Attribute zur Beschreibung akustischer Unterschiede von Fehlstellen an Rotorblättern von Windenergieanlagen

Gaetano Andreisek[1], Christian U. Große[2], Bernhard U. Seeber[1]

[1] *Technische Universität München, Fachgebiet Audio-Signalverarbeitung, Email: gaetano.andreisek@tum.de, seeber@tum.de*

[2] *Technische Universität München, Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Email: grosse@tum.de*

Einleitung

Die Zustandsprüfung von Windenergieanlagen (WEA) im Betrieb wird in Deutschland durch eine Kombination von Wartungen und Wiederkehrenden Prüfungen (WKP) an Maschine, Rotorblättern sowie der Tragstruktur der Anlage sichergestellt [1]. Die WKP werden in regelmäßigen Intervallen von Sachverständigen (im Folgenden: *Inspekteure*) durchgeführt. In diesem Zusammenhang umfasst die Prüfung der äußeren Rotorblattkörper primär eine Sichtprüfung auf Risse, Lufteinschlüsse und Delaminationen [2]. Darüber hinaus verschaffen sich die Inspekteure durch das gezielte Abklopfen des Blattkörpers einen Zustandseindruck von nicht sichtbaren, zumeist oberflächennahen Strukturen.

Die Klopfprüfung (engl. (coin-) tap test) ist eine weit verbreitete zerstörungsfreie Methode der Materialprüfung, die aufgrund ihrer Vielseitigkeit stark in Hinsicht auf Ausführung und Auswertemethodik variiert (Anwendungsbeispiele in [3],[4] und [5]). Allen Fällen ist jedoch gemein, dass das zu prüfenden Objekt durch Anregung lokal in Schwingung versetzt wird und der folglich emittierte Luftschall Träger von Informationen zur Materialzusammensetzung und Objektgeometrie ist. Die Auswertung des Luftschalls erfolgt durch einen Vergleich der vorhandenen Information zu definierten oder erwarteten Sollwerten, wobei Abweichungen des Ist-Zustands auf nicht erwünschte Materialfehler des Objektes hinweisen können, [6] und [7].

Im Fall der Anwendung an einem Rotorblatt einer WEA wird mithilfe eines geeigneten Werkzeugs, meist eines Hammers, auf nicht sichtbare Schädigungen geklopft. Der Inspekteur führt einen lokalen Vergleich der hörbaren, akustischen Unterschiede des Luftschalls zwischen nebeneinander liegenden Punkten durch und trifft eine Entscheidung auf Basis der Veränderung von noch nicht näher bestimmten akustischen Merkmalen. Ebenfalls können haptische Wahrnehmungen (bspw. händisches Abklopfen der Oberfläche) diesen Entscheidungsprozess beeinflussen.

Im Folgenden wird ein Ansatz vorgestellt, welcher die Bestimmung von bipolaren Adjektivpaaren (Gegensatzpaare) zur Beschreibung von lokalen, hörbaren Unterschieden zwischen intakten und fehlerbehafteten Stellen eines Rotorblattes einer WEA für eine spätere Analyse unter Hinzunahme des semantischen Differenzials [8] zum Ziel hat.

Methodik

Signalerzeugung und Zusammenstellung

Ein den gesamten Querschnitt umfassendes, etwa 10 cm breites Rotorblattstück wurde mit einem Impulshammer mit harter Kunststoffspitze in drei verschiedenen Bereichen der Außenhülle abgeklopft und die emittierten Schallsignale mit einem Mikrofon aus 30 cm Entfernung aufgezeichnet. Jede Klopfstelle beinhaltet mehrere Klopfpositionen, deren emittierte Klopfsignale jeweils in einem 500 ms Zeitfenster aufgezeichnet werden. Die Klopfausführung ist, nach Rücksprache mit einem Inspekteur, so gestaltet, dass der Hammer mehrere Male pro Schlag auf der Klopfposition auftrifft. Weiterhin wird bei der Klopfausführung beachtet, dass die Schlagkraft möglichst nicht variiert. Eine beispielhafte Fehlstelle ist Abb. 1 zu entnehmen.

