

Prüfung von GFK Windkraft Rotorblättern mittels 500kHz Phased-Array Technologie

Tobias BRUCH¹, York OBERDÖRFER¹

¹ GE Sensing & Inspection Technologies GmbH, Hürth

Tobias.Bruch@ge.com York.Oberdoerfer@ge.com

Kurzfassung. Die Prüfung von GFK Windkraft Rotorblättern erfordert die Abdeckung großer Flächen der sich im Betrieb befindlichen Anlage. Zudem ist ein Fehlerauffinden / eine Fehlererkennung nur mittels E- und C-Bildern verlässlich durchzuführen. Diese Anforderungen machen eine Prüfung mittels konventionellen Prüfköpfen nur unter großem Aufwand möglich. Für die In-Service Prüfung sind konventionelle Prüfköpfe aufgrund der geringen Abdeckung und erschwerten Ankopplung kaum geeignet. Erschwerend kommt das Materialgefüge von GFK hinzu, welches die Verwendung von niedrigen Prüffrequenzen erfordert, um relevante Materialstärken prüfen zu können. Die vorgestellte niederfrequente Phased-Array Technologie ermöglicht eine direkte Prüfung von großen Flächen im E- und C-Bild, wobei der vorgestellte Rollenprüfkopf eine einfache Handhabung, sowie eine verlässliche Ankopplung auch bei In-Service Prüfungen garantiert. Zur Demonstration der Leistungsfähigkeit des Rollenprüfkopfes werden Messungen des Signal zu Rausch Verhältnisses als Funktion der Materialstärke vorgestellt und mit Messungen verglichen, die mit konventionellen Prüfköpfen durchgeführt wurden. Zudem werden Referenzmessungen an unterschiedlichen Teststücken vorgestellt.

Einführung

Um den Stillstand von Windenergieanlagen aufgrund von Defekten an den Rotorblättern zu minimieren, sowie kritische Unfälle zu vermeiden, müssen die Rotorblätter regelmäßig auf Beschädigungen geprüft werden. Da die Rotorblätter an installierten Windkraftanlagen permanent großen Lasten ausgesetzt sind, werden regelmäßige Begutachtungen der Rotorblätter alle zwei bis vier Jahre durchgeführt. Es ist immer noch geläufig, die Rotorblätter mittels Sichtprüfung und Abklopfen auf Lufteinschlüsse und Delaminationen an verdächtigen Stellen zu überprüfen. Diese Prüfmethode eignen sich jedoch nur für ein Auffinden von oberflächennahen Defekten und sind stark abhängig von der Interpretation des Prüfers. Verfahren der Thermographie oder der Resonanzspektroskopie eignen sich zwar für eine Prüfung größerer Bereiche der Rotorblätter, erlauben jedoch auch nur eine Begutachtung der oberflächennahen Bereiche und sind für die Prüfung von sich in Betrieb befindlichen Anlagen nicht geeignet [1,2]. Das Ultraschall Impuls-Echo Verfahren hingegen bietet die Möglichkeit, volumetrische Prüfungen der Rotorblätter durchzuführen. Der Einsatz von konventionellen Prüfköpfen ist dabei nur bedingt praktikabel, da große Flächen nicht effektiv mittels des A-Bildes geprüft werden können. Der Einsatz von Phased-Array Technologie verbindet die Vorteile der volumetrischen Prüfung des Ultraschall Impuls-Echo Verfahrens mit einer hohen Prüfdeckung und vereinfacht die Prüfaufgabe sowie die Dokumentation der Prüfdaten.



1. Anforderungen an die Prüfung von Rotorblättern von Windenergieanlagen

1.1 In-Service Prüfung von Rotorblättern

Die In-Service Prüfung von Rotorblättern stellt besondere Anforderungen an die Rotorblattinspektoren, sowie die eingesetzten Prüfmittel. Insbesondere die Entwicklung hin zu immer größeren Spannweiten der Rotorblätter vergrößert die zu prüfenden Flächen. In der Regel seilen sich die Prüfer von der Rotornabe um bis zu 70 m ab, um die Prüfung an den einzelnen Rotorblättern durchzuführen. Dies erlaubt nur das Mitführen von kompakten Prüfmitteln mit einem geringen Eigengewicht. Da die Prüfer im Regelfall nur eine freie Hand zur Verfügung haben, muss eine einfache Handhabbarkeit der Prüfmittel gegeben sein. Zudem müssen verlässliche und aussagekräftige Interpretationen der Prüfdaten gewährleistet werden, sowie eine Dokumentation der Prüfdaten vor Ort möglich sein.

