text{C}$  ohne Sonneneinstrahlung führten zu kontrastarmen Thermogrammen, wie es in Bild 9 unten zu sehen ist. Eine mögliche Ursache des kontrastarmen Thermogramms kann eine geringe Empfindlichkeit der verwendeten IR-Kamera gegenüber niedrigen Temperaturen sein.

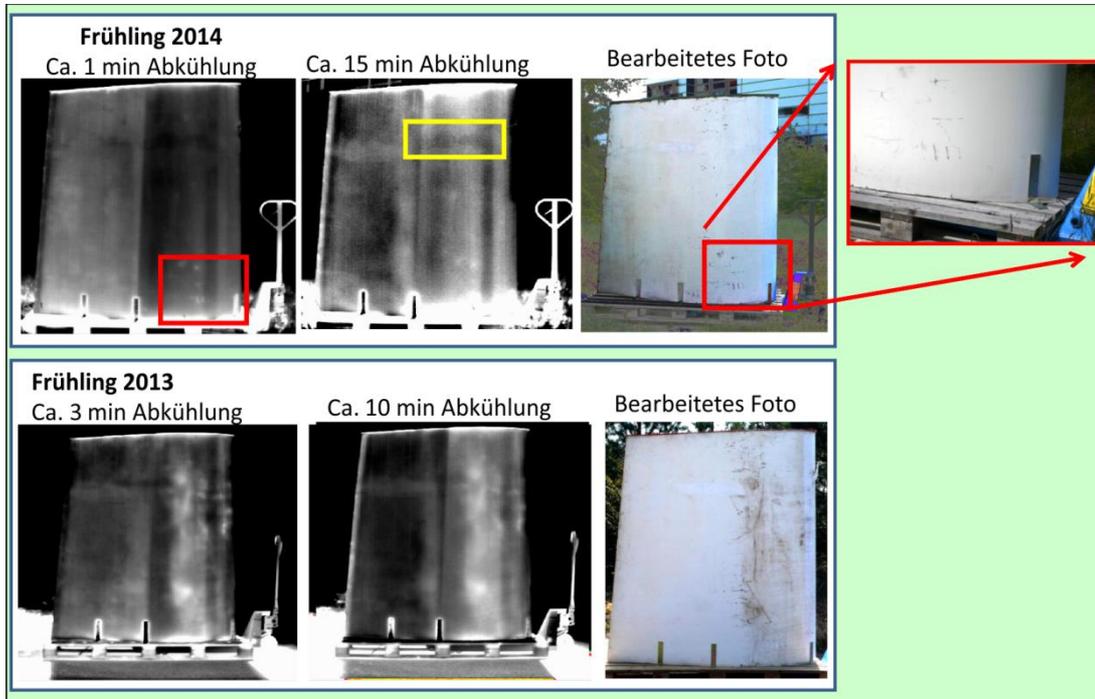


**Bild 9:** Beispiele für Thermogramme, die unter schlechten Bedingungen erfasst wurden

#### 5. Wiederholung des Experimentes nach einem Jahr

Das Experiment unter Idealbedingungen wurde im Frühling 2014 unter ähnlichen Bedingungen wie 2013 wiederholt (also bei direkter Sonneneinstrahlung und bei einem Messaufbau von kurzer Entfernung aus), um festzustellen, ob sich die thermischen Signaturen bei vergleichbaren Bedingungen verändert haben. Bild 10 zeigt einige aussagekräftige Thermogramme der Abkühlung (in der oberen Reihe für ROBAS Zustand in 2014 und, zum Vergleich, in der unteren Reihe der Zustand von 2013). Seit 2014 wurde, wie in den bearbeiteten Fotos und in den Thermogrammen zu erkennen ist, ein Teil des Schmutzes abgewaschen. Aber auch neue Oberflächeninhomogenitäten sind dazugekommen, die thermisch und visuell zu erkennen sind: im roten Kasten sind

Kratzspuren zu sehen, die wahrscheinlich von einem Fuchs stammen, der seinen Bau nebenan hat und ein häufiger Besucher von ROBAS war. Im gelben Kasten ist eine weitere kälter wirkende Struktur erkennbar, die so vor einem Jahr noch nicht zu sehen war. Dieser Befund könnte auf einen neuen Defekt hinweisen, der sich im Laufe des Jahres ausgebildet hat.