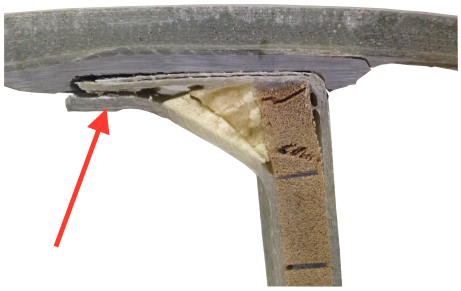

Abbildung 1: Beispielhafter Klopfbereich (Steganschluss) zur Erzeugung von Signalen für den Hörtest. Deutlich erkennbar ist die partielle Ablösung des Steges von der Außenhülle in Form eines Risses (siehe Pfeil). Dieser Ausschnitt ist Teil eines den gesamten Querschnitt umfassenden Rotorblattstückes.

Die beiden anderen Klopfstellen umfassen eine Ablösung des Laminats von der darunter liegenden Schaumstoffschicht im Hinterkantenbereich des Rotorblattsegmentes und eine Zusammenstellung der Klopfpositionen eines intakten Steganschlusses mit einer, an einer anderen Stelle vorkommenden, Stegablösung. Die Klopfpaare, welche in einem folgenden Hörtest zu bewerten sind, werden aus vier Klopfsignalen zusammengesetzt: zwei nebeneinander liegende Klopfpositionen („A" und „B"), jeweils zwei Mal abgeklopft („AABB"). Jedes Klopfpaar enthält eine Fehlstelle, welche entweder der Klopfposition „A" oder der Klopfposition „B" zugeordnet wird. Es liegen so acht Klopfpaare von jeweils 2-sec Dauer vor. Weiterhin werden alle Klopfpaare in der Reihenfolge invertiert („BBAA"),

um die Konsistenz der Bewertungen in einem späteren Analyseschritt verifizieren zu können. Für den nachfolgenden Hörtest liegen so insgesamt 16 zu bewertende Klopfpaare vor.

Vorauswahl der beschreibenden Adjektive

Eine Zusammenstellung von 37 schallbeschreibenden Adjektiven (Attributen), u.a. hell, resonant, klangvoll, erfolgt mithilfe eines Sound-Lexikons [9]. Weitere 43 Adjektive werden ausgewählt, die materialbezogene Eigenschaften des Rotorblattes beschreiben, u.a. steif, hohl, hart. Insgesamt umfasst die zu reduzierende Menge 80 Adjektive. Die Zusammenstellung der Adjektivliste erfolgt unabhängig von möglichen Gegensatzpaaren.

Testdurchführung

Die Teilnehmer werden gebeten den akustisch wahrnehmbaren Unterschied zwischen den Klopfstellen anhand einer 5-Punkte Skala (gar nicht, minimal, etwas, deutlich, sehr viel) jeweils für alle 16 Klopfpaare mit jedem der 80 vordefinierten Adjektive zu bewerten. Richtungsabhängige Bewertungen (nur von „AA“ nach „BB“ oder „BB“ nach „AA“) sind ausdrücklich zu vermeiden. Der Hörtest sollte demnach im Idealfall dieselbe Bewertung für gegensätzliche Adjektive und dieselbe Bewertung für konträre Klopfpaare („BBAA” anstatt „AABB”) liefern.

Drei männliche Personen im Alter zwischen 23 und 25 Jahren nahmen bisher an dem Hörtest teil. Kein Teilnehmer hatte vor Testbeginn Erfahrung im Umgang mit der Klopfprüfung. Die diotische Schalldarbietung erfolgte in einer Hörkabine über Sennheiser HD 600 Kopfhörer. Der präsentierte Signalschalldruckpegel wurde gegenüber der Originalaufnahme um 20 dB reduziert und so auf einen Spitzenschalldruckpegel von 77 dB SPL begrenzt. Die Wiedergabe eines jeden Klopfpaares konnte während der gesamten Testdurchführung so oft wie gewünscht wiederholt werden. Somit liegen nach diesem vorläufigen Hörtest bei drei Teilnehmern, 80 Adjektiven und 16 Klopfpaaren 3840 Bewertungen vor.