1.2 Schädigungen von Rotorblättern

Der Aufbau der Rotorblätter, sowie die verwendeten Materialien können von Hersteller zu Hersteller variieren. Jedoch haben sich Glasfaserverbundwerkstoffe (GFK) als Material für die Herstellung von Rotorblättern etabliert. Dabei besteht entweder nur ein Teil der Gurte des Rotorblattes aus GFK oder die gesamten Gurte werden aus GFK gefertigt. In Abbildung 1. ist ein schematischer Querschnitt eines typischen Rotorblattes gezeigt.

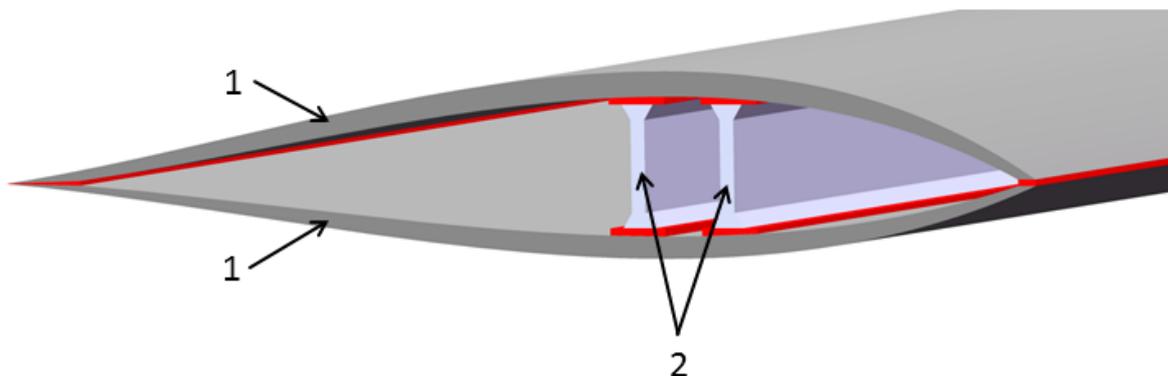


Abbildung 1: Schematischer Querschnitt eines typischen Rotorblattes einer Windkraftanlage. Die Gurte (1) werden durch Stege (2) stabilisiert und an Vorder- und Rückseite verklebt. Verklebungen sind in der Abbildung rot dargestellt.

Typische Defekte in Rotorblättern sind Delaminationen der einzelnen GFK Lagen oder eine Ablösung der Stegverklebungen. Solche Defekte können produktionsbedingt sein, jedoch können sie auch aufgrund der permanenten Beanspruchung der Rotorblätter während des Betriebes auftreten. Während Defekte an den Verklebungen an bekannten Positionen auftreten, können Delaminationen im gesamten Blattkörper auftreten.

2. Ultraschall Impuls-Echo Verfahren.

Beim Impuls-Echo Verfahren wird ein Ultraschall Impuls in das zu prüfende Werkstück über einen aufgesetzten Piezoelektrischen Wandler eingeleitet. Der Impuls breitet sich in dem Werkstück aus und wird an Grenzflächen unterschiedlicher akustischer Impedanz reflektiert. Dies können z.B. Delaminationen sein, bei denen sich kleine Luftschichten im Material bilden, oder die Rückseite des Werkstücks bei dem der Impuls an der Luft reflektiert wird. Der reflektierte Impuls wird wiederum von dem Piezoelektrischen Wandler empfangen und in ein auswertbares elektronisches Signal umgewandelt. Durch die

Messung der Zeit zwischen dem Senden und Empfangen des Impulses, kann bei bekannter Schallgeschwindigkeit des Materials die Tiefe der Reflektionsstelle ermittelt werden. Bei solchen Ultraschallprüfköpfen unterscheidet man zwischen konventionellen Prüfköpfen, welche ein einzelnes Wandlerelement besitzen, und Phased-Array Prüfköpfen bei denen der Wandler in eine Mehrzahl von einzelnen Elementen unterteilt ist.

