

Auswertung und Darstellung von Ultraschallmessungen an den Betonfundamenten der modernen Windkraftanlagen

Daniel JAKUBOWSKI¹, Boris RESNIK¹, Dirk WERNER²

¹ Beuth - Hochschule für Technik Berlin, Berlin

² HTW - Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Berlin

Kurzfassung.

Für die dynamisch stark beanspruchten WEA-Bauwerke ist eine effektive Qualitätskontrolle von entscheidender Bedeutung. Es ist bekannt, dass gefährliche Defekte im Bereich der Betonfundamente nicht nur durch äußere Einwirkungen, wie z.B. Temperaturänderungen oder durch zeitabhängiges Materialverhalten, sondern auch durch verdeckte Baumängel und Planungsfehler hervorgerufen werden. Eine Erfassung der Schäden im Inneren der WEA-Fundamente ist wesentlich komplizierter als bei den sichtbaren Rissen. Mit dem Verfahren der Ultraschallmessung lassen sich auch die inneren Schäden und Materialfehler in den behandelten WEA-Fundamenten frühzeitig, d.h. bevor sie z.B. als Risse an der Oberfläche oder Wasserschäden sichtbar werden, feststellen. Die genaue Kenntnis der Lage und der Ausdehnung von solchen Anomalien in den Fundamenten helfen somit deren Bedeutung für die Sicherheit des Bauwerkes und die zeitliche Entwicklung besser zu beurteilen. Die bereits durchgeführten Testmessungen an speziellen Testblöcken und realen Windkraftanlagen bestätigen, dass diese Methode ein großes Potential bei der Begutachtung von WEA-Fundamenten aufweist. Die gewonnenen Erfahrungen zeigen allerdings auch, dass die Interpretation der gewonnenen Erkenntnisse ein gewisser Grad an Erfahrung erfordert und weiter verbessert werden muss. Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurden von den Autoren sowohl die Möglichkeiten als auch die Grenzen dieser Methoden gezeigt und die Wege der Datenauswertung bzw. -präsentation vorgeschlagen.

1. Einführung

Durch die enormen Investitionen der letzten Jahre leistet die Windenergie schon heute einen wesentlichen Beitrag zur Energieversorgung der Bundesrepublik Deutschland. Derzeit sind in Deutschland bereits mehr als 22.000 Windenergieanlagen (WEA) in Betrieb. Über 10.000 dieser Anlagen wurden allerdings vor 2003 errichtet und erreichen im kommenden Jahrzehnt das Ende ihrer geplanten Lebensdauer von ca. 20 Jahren. Um die Ausbauziele der Energiewende erreichen zu können, muss in Zukunft deswegen neben der Erschließung neuer Standorte auch ein erheblicher Aufwand für die Instandhaltung der vorhandenen Anlagen betrieben werden.

Eine Grundvoraussetzung für eine effektive Instandhaltung bzw. Sanierung der bestehenden Anlagen, sind bekanntlich aktuelle und objektive Nachweise vorhandener Mängel. Vor diesem Hintergrund und angesichts vermehrt auftretender Fundamentschäden an WEA unterschiedlicher Hersteller hat es sich in den letzten Jahren gezeigt, dass im Bereich der Turmeinbindung im Fundament ein spezifischer Schwachpunkt der gesamten Bauwerkskonstruktion



vorliegt. Ein typisches Schadensbild ist dabei ein halbkreis- oder ein ringförmig um den Turm verlaufender Riss bzw. Abplatzungen an der Oberseite der Fundamente sowie Wassereintritt im Fundamentinneren (Abb. 1). Die Ursache für diese Schäden sind zumeist irregulär große Bewegungen an Fundamenteinbauteilen (FET) der WEA, die z. B. aufgrund verdeckter Baumängel bei der Fundamentherstellung oder auch durch Planungsfehler hervorgerufen werden. Je früher solche Schäden erkannt werden, desto größer ist das Spektrum von Möglichkeiten, einen ungeplanten Anlagenstillstand und eine teurere Sanierung zu verhindern.

