

# Zerstörungsfreie Prüfung der Flügelblätter von Vertikal- und Horizontalwindenergieanlagen mit der THz-Methode und der Lockin-Thermografie

Florian STARK \*, Verena SCHLAMP \*, Christian GROÙE \*

\* Technische Universität München, Centrum Baustoffe und Materialprüfung,  
Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, München

## Kurzfassung

Spätestens seit der Energiewende in Deutschland, gewinnt die Windenergie immer mehr an Bedeutung. Die Zunahme von Windenergieanlagen (WEA), insbesondere in dichter besiedelten Gebieten, erfordert eine ausgereifte Qualitätssicherung. Ein Hauptaugenmerk fällt auf die Rotorblätter bzw. den Flügel, da sie im Betrieb starken Belastungen ausgesetzt sind. Die hier untersuchten Flügel (Länge ca. 3 Meter) eines Vertikalläufers bestehen aus einer hochsteifen Hohlkammerkonstruktion, welche aus einer Kombination von glas- und kohlefaserverstärktem Kunststoff (GFK/CFK) besteht. Typische Materialfehler in solchen Bauteilen sind z. B. Delaminationen, Fehlverklebungen, Risse und Lunker; sie können die Lebensdauer der Rotorblätter einer Anlage stark verkürzen.

Die Lockin-Thermografie hat sich in vielen Anwendungsbereichen wie beispielsweise bei der Untersuchung der Rotorblätter von horizontalen WEA bewährt. Sie bietet die Möglichkeit oberflächennahe Defekte, bereits in der Produktion zu identifizieren und zu bewerten. Dieses bildgebende Verfahren hat den weiteren Vorteil, dass es in kurzer Zeit eine große Fläche des Prüfobjektes abdecken kann und zudem auch mobil einsetzbar ist. Vor allem letzteres ermöglicht eine Untersuchung vor Ort, um Beschädigungen durch den Transport zu erkennen, oder um Inspektionen einer Anlage anlässlich einer Wartung durchzuführen. Neben der Thermografie wird zusätzlich der Einsatz der Terahertz-Technik, deren Frequenzbereich zwischen der Infrarot- und Mikrowellenstrahlung angesiedelt ist, für die beschriebene Anwendung geprüft und mit den Ergebnissen der Thermografie verglichen.



## 1. Einführung

Die hier untersuchten Flügel (Länge ca. 3 Meter) eines Vertikalläufers (Abb. 1 und Abb. 4 oben) bestehen aus einer hochsteifen Hohlkammerkonstruktion, welche wiederum aus einer Kombination von glas- und kohlefaserverstärktem Kunststoff (GFK/CFK) besteht. Typische Materialfehler in solchen Bauteilen sind z. B. Delaminationen, Ondulationen, Fehlverklebungen, Risse und Lunken; sie können die Lebensdauer der Rotorblätter einer Anlage stark verkürzen. Des Weiteren wurden Segmente von Rotorblättern einer horizontalen Windenergieanlage inspiziert. Derzeit gibt es etablierten Methoden wie Ultraschall, Lokale Akustische Resonanz oder IR-Thermografie um Fehler bzw. Schädigungen dieser Art zu detektieren. Hier wird nun eine weitere Methode, die Terahertz-Technik auf ihr Potential zur Fehlerdetektion von GFK-Strukturen untersucht und mit den Ergebnissen der begleitenden optischen Lockin-Thermografie untersucht.

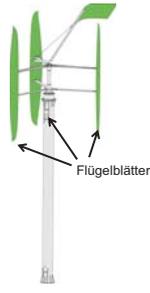


Abbildung 1: Vertikallwindenergieanlage (Abb. nach Envento Windenergie GmbH).

## 2. Terahertz-Technik

Abbildung 2 (rechts): Das elektromagnetische Spektrum. Der THz-Bereich grenzt an das Frequenzband der Mikrowellen und dem optischen Infrarotbereich an.

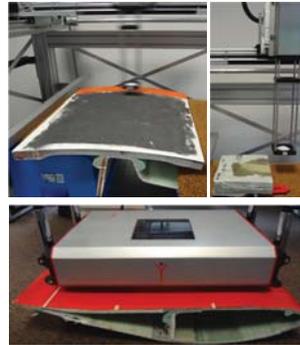
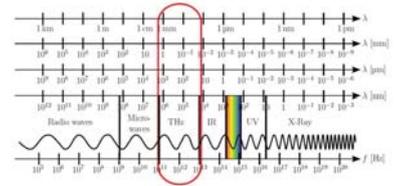


Abbildung 3: Terahertz-Messungen an verschiedenen Segmenten von GFK-Rotorblättern. Je nach Geometrie der Prüfkörperoberfläche wurden unterschiedliche Systeme verwendet.