3. Vorteile der Phased-Array Prüfung im Vergleich zur konventionellen Prüfung

3.1 Aufzeichnung der Prüfdaten und Detektion von Defekten

Der große Vorteil der Phased-Array Technologie gegenüber einer konventionellen Prüfung liegt in der Aufzeichnung von E-Bildern und C-Bildern direkt am Ultraschallgerät. Die Darstellung und Dokumentation der Ultraschallprüfung in diesen Bildern ermöglicht eine verlässliche Detektion und Vermessung von Defekten, insbesondere über große Flächen, welche mit den A-Bildern der konventionellen Prüfung nicht zu erreichen ist. Beim Einsatz konventioneller Prüfköpfe können Defekte aus praktikablen Gründen meist nur punktuell dokumentiert werden, da eine Vermessung der Ausdehnung über die Halbwerts-Methode unter den gegebenen Prüfbedingungen nur schwer zu realisieren ist. Der Einsatz der Phased-Array Technologie ermöglicht eine nahezu lückenlose Prüfung von großen Flächen und erhöht damit die Auffindwahrscheinlichkeit von Defekten. Die aufgenommenen E- und C-Bilder liefern dem Prüfer direkt eine visuelle Vorstellung des Zustandes der geprüften Flächen und unterstützen ihn somit in seiner Aufgabe. Sowohl bei der Detektion von Delaminationen als auch der Prüfung von Stegverklebungen bieten diese Darstellungen die Möglichkeit, die gefunden Defekte verlässlich zu dokumentieren. Die Speicherung der aufgezeichneten Daten auf einem tragbaren Phased-Array Ultraschallgerät ermöglicht eine spätere Begutachtung und Bewertung der aufgefundenen Anzeigen, so dass eine Bewertung nicht zwingendermaßen von einer einzelnen Person vor Ort vorgenommen werden muss.

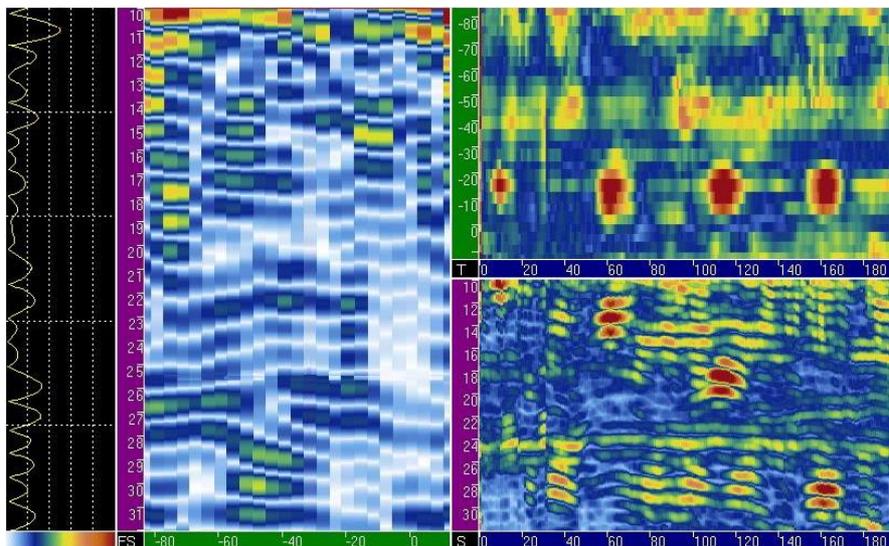


Abbildung 2: Bildschirm eines Phased-Array Ultraschallgerätes nach dem Scan eines GFK Testkörpers mit Flachbodenbohrungen mit einem Durchmesser von 13 mm. Das Gerät stellt ein aktives A-Bild (links), ein aktives S-Bild (mitte), sowie C-Bild (rechts oben) und E-Bild (rechts unten) zur Verfügung. Die Position der Flachbodenbohrungen (rote Bereiche mit hoher Reflektionsamplitude) kann in den E- und C-Bildern eindeutig lokalisiert werden, wobei das C- Bild die Position auf der Fläche und das E-Bild die Tiefe im Material abbildet, während die A- und S- Bilder bei Bedarf zusätzliche Informationen liefern.