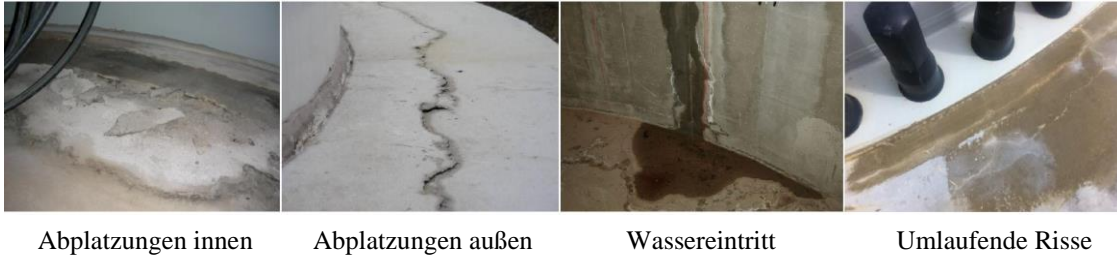


Abb. 1: Typische Defekte der WEA-Fundamente (exemplarisch)

Im Sinne der aktuellen DIN umfasst die Instandhaltung alle technischen und administrativen Maßnahmen sowie das Management der Maßnahmen, die zur Erkennung des Ist-Zustandes, zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes, zur Rückführung in diesen und zur Steigerung der Funktionssicherheit während des Lebenszyklus einer Einheit benötigt werden. Entsprechend der gültigen Regelung für die modernen WEA ist auch ihre Gründungs- und Tragsstruktur während des Betriebs durch Sachverständige in regelmäßigen Intervallen zu prüfen.

2. Erfassung von Fundamentschäden bei den periodischen WEA-Untersuchungen

Die sichtbaren Risse auf den Fundamenten sind als erste Zeichen von Deformationsprozessen im Bauwerk zu betrachten [3, 4, 5]. Genauso wie bei anderen Gründungen dieser Art entstehen sie in den WEA-Fundamenten durch (örtliche) Überschreitung der aufnehmbaren Zugspannung des Betons i.d.R. senkrecht zur Hauptzugspannung. Da die Zugspannungen ohne Risse nicht durch den Stahl aufgenommen werden, sind Risse somit im Stahlbetonbau kaum zu vermeiden. Durch die Risse kann Regenwasser eintreten, welches die Bewehrung angreift. Die Bewehrung korrodiert folglich und die Stabilität wird beeinträchtigt. Zudem kann der Riss durch das Regenwasser weiter ausgewaschen werden, wodurch noch mehr Bewehrung freigelegt wird. Das im Fundament eingedrungene Wasser vergrößert bei Frost sein Volumen und kann zusätzliche Hohlstellen erzeugen.

Die Analyse von entstandenen Rissen, d.h. ihrer Breite, ihrer Form (Verlauf der Breite längs des Risses), Tiefe, Lage, Alter usw., sind bei den regelmäßigen Untersuchungen von einer sehr großen Bedeutung. Daraus können die ersten Hinweise zur Rissursache gewonnen werden. Ein wichtiger Parameter zur Beurteilung des Fundamentzustandes ist die festgestellte Rissaktivität (zeitliche Veränderung), die ebenfalls nur durch das entsprechende messtechnische Erfassen realisiert werden kann. Eine solche regelmäßige Kontrolle der sichtbaren Risse wird bei den WEA-Fundamenten u.a. durch die gültigen Richtlinien [1 und 2] geregelt. Die Rissbreiten sollen dabei in der Regel mit einem Rissbreitenmaßstab oder mit einer Risslupe erfasst werden. In den Richtlinien sind keine Merkmale der möglichen Interpretation außer dem Grenzwert von 0,3 mm gegeben. Risse oberhalb dieser zulässigen Rissbreite sind durch einen geeigneten Sachverständigen zu begutachten.

