

Der moderne Klopfest der zerstörungsfreien Materialprüfung von Rotorblättern von Windkraftanlagen

Gaetano Andreisek¹, Bernhard U. Seeber¹

¹ Audio-Signalverarbeitung, 80333 München, E-Mail: gaetano.andreisek@tum.de, seeber@tum.de

Einleitung

In Deutschland sind derzeit über 28.000 Windenergieanlagen im Betrieb [1]. Die Wartung der Anlagen ist ein wichtiger Baustein zur Gewährleistung einer Lebensdauer von 15 bis 20 Jahren. In sog. Wiederkehrenden Prüfungen wird der Zustand von kritischen Elementen der Windenergieanlagen geprüft und dokumentiert [2]. Die Rotorblätter werden von erfahrenen Prüfern visuell auf sichtbare Fehler wie Risse, Abplatzungen, Klebefehler oder Oberflächenwellungen inspiziert. Um nicht sichtbare Defekte zu lokalisieren oder das Ausmaß bereits festgestellter Fehlstellen zu konkretisieren, wird oftmals der Klopfest herangezogen. Dabei verwenden die Prüfer einen harten Gegenstand, klopfen damit die Oberfläche ab und gewinnen durch die Klopfgeräusche Informationen über den lokalen Zustand des Rotorblattes (im Bereich des Klopfpunktes). Der Klopfest zeichnet sich durch eine Reihe von Vorteilen aus, die vor allem bei der Anwendung an Rotorblättern von Windenergieanlagen zur Geltung kommen. Insbesondere eignet sich diese Methode zur kostengünstigen und schnellen Lokalisation und Einordnung von Defekten. Der Klopfest wie hier beschreiben kann jedoch keine detaillierte, reproduzierbare und objektive Aussage über die Defektstärke oder -tiefe liefern. Eine maschinenbasierte Auswertung der Klopfgeräusche kann diese Defizite ausgleichen. Im Folgenden wird ein Modell skizziert, welches die Klopfgeräusche analysiert und auf Basis von trainierten Algorithmen eine Vorhersage der lokalen, also klopfpunktnahen Defektstärke vornimmt.

Defektstärkemodell

Die Defektstärke soll eine messbare Größe über das Ausmaß eines definierten Defektes liefern. Je größer dieser Wert, desto kritischer der Defekt. Im Gegensatz zum kategorischen, meist binären Inspektionsergebnis der Prüfer (intakt oder defekt) kann mit einem Defektstärkemodell eine detaillierte Aussage über den Defekt getroffen und somit die Entwicklung eines Defekts über einen Prüfzeitraum nachverfolgt werden. Für die hier vorgestellten Resultate wurde ein Defektstärkemodell entwickelt, das Delaminationen und Lufteinschlüsse im Glasfaserverbundwerkstoff der Rotorblattholme bemisst. Die Berechnung des Modells resultiert in einen Einzahlwert, welcher die Defektstärke im Bereich um den Klopfpunkt bemisst. Die hier vorgestellten Daten basieren auf verschiedene Messstellen an einem SSP 34m Rotorblatt, welche unterschiedliche Holmdicken aufweisen.

Modell zur Vorhersage der Defektstärke

Es gilt die Defektstärke von Delaminationen und Lufteinschlüssen auf Basis der Klopfgeräusche vorherzusagen. Es wurden rechteckige Klopfpunktraster mit

vertikalen sowie horizontalen Messpunktabständen von je 4cm definiert. Ein Luftschallmikrofon wurde in einem Abstand von 50cm zur Rotorblattoberfläche so positioniert, dass eine Gruppe von etwa 4 auf 4 Klopfpunkte gemessen wurde, bevor es neu positioniert wurde. Es wurde ein PCB C03 Modalhammer mit harter Kunststoffspitze verwendet. Insgesamt wurden 324 Klopfpunkte gemessen, wobei für jeden Klopfpunkt die Defektstärke bestimmt wurde.

Da die Defektstärke als reelle Zahl auf einer intervallskalierten Skala vorliegt, können Regressionsmodelle zur Bestimmung der Beziehung zwischen Klopfaufnahmen und Defektstärken herangezogen werden. Es ist üblich die Datengrundlage in Trainings- und Evaluationsdaten zu unterteilen, um die Regressionsmodelle zu trainieren. Hier wurde das Kreuzvalidierungsverfahren zur Datenpartitionierung gewählt. Die reinen Klopfaufnahmen werden verwendet, sondern lediglich die akustische Information auf Basis von Merkmalen der Aufnahmen. Diese Merkmale bilden charakteristische Eigenschaften der Klopfgeräusche, wie beispielsweise den spektralen Schwerpunkt mit Einzahlwerten ab. Da zunächst nicht bekannt ist, welche Merkmale sich für eine Vorhersage der Defektstärke eignen und das Verwenden von vielen Merkmalen zu einem sog. „Overfitting“ der Regressionsmodelle führen kann, muss eine geeignete Auswahl getroffen werden. Zur Eingrenzung der Merkmale kann beispielsweise das „Least absolute shrinkage and selection operator“, kurz Lasso verwendet werden [3]. Die nun ausgewählten Merkmale werden, unter Berücksichtigung der gewählten Datenpartitionierung des Kreuzvalidierungsverfahrens den Regressionsmodellen zugeführt. Es stehen eine Vielzahl von linearen und nichtlinearen Modellen zur Verfügung, u.a. Support Vector Regression, Künstliche Neuronale Netzwerke, Regressionsbäume und es ist üblich nicht nur ein, sondern eine Kombination von Modellen zur Vorhersage zu verwenden. Die Abweichung der Vorhersage von den Zieldaten kann dann mit gängigen Fehlermaßen bemessen werden.