In Abbildung 2 ist der Bildschirm eines Phased-Array Ultraschallgerätes dargestellt, nachdem ein Scan eines aus GFK gefertigten Testkörpers durchgeführt wurde. Die Aufnahme bildet die in den Testkörper eingebrachten Flachbodenbohrungen, welche einen Durchmesser von 13 mm aufweisen, ab. Neben der eindeutigen Lokalisierung der Flachbodenbohrungen im C-Bild und E-Bild werden dem Prüfer auch das aktive S-Bild, sowie das aktive A-Bild eines ausgewählten Schusses angezeigt. Somit steht dem Prüfer die volle Information direkt am Ort der Prüfung zu Verfügung.

3.2 Realisierung der Phased-Array Technologie in einem Rollenprüfkopf

Um den Anforderungen der Prüfung von Rotorblättern gerecht zu werden, wurde ein Rollenprüfkopf entwickelt, bei dem ein Linear-Array mit einer Prüffrequenz von 500 KHz zentrisch in einem mit Flüssigkeit gefüllten Reifen positioniert ist (siehe Abbildung 3). Somit dient der Reifen als Vorlaufstrecke für das Linear-Array. Durch die große Auflagefläche des Reifens auf dem Teststück ist eine einfache Aufnahme von E-Bildern und C-Bildern über eine große Prüffläche möglich. Um diese positionsgenau aufzunehmen, ist ein Wegaufnehmer an der Achse des Reifens befestigt, so dass die Positionsdaten ohne Kontakt zum Teststück aufgenommen werden. Die Ankopplung des flexiblen Reifens benötigt nur eine geringe Menge an Koppelmittel (z.B. Wasser), welches durch eine Sprühflasche aufgebracht werden kann. Der Rollenprüfkopf verfügt über einen Führungsriff, so dass die Prüfung mit nur einer Hand durchgeführt werden kann. Es sind zwei Versionen des Rollenprüfkopfes mit unterschiedlichen Vorlaufstrecken verfügbar. Die Vorlaufstrecke im Reifen beträgt ca. 25 mm bzw. 65 mm, womit sich maximale Prüftiefen von ca. 50 mm bzw. 130 mm bei einer Schallgeschwindigkeit von 2800 m/s ergeben. Der Rollenprüfkopf bietet zudem ein kompaktes und leicht zu handhabendes Design mit einem Eigengewicht von nur 2.5 kg, welches für den Einsatz unter den für die Prüfung gegebenen Bedingungen unabdingbar ist.



Abbildung 3: Das Linear-Array befindet sich in einem gefüllten Reifen aus flexiblem Material (1). Der Handgriff (2) ermöglicht eine leichte Führung des Prüfkopfes wobei die Position des Prüfkopfes durch Stützrollen (3) stabilisiert wird. Der Wegaufnehmer befindet sich auf der Achse des Prüfkopfes (4) und nimmt somit die Positionsdaten ohne Kontakt zum Werkstück auf.

3.3 Empfindlichkeit im Vergleich zur konventionellen Prüfung

Aufgrund der hohen Schallschwächung in GFK sind für deren Prüfung niedrige Prüffrequenzen und ein hoher initialer Schalldruck notwendig, um Defekte auch bei großen

Materialstärken (z.B. 80 mm) nachweisen zu können. Insbesondere bei der Prüfung der Stegverklebungen muss die gesamte Gurtstärke durchdrungen werden. Etablierte Prüfmethoden verwenden für die Prüfung konventionelle Prüfköpfe mit einer Prüffrequenz von 500 kHz und einer großen Wandlerfläche um genügend Schalldruck aufzubauen. Dabei werden die Prüfköpfe entweder in Direktkontakt oder mit Plexiglasvorläufen eingesetzt. Zur Überprüfung der Empfindlichkeit wurden Vergleichsmessungen an einem GFK Teststück mit 13 mm Flachbodenbohrungen in unterschiedlichen Tiefen zwischen einem konventionellen Prüfkopf, sowie dem Phased-Array Rollenprüfkopf durchgeführt. Abbildung 4 zeigt das Signal zu Rausch Verhältnis (S/N) als Funktion der Tiefe. Die Apertur des Phased-Array Rollenprüfkopfes wurde dabei so gewählt, dass die aktive Wandlerfläche möglichst der des konventionellen Prüfkopfes entspricht. Wie in Abschnitt 3.2 erläutert wurde, verfügt der Phased-Array Rollenprüfkopf über einen Wasservorlauf, während der konventionelle Prüfkopf in Direktkontakt betrieben wurde. Durch die Messung konnte gezeigt werden, dass der Phased-Array Rollenprüfkopf über ein nahezu konstantes S/N verfügt und bei Materialtiefen von ca. 40 mm dieselbe Empfindlichkeit wie der konventionelle Prüfkopf aufweist.