Die Erfassung von Schäden im Inneren der WEA-Fundamente ist wesentlich komplizierter als bei den sichtbaren Rissen. Würde man dabei die zerstörenden Prüfmethode in Betracht ziehen, müssten mehrere Proben an verschiedenen Stellen des Bauteils entnommen werden, um eine genaue Untersuchung zu ermöglichen. Da die behandelten Anlagen jedoch noch in

Betrieb sind, kommen solche Methoden meistens nicht in Betracht. Im Stahlbetonbau werden inzwischen auch verschiedene Methoden zur zerstörungsfreien Prüfung von Bauteilen angewendet, die durch die ständige Weiterentwicklung in den letzten Jahren wesentlich vereinfacht und verbessert wurden. Das Verfahren der Ultraschallmessung gehört zu solchen Prüfmethoden. Dadurch lassen sich auch die inneren Schäden und Materialfehler in den behandelten WEA-Fundamenten frühzeitig, d.h. bevor sie z.B. als Risse an der Oberfläche oder Wasserschäden sichtbar werden, feststellen. Die genaue Kenntnis der Lage und Ausdehnung von solchen Anomalien in den Fundamenten helfen deren Bedeutung für die Sicherheit des Bauwerkes und die zeitliche Entwicklung besser zu beurteilen.

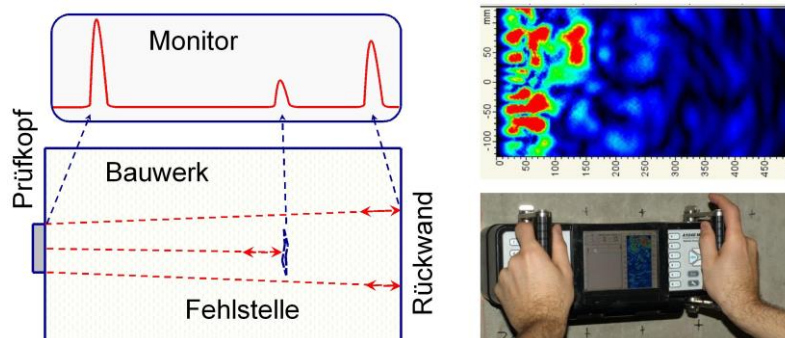


Abb. 2: Prinzip der Ultraschalluntersuchungen von WEA-Fundamenten

Die Ultraschallmessung beruht auf dem Prinzip der Schwellenausbreitung im Material und erfolgt im Niederfrequenzbereich. Ein Impuls wird dabei vom Sender in das Bauteil (Abb. 2) geschickt. Der erste Ausschlag auf dem Monitor ist der Übergang in das Bauteil. Sollte der Impuls auf eine Fehlstelle, z.B. einen Riss oder ein Bewehrungsseisen, treffen, wird dieser wieder reflektiert und ein weiterer Ausschlag ist auf dem Monitor zu erkennen. Impulse, die ungehindert das Bauteil durchlaufen, werden spätestens an der Rückwand reflektiert, wodurch ein erneuter Ausschlag entsteht. Sollten zu viele Hindernisse im Weg sein, erreicht kein Impuls die Rückwand und das entsprechende Echo entfällt.