Der Terahertz-Bereich (Abb.2) deckt einen Frequenzbereich von  $10^{11}$  Hz (0,1 THz) bis  $10^{13}$  Hz (10 THz) ab. Dies entspricht den Wellenlängen zwischen 3 mm und 0,03 mm (siehe Abb.2). Ein Grund für die bisher begrenzte Nutzung dieses Frequenzbereiches war der Mangel an geeigneten Quellen und Empfängern ("THz Lücke").

Der technologische Fortschritt in den letzten zwei Jahrzehnten erlaubt inzwischen eine gezielte Erzeugung solcher Strahlung sowohl von der Hochfrequenz- als auch von der Mikrowellenseite. Terahertzstrahlung kann entweder durch optische, elektronische oder optoelektronisch generiert werden. Die hier beschriebene Terahertz-Messungen wurden mit einem vollelektronischem System von der Becker Photonik GmbH durchgeführt. Für weitere Informationen zu diesem System siehe z. B. Becker [2012].

## 3. Optische Lockin-Thermografie (OLT)

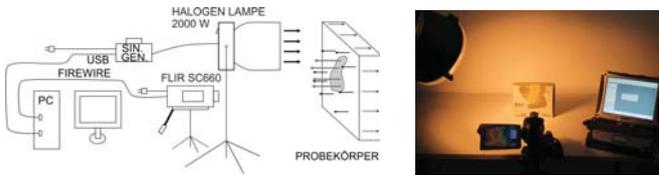


Abbildung 3: Skizziertes (links) und reales Setup (rechts) der thermografischen Messungen. Für OLT-Versuche wurden Frequenzen zwischen 0,1 Hz und 0,005 Hz gewählt.

## 4. Untersuchungen der Vertikalflügel Terahertz-Messungen

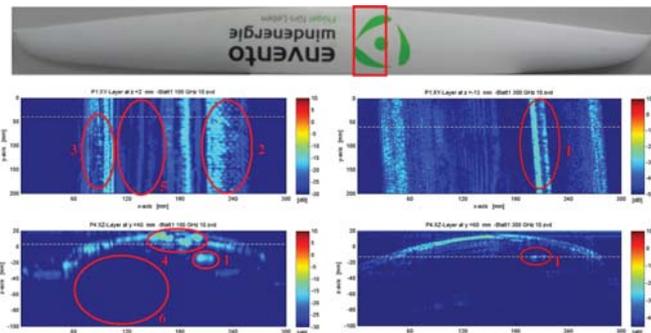


Abbildung 4: Das rote Rechteck zeigt die Sektionen der abgebildeten Terahertz-Messungen. Während die oberen Abbildungen nach links umgeklappte C-Bilder zeigen, sind in den Unteren die korrespondierenden B-Bilder dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die höhere Auflösung des rechten Scans (0,3 THz) im Vergleich zum linken Scan (0,1 THz).

1. Schnittstellenübergang der Verklebung der beiden Flügelhalbschalen
2. Gewebestruktur
3. Klebung am Blatttrand mit einigen Anomalien
4. Mögliche Überlappung von CFK – GFK Gewebe
5. Mögliche weitere CFK Verstärkung
6. Unbekannte Reflektoren / Schwaches Rückwandecho?

## Thermografische Messungen

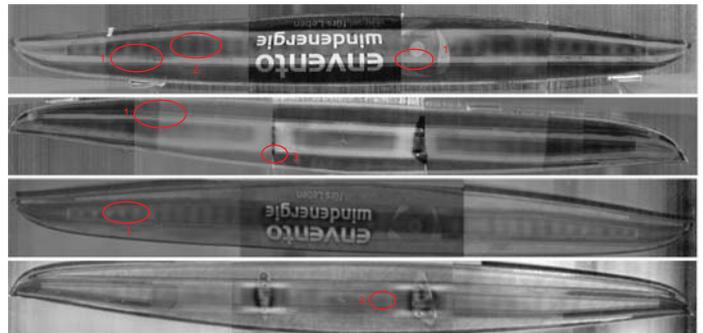


Abbildung 5: Phasenbilder der OLT Aufnahmen der Vorder- und Rückseiten eines Flügels. Die beiden oberen Aufnahmen wurde mit einer Frequenz von 0,05 Hz, die Unteren mit einer Frequenz von 0,005 Hz aufgezeichnet. Die niedrigere Frequenz führt zwar zu einer etwas besseren Eindringtiefe, wohingegen aber die Auflösung stark in diesem Fall stark abnimmt.