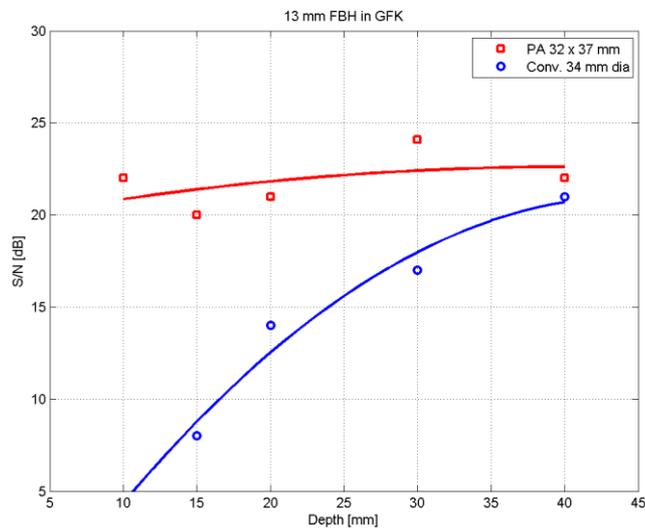


Abbildung 4: Messung des Signal zu Rausch Verhältnisses an 13 mm Flachbodenbohrungen (FBH) die in unterschiedlichen Tiefen in einen GFK-Testkörper eingebracht wurden. Die Ergebnisse des Phased-Array Rollenprüfkopfes (rote Quadrate) wurden dabei mit den Ergebnissen eines konventionellen Prüfkopfes (blaue Kreise) verglichen. Die eingezeichneten Linien dienen nur der Veranschaulichung.

Das geringere S/N Verhältnis des konventionellen Prüfkopfes in dieser Messung ist hauptsächlich auf ein längeres Nachschwingen des Prüfkopfes zurückzuführen. Die reduzierte Empfindlichkeit lässt sich durch den Einsatz von Plexiglasvorlaufkeilen ausgleichen, wodurch das Nachschwingen des Prüfkopfes in der Vorlaufstrecke kompensiert wird. Die maximale Prüftiefe wird in diesem Falle jedoch durch wiederkehrende Eintrittsechos begrenzt. Bei der Verwendung eines Plexiglasvorlaufes wird das erste wiederkehrende Eintrittsecho aufgrund der ähnlichen Schallgeschwindigkeiten von Plexiglas und GFK im Bereich der gewählten Vorlaufstrecke erwartet. Der Vorteil des Phased-Array Rollenprüfkopfes ist ein aus Wasser bestehender Vorlauf, welcher aufgrund der geringeren Schallgeschwindigkeit von Wasser die Prüfung größerer Materialstärken ohne das Auftreten von wiederkehrenden Eintrittsechos ermöglicht. Im Vergleich zur Ankopplung mit dem flexiblen Reifen des Phased-Array Rollenprüfkopfes, erweist sich die Ankopplung mit einem Vorlauf aus Plexiglas schwieriger, was sich insbesondere bei der geforderten Prüfung von großen Flächen als Nachteil erweist.

4. Referenzmessungen

4.1 Auflösungsvermögen

Zur Überprüfung des Auflösungsvermögens der Rollenprüfköpfe wurden Messungen an einem aus GFK gefertigten Stufenkörper durchgeführt. Die Messungen sind in Abbildung 5 dargestellt und demonstrieren die Fähigkeit der Prüfköpfe, Defekte ab einer Tiefe von 8mm zu detektieren.