Obwohl die Ultraschallmessungen auf den gleichen Prinzipien wie z.B. in der Medizintechnik beruht, sind sie im Bauwesen erst seit einigen Jahren im Einsatz und als Gegenstand der angewandten und interdisziplinären Forschung zu betrachten. Als Ergebnis einer solchen Aufnahme von mehreren Sendern des Messsystems und mehreren Standpunkten des Bauwerkes entstehen die farbigen, zwei- bzw. dreidimensionalen Darstellungen. Bei der Entwicklung von interaktiven computergestützten Auswertestrategien dieser Art kann auf das Know-how vergleichbarer Verfahren zugegriffen werden, welche z.B. in der Fernerkundung und dem Laserscanning im Vermessungswesen zu finden sind. Vor diesem Hintergrund wurden in den letzten Jahrzehnten viele Auswertemethoden entwickelt, die jedoch für eine spezielle Anwendung wie Ultraschallmessungen eine „fachbezogene“ Anpassung erfordern. Im Rahmen einer Abschlussarbeit an der Beuth Hochschule für Technik Berlin im Studiengang Geodäsie sollte deswegen untersucht werden, wie die modernen 3D-Auswerteverfahren eine Erfassung von Rissen im Inneren der WEA-Fundamente erleichtern können und wieweit die so gewonnen Informationen der Realität entsprechen.

3. Verwendete Messtechnik und Software

Im Rahmen des gemeinsamen Forschungsvorhabens „Entwicklung von Verfahren zur frühzeitigen Erkennung sicherheitsrelevanter Defekte an Fundamenten von Windenergieanlagen“ [6] wird von den Autoren zurzeit das Messsystem A1040 Mira der Firma Acoustic Con-

trol Systems [7] eingesetzt, das auch bei den hier beschriebenen Untersuchungen zur Anwendung kam. Dieses Messsystem wurde gezielt für eine zerstörungsfreie Prüfung von Betonbauwerken konzipiert. Die Messung erfolgt mit Ultraschall im Frequenzbereich zwischen 20-100 kHz. Die Prüfköpfe werden über die Griffe des Gerätes (Abb. 2) an das Bauteil gepresst, wobei über einen Druckkontakt die Ausbreitung der Scherwellen (Transversalwellen) ausgelöst wird. Da die Prüfköpfe über trockenen Punktkontakt (Dry-Point-Contact) funktionieren und somit kein Kontaktmittel benötigen, ist eine rückstandslose Messung möglich. Laut Herstellerangaben können bei solchen Untersuchungen Tiefen ins Bauteil von bis zu 2,00 m in Abhängigkeit von der Materialbeschaffenheit erreicht werden. Das Gerät ermöglicht die Datenerfassung nach zwei Messverfahren.

- das sog. View-Mode aus einer einzigen Gerätaufstellung ist am besten geeignet, um die schnellen Einblicke in die kontrollierten Betonbauteile zu ermöglichen;
- und beim sog. Map-Mode ist es möglich, ein vorher gekennzeichnetes Messraster vollständig aufzunehmen und so einen Gesamteindruck über das Bauteil zu erlangen.