Ergebnis

Die Defektstärke wurde mit einer Kombination aus Regressionsmodellen vorhergesagt. Dabei wurden 15 akustische Merkmale verwendet. Die Vorhersagen der gemessenen Daten sind in Abbildung 1 zu sehen (Predictions), wobei die Zielwerte (Targets) auf der Abszisse aufgetragen sind. Die Defektstärke wurde dabei auf den Wertebereich zwischen -1 und 1 skaliert, wobei der Wert -1 für Klopfpunkt ohne Delaminationen oder Lufteinschlüsse steht und der Wert 1 den gravierendsten, da am meisten durch diese Defekte beeinträchtigten Fall repräsentiert. Eine perfekte Vorhersage würde die Datenpunkte auf die rot gestrichelte Linie setzen. Werte unterhalb der Diagonale

unterschätzen, Werte oberhalb überschätzen die Defektstärke. Der RMS-Fehler der Vorhersage beträgt 0,132 und der absolute, mittlere Fehler beläuft sich auf 0,098.

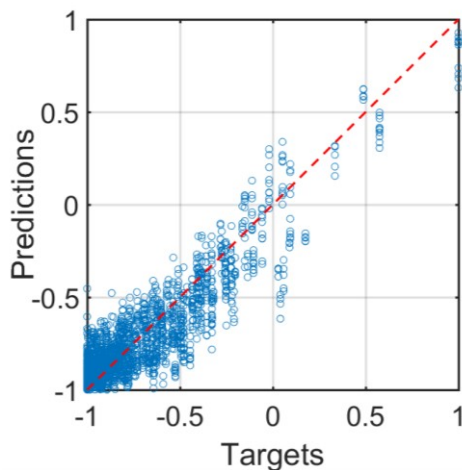


Abbildung 1: Vorhersageergebnis der Defektstärke von Delaminationen und Lufteinschlüssen in Rotorblattholmen von Windenergieanlagen auf Basis von Klopfaufnahmen. Die Vorhersage wird mittels Regressionsmodellen für jeden gemessenen Klopfpunkt getroffen. Die Defektstärke ist auf den Wertebereich -1 bis 1 skaliert, wobei -1 keine Defekte (intakt) unterhalb des Klopfpunktes bedeutet und Werte größer 1 Klopfpunkte mit Defekten bemisst. Je größer der Wert, desto größer das Ausmaß der Delaminationen und Lufteinschlüsse.

Zusammenfassung

Delaminationen und Lufteinschlüsse in Holmen von Rotorblättern von Windenergieanlagen können mithilfe des Klopftests robust lokalisiert werden. Ein Defektstärkemodell kann das Ausmaß der Defekte unterhalb eines Klopfpunktes objektiv bemessen. Mithilfe von Regressionsmodellen kann die Defektstärke auf Basis von Klopfgeräuschen robust vorhergesagt werden. Dadurch wird gezeigt, dass der Klopftest mehr als nur eine Methode zur reinen Lokalisation von Defekten in Faserverbundwerkstoffen ist. Der Klopftest eignet sich ebenfalls zur detaillierten Defektanalyse. Eine automatische, maschinenbasierte Nutzung des Klopftests ist nunmehr möglich.

Danksagung

Diese Arbeit wurde unterstützt durch die GreenTech Wind Initiative der EuroTech Universities und der International Graduate School of Science and Engineering (IGSSE) an der Technischen Universität München.

Literatur

- [1] Bundesverband WindEnergie, Anzahl der Windenergieanlagen in Deutschland. URL: <https://www.wind-energie.de/infocenter/statistiken/deutschland/windenergieanlagen-deutschland>
- [2] Bundesverband WindEnergie, „Grundsätze für die Wiederkehrende Prüfung von Windenergieanlagen“, URL: <http://www.wind-energie.de/sites/default/files/attachments/page/sachversta>

endigenbeirat/20121029-grundsätze-wiederkehrende-pruefung2.pdf

- [3] Tibshirani, R.: Regression Shrinkage and Selection via the Lasso. Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological), 58,1 (1996), 267-288.