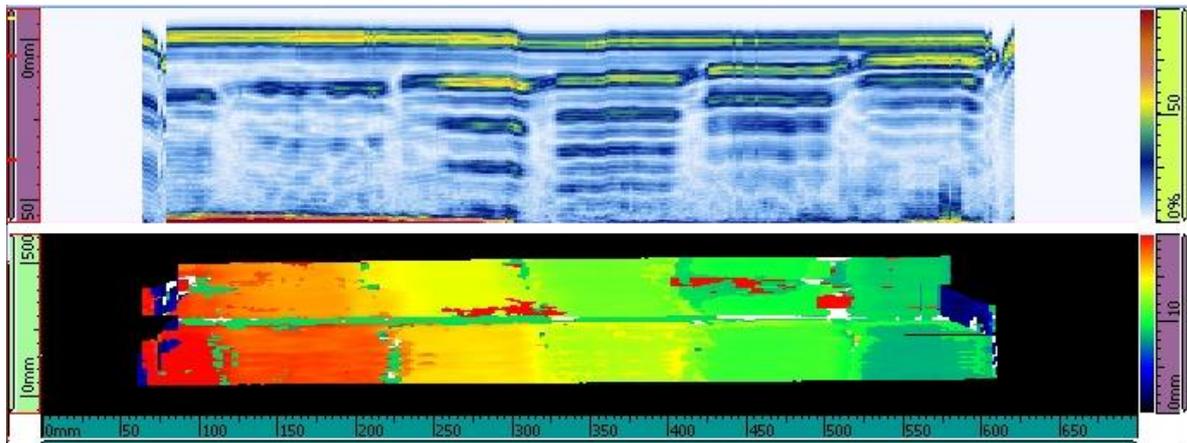


Abbildung 5: Aufnahme eines E-Bildes (oben) und D-Bildes (unten) eines Stufen-Kalibrierkörpers. Die Farbkodierung im E-Bild gibt die Amplitude des Reflektionssignals in Prozent der Bildschirmhöhe an, während die Farbkodierung im D-Bild die Tiefe der Reflektion aus der Laufzeitmessung angibt. Die einzelnen Stufen repräsentieren Tiefen von 8 mm, 10 mm, 14 mm, 16 mm, 18 mm und 20 mm.

4.2 Abbildung und Nachweis von Delaminationen

Bei der Detektion von Delaminationen ist es nötig, sowohl die Lage der Delamination als auch deren Größe festzustellen. Abbildung 6 zeigt ein D-Bild eines aus GFK gefertigten Testkörpers mit künstlich eingebrachten Delaminationen. Aus der Abbildung geht deutlich hervor, wie Delaminationen in unterschiedlichen Tiefen und unterschiedlicher Größe bei der Prüfung von großen Flächen abgebildet werden können. Durch zusätzliche Messungen an Testkörpern konnte gezeigt werden, dass Delaminationen mit einem Durchmesser von 12 mm bis in eine Tiefe von 65 mm detektiert werden können.

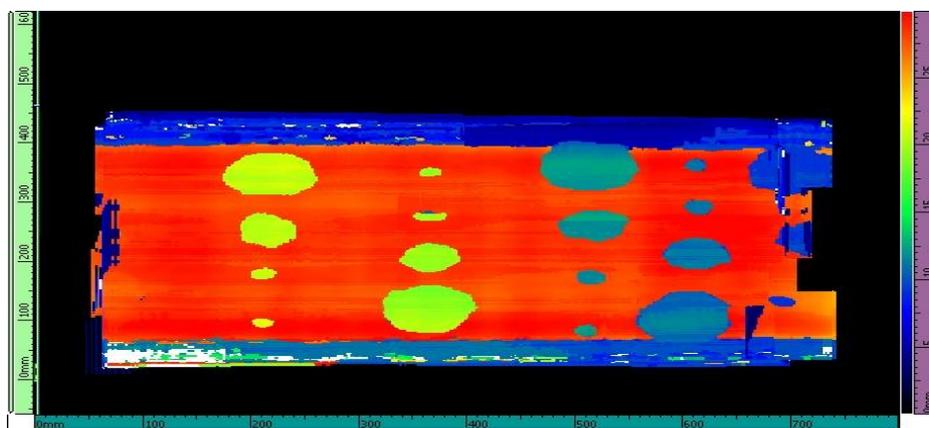


Abbildung 6: D-Bild eines Testkörpers mit künstlich eingebrachten Delaminationen. Die Farbkodierung im D-Bild repräsentiert die Tiefe der Reflektion aus der Laufzeitmessung.