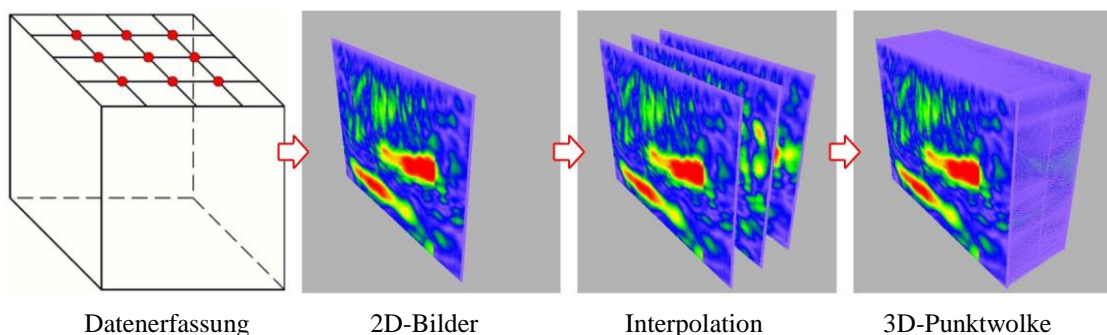


Abb. 3: Prinzip der Datenauswertung

Bei den folgenden Ausführungen wird nur die zweite Variante näher behandelt. Als Ergebnis von solchen Aufnahmen liegen zurzeit nur die entsprechenden zweidimensionalen Bilder (Abb. 3) vor, die anhand von Amplitudenbildern der Rohdaten mit Hilfe der sog. SAFT-Rekonstruktion (SAFT = Synthetische Apertur Fokus Technik) errechnet werden. Der Abstand der einzelnen Bilder (Ebenen) ist gleich dem des vorgegebenen Messrasters bei der Aufnahme und liegt in der Regel bei 10 cm. Um eine räumliche Analyse des ganzen Datenbestandes zu ermöglichen, wurde von den Autoren im Rahmen des Forschungsprojektes ein Auswerteworkflow zum Erzeugen von dreidimensionalen Punktwolken aus diesen Bildern erstellt. Für die Schaffung der dritten Dimension müssen die Daten zwischen den Ebenen linear interpoliert werden. Da jedoch eine solche Interpolation die vorhandene Datenmenge enorm vergrößern kann, ist es oftmals sinnvoll, vor diesem Schritt die Bildauflösung innerhalb der Ebenen zu reduzieren.

Die ersten Auswerteschritte bei den beschriebenen Tests wurden mit den kommerziellen Softwareprodukten IDEALviewer (I-DEAL Technologies, [8]) und Voxler 3 (Goldensoftware, [9]) ermöglicht. Beide verwendeten kommerziellen Produkte haben ihre Vor- und Nachteile. So war es möglich, mit dem Programm IDEALviewer zahlreiche Messungen einer aufgenommenen Map zu visualisieren. Eine weitere Verarbeitung der erzeugten Messdaten mit diesem Programm war jedoch nur eingeschränkt möglich. Mit dem zweitgenannten Programm Voxler 3 könnten die Daten ebenfalls sehr gut dargestellt werden, wobei allerdings zunächst jede einzelne Messung mit einem hohen Zeitaufwand importiert und an die richtige Stelle platziert werden musste. Der Vorteil dieser Software besteht jedoch in sehr umfangreichen Export-Möglichkeiten für die folgende Weiterverarbeitung, die in den behandelten Projekten mit dem multifunktionalen Programm Matlab (MathWorks, [10]) realisiert wurde. Für die Schaffung eines dreidimensionalen Datenbestandes wurden dafür in diesem Programm die eigenen Skripte geschaffen.

4. Ergebnisse der Testmessungen und -auswertungen an den Prüfkörpern

Für die ersten Messungen unter Laborbedingungen wurden mehrere Prüfkörper (40 x 40 x 40 cm) mit unterschiedlichsten eingebauten Gegenständen angefertigt, die u.a. die möglichen Defekte in den WEA-Fundamenten simulieren sollten. Außerdem enthielt jeder Prüfkörper ein Schalungsanker in Form eines Kunststoffrohres mit einem Radius von 11 mm. Die Datenerfassung auf der Oberfläche erfolgte immer in einem 3*3-Raster (Abb. 3), woraus sich jeweils 9 Messpunkte pro Prüfkörper ergaben. Ein Ziel dieser Untersuchung war es festzustellen, wie genau sich die eingebaute Gegenstände und Schädigungen in Ihrer Lage und Genauigkeit bestimmen lassen.