Auswertung der vorläufigen Ergebnisse

Konsistenz der Bewertungen

Die Bewertungen jedes Teilnehmers werden zunächst für jedes Klopfpaar über alle 80 Adjektive arithmetisch gemittelt und einer multifaktoriellen Varianzanalyse (engl. Analysis of Variance, ANOVA) zugeführt. Es werden drei Faktoren, die Reihenfolge der Klopfpaare („AABB” oder „BBAA”), die Klopfstelle, die Teilnehmer und eine Interaktion aus Reihenfolge und Klopfstelle definiert. Die Ergebnisse sind Tab. 1 zu entnehmen.

Der nicht-signifikante p-Wert des ersten Faktors „Reihenfolge” zeigt, dass die Teilnehmer den relativen Unterschied, unabhängig der Reihenfolge der Klopfpaare, zu bewerten, wie gefordert umgesetzt haben. Die Signifikanz des zweiten Faktors „Klopfstelle” lässt darauf schließen, dass zumindest einer Klopfstelle eine deutlich unterscheidbare Bewertungsgrundlage gegenüber den anderen zugrunde liegt. Eine nachgeführte Analyse ergibt, dass

Tabelle 1: Ergebnisse der multifaktoriellen Varianzanalyse der gemittelten Bewertungen über alle 80 Adjektive einer jeden Klopfstelle und Teilnehmers mit den Faktoren „Reihenfolge”, „Klopfstelle”, „Teilnehmer” und der Interaktion aus „Reihenfolge ∗ Klopfstelle”.

Faktoren und Interaktion	p-Wert
Reihenfolge	0.85
Klopfstelle	< 0.001
Teilnehmer	< 0.001
Reihenfolge ∗ Klopfstelle	0.52

sich alle Klopfstellen in Bezug auf die Bewertungen deutlich voneinander unterscheiden. Das Ergebnis der Interaktion „Reihenfolge ∗ Klopfstelle” zeigt, dass der Faktor „Klopfstelle” einen Effekt auf den Faktor „Reihenfolge” hat - die geforderte Bewertung des relativen Unterschiedes ist ebenfalls in den Daten nachweisbar, wenn diese nach den Klopfstellen aufgeteilt werden. Der signifikante p-Wert des dritten Faktors „Teilnehmer” lässt sich mit der Tatsache, dass jeder Teilnehmer die persönliche, subjektive Wahrnehmung wiedergegeben hat, erklären. Dieses Ergebnis macht die Subjektivität des Bewertungsprozesses deutlich.

Reduzierung auf relevante Adjektive und Bildung von Gegensatzpaaren

Basierend auf den vorherigen Ergebnissen, werden die Bewertungen von gegensätzlichen Klopfpaaren („AABB” und „BBAA”) für jedes der 80 Adjektive gemittelt. Weiterhin wird, aufgrund der sich deutlich unterscheidenden Bewertungen innerhalb einer jeden Klopfstelle, jeweils eine Hauptkomponentenanalyse (engl. Principal Component Analysis, PCA) auf die soeben gemittelten Bewertungen einer jeden Klopfstelle angewendet. Die ersten fünf Hauptkomponenten einer jeden PCA werden rotiert und lediglich Adjektive mit hohen Ladungen (Betragswerte) in die engere Auswahl genommen. Die erklärten Varianzen der ersten fünf Hauptkomponenten sind für die drei Klopfstellen 73 %, 70 % und 72 %.

Um Redundanzen und bereits mögliche bipolare Adjektivpaare in den Bewertungen zu finden, wird eine agglomerative Hierarchische Clusteranalyse (HCA) auf die Bewertungen der im letzten Schritt verbliebenen Adjektive angewendet. Als Verfahrensparameter werden die Euklidische Distanz (Distanzmaß) und als Fusionierungsmethode die „Weighted Pair-Group Methode mit arithmetischen Mittelwerten”(kurz: WPGMA) gewählt. Ähnlichkeitsstrukturen, die mithilfe der HCA entdeckt werden, liegen aufgrund der Natur des Hörtests als bereits geformte, bipolare Adjektivpaare, als auch redundante Adjektive vor. So werden beispielweise die Adjektive „kräftig” und „robust” oder die Adjektive „durchdringlich” und „undurchdringlich” zu ersten Clustern zusammengefasst. Tab. 2 listet die finale Auswahl. Verbliebene Redundanzen sind aufgrund der verschiedenen Ausprägungen der Fehlstellen in der Liste verblieben und bewusst toleriert.