4.3 Überprüfung von Stegverklebungen

Bei der Überprüfung der Stegverklebungen wird die Beobachtungsblende des Ultraschallgerätes auf das Rückwandsignal des Gurtes, von dessen Oberfläche aus geprüft wird, gesetzt. Verklebte Bereiche werden über eine Abschwächung des Rückwandsignals detektiert, da der Schalldruck teilweise oder komplett in die Verklebung transmittiert wird. Somit wird das reflektierte Signal abgeschwächt. Fehlerhafte Bereiche in denen keine Verklebung gegeben ist, erscheinen als hohe Reflektionssignale in der Auswertebende. Da die Prüfung über eine Amplitudenbewertung erfolgt, bietet sich ein C-Bild des Rückwandechos zur Prüfung der Stegverklebung an. Die Überwachung des Rückwandechos im C-Bild bietet den Vorteil, dass der gesamte Bereich der Stegverklebung geprüft und dokumentiert werden kann. Abbildung 7 zeigt ein C-Bild einer Steckverklebung eines Teststückes.

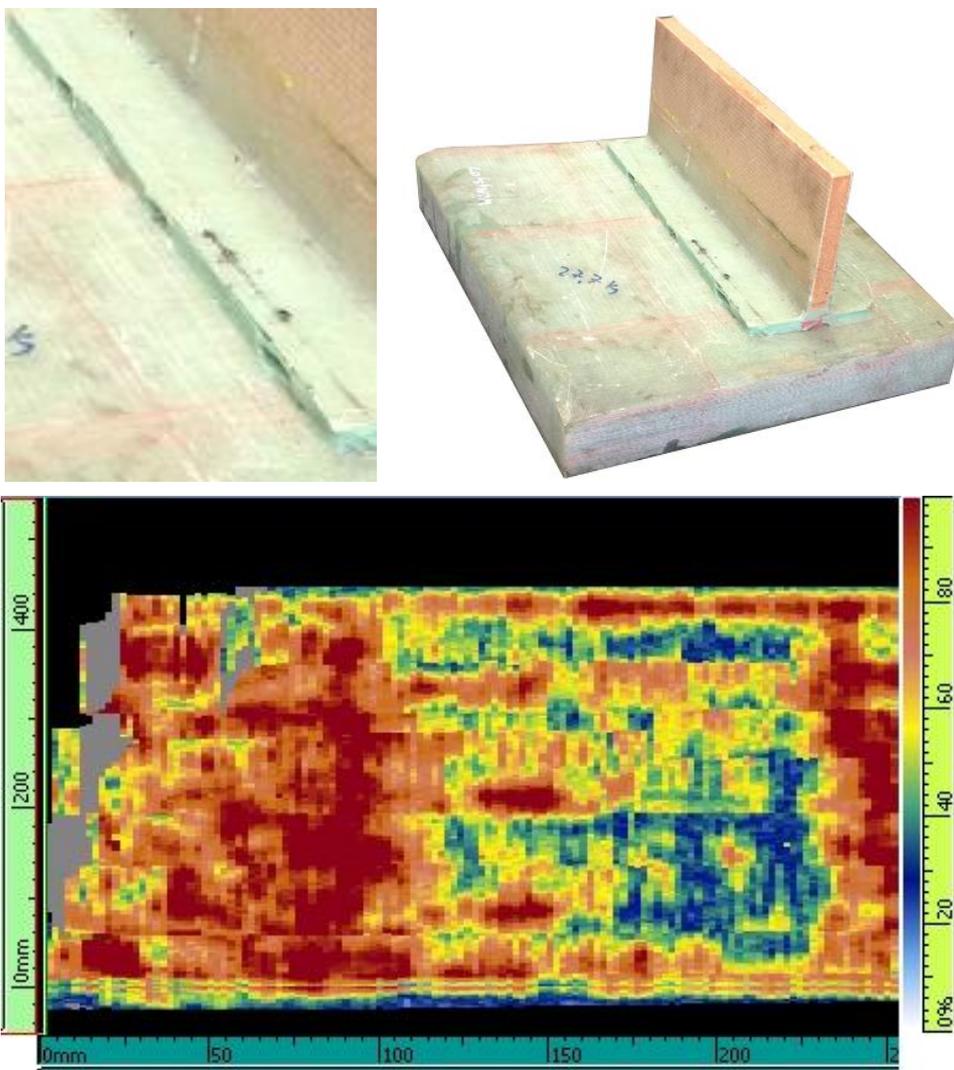


Abbildung 7: Oben rechts ist das Prüfstück mit dem auf einem 60 mm dicken GFK Stück aufgeklebten Steg zu sehen, links daneben wird eine Vergrößerung des Kleberebereiches gezeigt, in dem die Luftkanäle in der Verklebung zu sehen sind. Die untere Abbildung zeigt das zugehörige C-Bild. Die Farbkodierung im C-Bild gibt die Amplitude des Reflektionssignals in Prozent der Bildschirmhöhe an. Die verklebten Bereiche werden durch eine Abschwächung der Signalamplitude im Beobachtungsbereich detektiert (siehe Text).