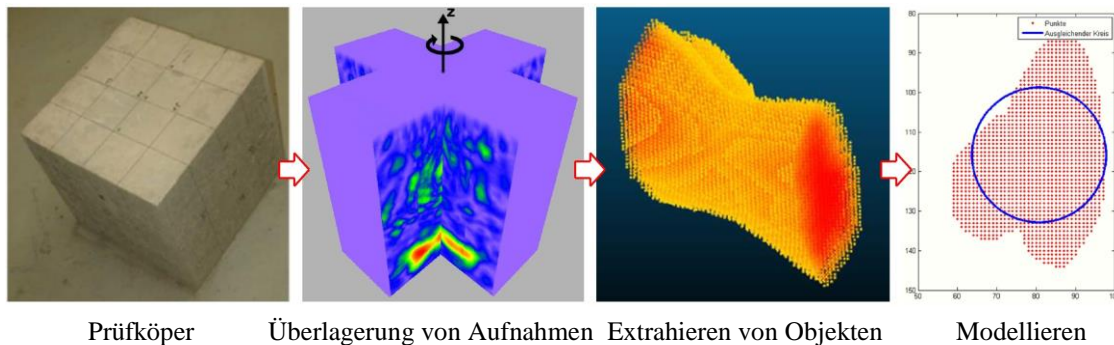


Abb. 4: Ablauf der Auswertung von Testmessungen an den Prüfkörpern

Da die Beschreibung von allen Mess- und Auswertungsergebnissen den Umfang des Beitrages sprengen würde, soll hier exemplarisch nur die Auswertung für die o.g. Schalungsanker näher betrachtet werden, die in allen Prüfkörpern eingebaut wurden. Bei der Datenauswertung wurden diese Bereiche jedes Prüfkörpers extrahiert (Abb. 4), bereinigt und für weitere Verarbeitung in das multifunktionale Programm Matlab exportiert. Um die so entstandenen zylinderförmige Objekte zu modellieren, wurden dann unterschiedliche Lösungen getestet. Besonders vielversprechenden Ergebnisse der Datenauswertung wurden mit der Anpassung eines ausgleichenden Kreises erreicht. Diese Ergebnisse für fünf verwendete Prüfkörper sind in der Tabelle 1 aufgelistet. Die Qualität der Anpassung wurde anhand der bekannten Abmessungen des Objektes ($R = 11 \text{ mm}$) statistisch geprüft. Die so gewonnen Standardabweichungen s_R für die jeweiligen Testkörper werden in der Tabelle zusammen mit den mittleren Werten von ermittelten Radien R_M präsentiert. Bei den Ergebnissen werden sowohl die einzelnen Rastermessungen (vor der Überlagerung) als auch die Kombinationen aus beiden orthogonalen Datenerfassungen (nach der Überlagerung) aufgelistet. Aus den Ergebnissen ist zu erkennen, dass die gewonnen Geometrien, ausgenommen Prüfkörper 4, die reale Abmessungen des Schalungsankers recht gut beschreiben könnten. Die Überlagerung von mehreren Aufnahmen hat dagegen keine zu erwartende Steigerung der Messgenauigkeit geliefert. Die gewonnenen Erkenntnisse werden bei den weiteren Untersuchungen geprüft und interpretiert.

Tabelle 1. Ergebnisse der Datenauswertung

Prüfkörper	Ohne Überlagerung		Mit Überlagerung	
	R _M (mm)	s _R (mm)	R _M (mm)	s _R (mm)
1	11,4	1,5	11,5	1,6
2	10,9	3,7	10,8	3,6
3	12,6	3,7	12,1	3,2
4	20,0	10,4	20,0	10,4
5	13,1	3,0	12,4	1,6

5. Ergebnisse der Testmessungen und -auswertungen an den WEA-Fundamenten

Inzwischen wurden von Autoren auch die zahlreichen Messungen an realen WEA-Fundamenten vorgenommen, von denen hier nur ein Beispiel dieser Art exemplarisch präsentiert werden muss. Es handelt sich dabei um ein Fundament einer typischen 2MW-Anlage mit z.T. auch auf der Oberfläche gut sichtbaren Rissen. Bei den hier präsentierten Ergebnissen wurden zwei etwa gleich große Messraster mit den Abmessungen von 44 x 99 cm bzw. 44 x 77 cm innerhalb des Turmes angelegt. Während der erste Testbereich etwa der Hauptwindrichtung entsprach, war der zweite Messbereich gezielt etwa orthogonal dazu angelegt. Es war folglich zu vermuten, dass die beiden Bereiche im Laufe des mehrjährigen Betriebes den unterschiedlichen dynamischen Belastungen unterlagen und somit unterschiedliche Schadensbilder aufweisen sollten. Ziel der folgenden Ultraschallmessungen war es folglich, die entsprechenden Differenzen in den Auswertebildern zu erkennen und daraus dann Anomalien abzuleiten.