**Bild 10:** Vergleich des Zustandes von ROBAS im Frühjahr 2014 (oberer Reihe) und im Frühjahr 2013 (untere Reihe) zueinander. Das orange umrandete Bild rechts unten ist ein Ausschnitt aus einem VIS-Bild der geklebten Hinterkante unten in 2014.

## 6. Schlussfolgerung und Ausblick

Es gibt ideale, gute und schlechte Witterungsbedingungen für die thermografische Erkennbarkeit von Strukturen und Defekten in Rotorblättern. Die Sonne eignet sich als effektive Wärmequelle, jedoch ist der Zeitpunkt wichtig, da z.B. nach stundenlanger Erwärmung u.U. weniger zu sehen ist als zu Beginn einer Erwärmung. Generell reicht die tageszeitliche Änderung der Umgebungstemperatur bereits aus, um thermische Kontraste zu erzeugen. Insbesondere abends nach Sonnenuntergang leuchten tiefer gelegene Strukturen wie ein erwärmter Beam noch deutlich nach. Eine Inspektion zu dieser Zeit würde evt. die Detektion größerer Fehlstellen in der Anbindung der Stege zum Rotorblatt ermöglichen.

Eine Abkühlung durch die Umgebungstemperatur, das Herausdrehen aus der Sonne, die Verringerung der Hintergrundtemperatur, sowie kurze Regenschauer erzeugen Temperaturgradienten, die zu thermischen Kontrasten führen. Schlechte Bedingungen sind anhaltender Niederschlag jeder Art, große Kälte und Nebel.

Eine Möglichkeit, gezielt eine günstige Bedingung herbeizuführen, ist das Hineindreihen eines Rotorblattes in die Sonne, gefolgt von einem späteren Herausdrehen. Die thermografische Beobachtung kann dann während der Erwärmungsphase oder während der Abschattung erfolgen. Dieses wird demnächst von einer Hebebühne aus an einer Land-WKA erprobt werden.

Es bleibt letztendlich festzustellen, dass die Detektion von fehlerbedingten thermischen Signaturen durch den starken Einfluss von Witterungsfaktoren deutlich erschwert ist. Weitere systematische Untersuchungen an realen WKA unter realen

Umweltbedingungen sind notwendig, um den Einfluss dieser Faktoren quantifizieren zu können. Dadurch wird es möglich werden, für die Messmethode geeignete Umwelt- und Witterungseinflüsse zu identifizieren und Auflösungsgrenzen zu quantifizieren. Diese Daten sind erforderlich, um später eine sinnvolle Einsatzplanung für das neuartige Inspektionsverfahren realisieren zu können.

## Referenzen

- [1] Bauer, N. & Aderhold, J., Thermografie deckt Rotorblatt- Schäden auf Erneuerbare Energien, 2004, 7
- [2] Meinschmidt, P. & Aderhold, J., Thermographic Inspection of Rotor Blades, ECNDT - Tu.1.5.3, 2006
- [3] Jüngert, A., Große, C., Aderhold, J., Meinschmidt, P., Schlüter, F., Förster, T., Felsch, T., Elkmann, N., Krüger, M., & Lutz, O., Zerstörungsfreie robotergestützte Untersuchung der Rotorblätter von Windenergieanlagen mit Ultraschall und Thermographie, ZfP-Zeitung der DGZfP, 2009, 115, 43-49
- [4] Jørgensen, E. R.; Borum, K. K.; Mcgugan, M.; Thomsen, C. L.; Jensen, F. M.; Debel, C. P., & Sørensen, O. B. F., Full scale testing of wind turbine blade to failure - flapwise loading Risø National Laboratory, 2004
- [5] Chatzacos, P.; Avdelidis, N.; Hrisagis, K. & Gan, T.-H., Autonomous Infrared (IR) Thermography based inspection of glass reinforced plastic (GRP) wind turbine blades (WTBs) Robotics Automation and Mechatronics (RAM), 2010 IEEE Conference on, 2010, 557-562
- [6] Ciang, C. C.; Lee, J.-R. & Bang, H.-J., Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods, Measurement Science and Technology, 2008, 19, 122001
- [7] Tippmann, J., & Manohar, A., Wind Turbine Blade inspection Tests at UCSD Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, mechanical, and aerospace systems 2012, 2012, 8345