Tabelle 2: Abschließende Auswahl von bipolaren Adjektivpaaren.

tief	hoch	intakt	defekt
dumpf	hell	voll	hohl
verschw.	definiert	ruhig	vibrierend
hallig	trocken	dicht	porös
resonant	gedämpft	steif	biegsam
klangvoll	klanglos	lang	impulsiv

Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der multifaktoriellen Varianzanalyse lassen darauf schließen, dass die Teilnehmer die Testidee der Bewertung von relativen Unterschieden umsetzen konnten. Ebenfalls führen die Ergebnisse der Varianzanalyse zu dem Entschluss, dass gesonderte Hauptkomponentenanalysen für die Bewertungen einer jeden Klopfstelle sinnvoll sind, bevor eine abschließende Liste von bipolaren Adjektivpaaren zur Beschreibung der hörbaren Unterschiede für alle Klopfstellen zusammengestellt wird. Um Redundanzen und mögliche bipolare Adjektivpaare zu erkennen, wird eine agglomerative Hierarchische Clusteranalyse auf die im vorherigen Analyseschritt bereits herausgestellten Adjektive angewendet. Die gewählten Adjektivpaare lassen sich global in schall- und materialbeschreibend unterteilen. Verbliebene Redundanzen sind der unterschiedlichen Klopfstellen und damit verschiedenen Fehlstellen geschuldet.

Mit den geformten, bipolaren Adjektivpaaren ist es nun möglich einen Hörtest auf Basis des Semantischen Differenzials durchzuführen. Die Ergebnisse können genutzt werden, um physikalische, wie psychoskuastische Merkmale zu definieren und eine Klassifizierung der Klopfsignale vorzunehmen.

Danksagung

Diese Arbeit wird 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, Grundsätze für die „Wiederkehrende Prüfung von Windenergieanlagen“, URL: `http://www.wind-energie.de/sites/default/files/attachments/page/sachverstaendigenbeirat/20121029-grundsaetze-wiederkehrende-pruefung2.pdf`

[2] Bundesverband WindEnergie, Grundsätze für die Prüfung zur zustandsorientierten Instandhaltung von Windenergieanlagen, URL: `http://www.wind-energie.de/sites/default/files/attachments/page/sachverstaendigenbeirat/grundsaetze-zustandsorientierte-instandhaltung.pdf`

[3] Jüngert, A.: Untersuchung von GFK-Bauteilen mit akustischen Verfahren am Beispiel der Rotorblätter von Windenergieanlagen. Dissertation, Universität Stuttgart, 2010

[4] Haque, A. and Raju, P. K.: Sensitivity of the Acoustic Impact Technique in Characterizing Defects/Damage in Laminated Composites. Journal of Reinforced Plastics and Composites 14 (1995), 280-296

[5] Mackie, R. I. and Adams R. D.: Applying the Coin-Tap Test to Adhesives in Civil Engineering: A Numerical Study. International Journal of Adhesion and Adhesives 10 (1990), 215-220

[6] Jüngert, A, Große, C. U., Krüger, M.: Local Acoustic Resonance Spectroscopy (LARS) for Glass Fiber-Reinforced Polymer Applications. Journal of Nondestructive Evaluation 32 (2013), 23-33

[7] Cawley, M., Adams, R. D.: The Mechanics of the Coin-Tap Method of Non-destructive Testing. Journal of Sound and Vibration 122 (1988), 299-316

[8] Osgood, C. E., Tannenbaum, P. H., Suci, G. J.: The Measurement of Meaning. Urbana: University of Illinois Press, Champaign, 1957

[9] Pedersen, T. H.: The Semantic Space of Sounds. Lexicon of Sound-Describing Words - Version 1. DELTA Sense-Lab, Hørsholm, 2008