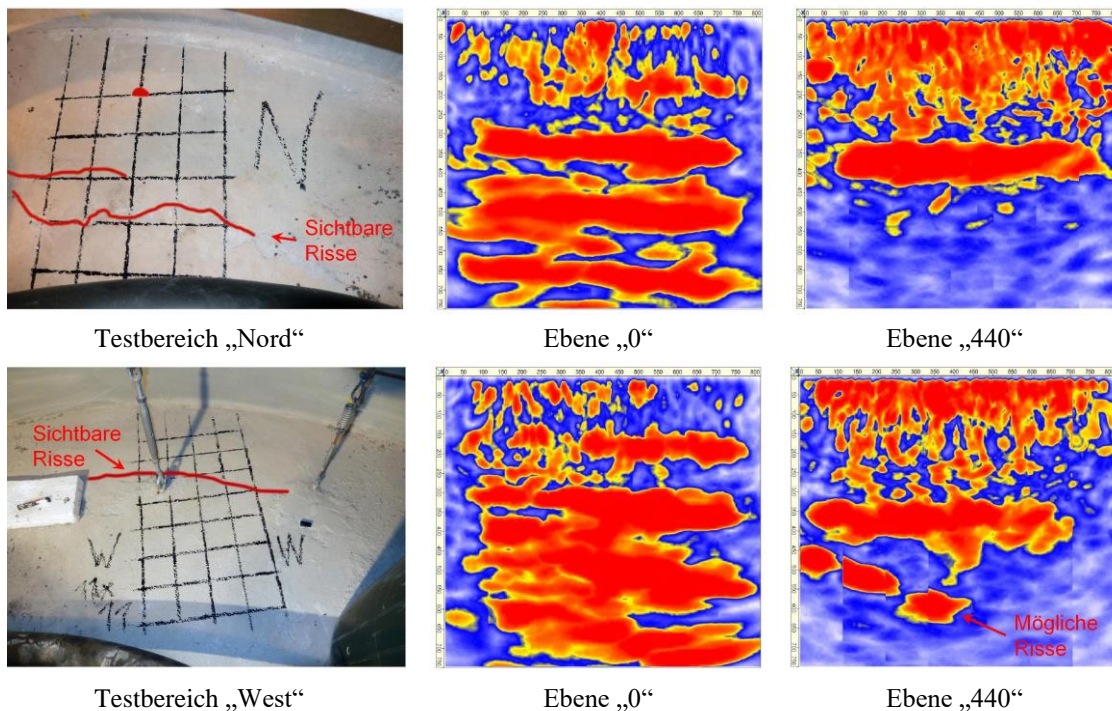


Abb. 5: Testmessungen an den realen WEA-Fundamenten (exemplarisch)

Teilweise wurden so Unregelmäßigkeiten und Unterschiede in beiden Messrastern erkannt, was darauf hindeutet, dass es sich hierbei um mögliche Risse handeln kann. Da die Formgebung dieser möglichen Risse teilweise sehr abstrakt erscheint kann jedoch nicht abschließend festgehalten werden, ob sich hierbei wirklich um Risse handelt. Für die weitere Bestimmung und Zuordnung der gefundenen Anomalien könnte ein Vergleichsverfahren herangezogen werden, welche die ersten Ergebnisse bestätigt bzw. widerruft.