Der Steg wurde auf ca. 60 mm dickes GFK aufgeklebt, wie es in der obigen Abbildung dargestellt ist. Auf dem C-Bild sind eindeutig die nicht verklebten Flächen durch eine hohe

Signalamplitude (rote Bereiche) zu erkennen. Im Bereich des Steges fällt die Signalamplitude ab (gelbe und blaue Bereiche), welches auf eine vorhandene Verklebung schließen lässt. Im Bereich der Verklebung sind zudem drei Anzeigen mit einer hohen Signalamplitude zu identifizieren. Diese erhöhten Reflektionen stammen von Kanälen, die in die Verklebung eingebracht wurden (siehe Abbildung 7). Diese Kanäle veranschaulichen die Identifikation von Fehlstellen in der Verklebung. Durch den Einsatz des vorgestellten Rollenprüfkopfes lässt sich das C-Bild auch für große Flächen leicht aufnehmen und die Inspektionsdaten können für die Dokumentation und weitere Auswertung im Ultraschallgerät gespeichert werden.

5. Zusammenfassung

Der Bedarf an zerstörungsfreien Prüfungen von sich in Betrieb befindlichen Windkraftanlagen wird aufgrund der steigenden Anzahl dieser Anlagen in Zukunft unabdingbar sein. Die hier vorgestellte Prüfungstechnik mittels eines Phased-Array Rollenprüfkopfes ist für die volumetrische Prüfung der Rotorblätter auf Delaminationen und der Prüfung von Stegverklebungen geeignet. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Prüfung der Stegverklebungen, da diese ausschlaggebend für die Lebensdauer von Rotorblättern sind. Die abbildenden Möglichkeiten der Phased-Array Technologie mittels Wegaufnehmer gesteuerter Aufzeichnung von E-Bildern und C-Bildern ermöglichen dabei eine verlässliche Abdeckung großer Flächen, die bei der konventionellen Prüfung mittels A-Bildern nicht gegeben ist. Da bei der volumetrischen Prüfung teilweise mehrere Zentimeter dicke Lagen von GFK durchdrungen werden müssen, sind niedrige Prüffrequenzen um 500 kHz nötig. Der vorgestellte Rollenprüfkopf vereint diese niedrigen Prüffrequenzen mit den Vorteilen der Phased-Array Technologie und bietet zudem ein kompaktes und leicht zu handhabendes Design, welches für den Einsatz unter den für die Prüfung gegebenen Bedingungen unabdingbar ist. Zudem ermöglichen moderne tragbare Phased-Array Ultraschallgeräte eine vollständige Dokumentation der Prüfdaten direkt vor Ort. Die Vorteile der Phased-Array Technologie ermöglichen somit den Rotorblattinspektoren eine verlässliche und aussagekräftige Prüfung der Rotorblätter. Bei der Prüfung mit niedrigen Frequenzen sollten vorzugsweise Phased-Array Ultraschallgeräte eingesetzt werden, die über genügend lange Pulsbreiten des Sendepulses verfügen um das 500kHz Array in der Resonanz anzuregen, und zudem eine genügend große Bandbreite am Eingangskanal aufweisen, um die niederfrequenten Signale zu empfangen. Diese Bedingungen werden als Beispiel vom „Krautkramer USM Vision +“ der Firma GE Sensing & Inspection Technologies erfüllt.

Referenzen

- [1] A. Jüngert et al.: Zerstörungsfreie robotergestützte Untersuchung der Rotorblätter von Windenergieanlagen mit Ultraschall und Thermographie. ZfP-Zeitung 115, Juni 2009, S. 43
- [2] A. Jüngert, C. Große, M. Krüger: Inspektion der Rotorblätter von Windenergieanlagen mit akustischen Verfahren. DACH-Tagung St. Gallen 2008. NDT.net