1. Poren – Vermutlich Klebefehler
2. Mögliche Sandwichstruktur
3. Verstärkungen – Befestigungsstrukturen?

## 5. Rotorblattsektion

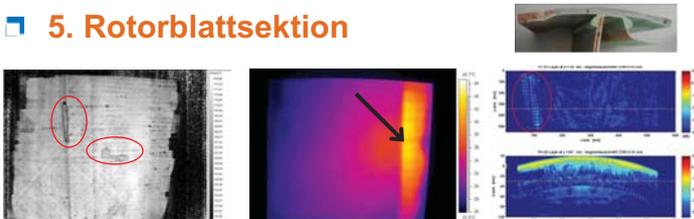


Abbildung 6: Untersucht wurde eine Rotorblattsektion aus GFK und PU-Schaum Sandwichkonstruktion. Die linke Aufnahme zeigt OLT mit 0,03 Hz. Sichtbar ist das Gewebe, der Gurt an der Rückseite, der Übergang zur Sandwichkonstruktion, sowie zwei weitere Merkmale. Bei der passiven Aufnahme (Mitte) sind bis auf dem PU-Schaum (hier sogar mit Abstandshalter) keine Merkmale erkennbar. Die Abstandshalter sind sogar noch besser in der THz Aufnahme (0,3 THz) zu erkennen.

## 6. Delaminationen / Ondulationen in GFK

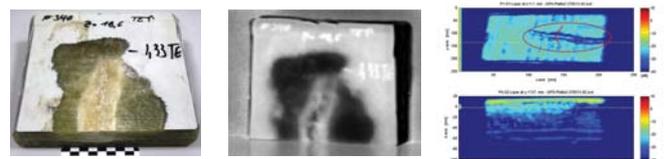


Abbildung 7: Untersucht GFK-Platte mit Epoxidharzsystem Out-of-Plane Faserwelle und Delaminationen (links). OLT-Aufnahme (Mitte) zeigt die Dimension der Schädigung. Mit der THz-Technik ist auch eine quantitative Tiefensondierung möglich (oben C-Bild und B-Bild).

## 7. Zusammenfassung - Ausblick

- Die THz-Technik bietet eine vielversprechende Ergänzung zu den bereits etablierten ZfP-Methoden für den Bereich GFK. Im Vergleich zur Lockin-Thermografie können hier absolute Tiefensondierungen vorgenommen werden. Typische Fehlklebungen, Porositäten, Voids können bis zu einer bestimmten Eindringtiefe detektiert werden.
- Da leider der strukturelle Aufbau der Vertikalflügel den Autoren nur teilweise bekannt war, sind weitere Aussagen schwierig. Nichtsdestotrotz erweist sich die OLT als relativ schnelle Methode den inneren Aufbau bis zu einem gewissen Grad darzustellen. Kritische Fehlklebungen beim Fügen der beiden Halbschalen sollten mit beiden Methoden (THz und OLT) identifiziert werden können.
- Für eine umfassende Charakterisierung der Fehler (insbesondere von Delaminationen und Ondulationen) sind weitere Messungen geplant. (US, Mechanische Impedanzanalyse, OLT (anpassen der Frequenzen) etc).

### Danksgagungen:

Die Autoren bedanken sich bei Dr. Lars Matthes von Envento Windenergie GmbH für die Bereitstellung der Vertikalflügel und bei Dr. Stefan Becker von Becker Photonik GmbH für die Ermöglichung der THz-Messungen.

Becker (2012): Stefan Becker. Mobile 3D-Terahertz-Bildgebung beim Fügen von Kunststoff und Keramik. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, Graz (Vortrag) (2012).

### Kontakt:

Dr. Florian Stark: f.stark@tum.de  
Technische Universität München, Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Baumbachstraße 7, 81245 München