Die bereits durchgeführten Testmessungen an unterschiedlichen Windkraftanlagen bestätigen, dass diese Methode erfolgreich zur Begutachtung von Fundamenten dienen kann. Ein

inhomogenes Betongefüge, oder ein anderes Material, führt zu Streuungen, oder Reflektionen der Ultraschallsignale, wodurch auch die Risse schnell erkannt werden können. Die gewonnenen Erfahrungen zeigen allerdings auch, dass die Interpretation der gewonnenen Erkenntnisse einen gewissen Grad an Erfahrung erfordert und weiter verbessert werden muss.

6. Zusammenfassung

Wie alle komplizierten Ingenieurbauwerke unterliegen auch die modernen WEA einem hohen Schadensrisiko. Da viele WEA im kommenden Jahrzehnt das Ende ihrer geplanten Lebensdauer erreichen, werden Kompetenzen in den Bereichen der Lebensdauerproblematik immer stärker zu einem wichtigen nationalen und internationalen Wettbewerbsfaktor.

Die Auswertung nach dem Auswerteworkflow zur Entstehung von Punktwolken aus Ultraschallmessungen hat teilweise sehr gute Ergebnisse geliefert. So konnte anhand der vorgestellten Verfahren eine vollständige dreidimensionale Punktwolke geschaffen werden, mit deren Hilfe Messungen eines Messrasters kombiniert werden konnten. Die statistische Auswertung der erzeugten Daten der kombinierten Messung führte teilweise zu besseren Auswertergebnissen, als die Einzelmessungen. Daher ist bei kommenden Messungen dazu zu raten, nach dem vorgestellten Schema zu verfahren. Grundsätzlich stellt die Interpretation der gewonnenen Messdaten die größte Herausforderung dar. Teilweise werden Formen nicht detailgetreu abgebildet, was ein hohes Maß an Erfahrung verlangt, um Daten richtig zu interpretieren.

Die Anwendung von Ultraschallmessungen in diesem Bereich wurde bis jetzt kaum untersucht. Hauptgründe dafür sind die benötigten umfangreichen Investitionen in der Entwicklungsphase und die Notwendigkeit einer intensiven interdisziplinären Forschungsarbeit. Anhand der inzwischen gewonnenen Erkenntnisse wollen die Autoren in den kommenden Jahren das vorhandene Forschungspotenzial ihrer Hochschulen mit den langjährigen Erfahrungen des kooperierenden Ingenieurbüros bündeln. Somit können alle Ansätze auf einem hohen wissenschaftlichen Niveau realisiert und anschließend auf ihre unmittelbare Praxistauglichkeit hin überprüft werden.

Referenzen

- [1] Richtlinie für Windenergieanlagen - Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung. Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), 2012,
- [2] Technische Richtlinie für Erzeugungseinheiten, Betrieb und Instandhaltung von Kraftwerken für Erneuerbare Energien. Fördergesellschaft Windenergie und andere Erneuerbare Energien (FGW e.V.), 2014.
- [3] Resnik B. & Schiefelbein: Frühzeitige Erkennung sicherheitsrelevanter Defekte an Fundamenteinbauteilen von Windenergieanlagen. In: Hanke/Weinold (Hrsg) 17. Internationale Geodätische Woche, Wichmann Verlag, Heidelberg, 2013.
- [4] Resnik, B., Schiefelbein, N., Werner D.: Visuelle und messtechnische Erkennung sicherheitsrelevanter Defekte an Fundamenten von Windenergieanlagen. In: Domnick & Heimann (Hrsg.), Forum Geo Bau, Bd.4, Shaker Verlag, Aachen. S. 33 – 40. 2013
- [5] Werner D.: Ursachen und Sanierung von Schäden an Windenergieanlagen – Einige Praxisbeispiele zu Fundamenten. VDI-Konferenz Hamburg. Vortrag, 2012.
- [6] <https://prof.beuth-hochschule.de/resnik/wesafe-projekt>
- [7] <http://www.acsys.ru/eng/production/detail/a1040-mira>
- [8] <http://www.i-deal-viewer.com>
- [9] <http://www.goldensoftware.com/products/voxler>
- [10] <http://de.mathworks.com>