

# Akustische Merkmale zur Detektion von Fehlstellen in Rotorblättern von Windenergieanlagen

Gaetano Andreisek<sup>1</sup>, Christian U. Große<sup>2</sup>, Bernhard U. Seeber<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Prof. f. Audio-Signalverarbeitung, 80333 München, E-Mail: gaetano.andreisek@tum.de, seeber@tum.de

<sup>2</sup> Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, 81245 München, E-Mail: grosse@tum.de

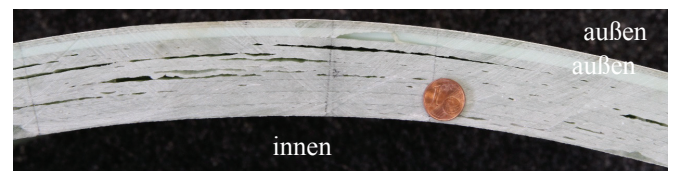
## Einleitung

Windenergieanlagen (WEA) in Deutschland müssen regelmäßig technisch geprüft werden. Dabei sind auch die Rotorblätter auf strukturelle Fehler zu untersuchen, welche u.a. in Form von Delaminationen, Rissen oder Verklebungsfehlern vorliegen und mithilfe der sog. Klopfprüfung (engl. Coin-Tap Test) lokalisiert werden können [1, 2, 3]. Dabei wird das Prüfobjekt lokal mithilfe eines geeigneten Gegenstandes, meist eines kleinen Hammers, angeregt und die akustische Antwort analysiert. Erfahrene Prüfer können dann aufgrund des emittierten Schalles über den lokalen Zustand des Materials entscheiden [4]. Die Klopfantwort wird von einigen Randbedingungen beeinflusst, die den Entscheidungsprozess beeinflussen können oder die die Prüfer in den Entscheidungsprozess einbeziehen müssen. Diese umfassen im Wesentlichen (i) die geometrischen Randbedingungen des Rotorblattes (Material und Querschnitt), (ii) die variierende Schlagkraft (Magnitude der Impulsantwort) und (iii) Störgeräusche aus der Umgebung. Akustische Merkmale zur Detektion von Fehlstellen sollten insbesondere robust gegenüber den sich stets ändernden geometrischen Randbedingungen sein. Die Prüfer müssen Fehlstellen an vielen Stellen verschiedener Rotorblätter detektieren können. Ziel dieser Arbeit ist es, akustische Merkmale zu definieren, die robust gegenüber sich ändernden geometrischen Randbedingungen sind. Dazu werden zwei geometrische Randbedingungen einer Messfläche definiert, die Klopfprüfung für beide Konditionen durchgeführt und die akustischen Merkmale verglichen. Fehlstellen indizierende Merkmale sollten sich in beiden Konditionen gegenüber Merkmalen von intakten Klopfpunkten in der Magnitude unterscheiden.

## Datengrundlage

Eine Messfläche mit 64 äquidistanten Messpunkten (rechteckige Anordnung, acht Reihen mit jeweils acht Messpunkten) wurde auf einem Rotorblatt mit einer Länge von 34m einer 1,5MW WEA definiert. Die Messfläche befindet sich etwa 9m von der Blattwurzel entfernt. Der vertikale, sowie horizontale Abstand zwischen den Messpunkten beträgt 4cm. Der etwa 4cm starke Querschnitt ist aus Glasfaserverbundwerkstoff gefertigt, siehe Abbildung 1. Es liegen zwei Konditionen mit unterschiedlichen, geometrischen Randbedingungen vor, (i) Messfläche als Teil des Gesamtblattes und (ii) ausgeschnittene Messfläche mit Schnittkanten etwa 12cm von äußeren Messpunkten entfernt. Pro Messpunkt und Kondition wurden zehn Messungen nach Klopfprüfung durchgeführt. Dabei wurde ein Impulshammer mit harter Plastikspitze verwendet (Tiefpasscharakteristik

mit -3dB Dämpfung an 1,2kHz). Ein omnidirektionales Messmikrofon befand sich für jede Kondition im Abstand von 0,5m senkrecht zur Messoberfläche. Die Klopfprüfung an der Platte (Kondition 2) wurde in einem reflexionsarmen Raum durchgeführt. Die Platte wurde durch vier von der Raumdecke hängenden Bändern frei schwebend über dem Boden gehalten. Die Schallaufnahmen wurden mittels der Feature Extraction Toolbox for Transients analysiert und insgesamt 330 zeitliche, spektrale, sowie zeitlich-spektrale Merkmale extrahiert [5]. Die Merkmale liegen pro Klopfpunkt und Messung als Einzahlwerte vor. Für die nachfolgende Auswertung wurde der Median über die zehn Messungen pro Klopfpunkt und Kondition verwendet. Somit liegen pro Merkmal und Kondition 64 Einzahlwerte vor.

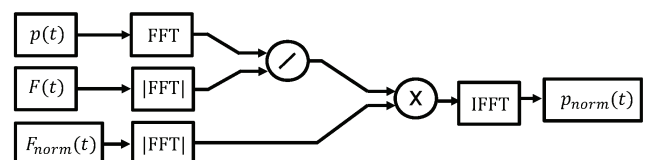


**Abbildung 1:** Querschnitt der untersuchten Messfläche mit einer 1-Eurocent Münze zum Vergleich. Zu sehen sind Delaminationen in verschiedenen Bauteiltiefen.

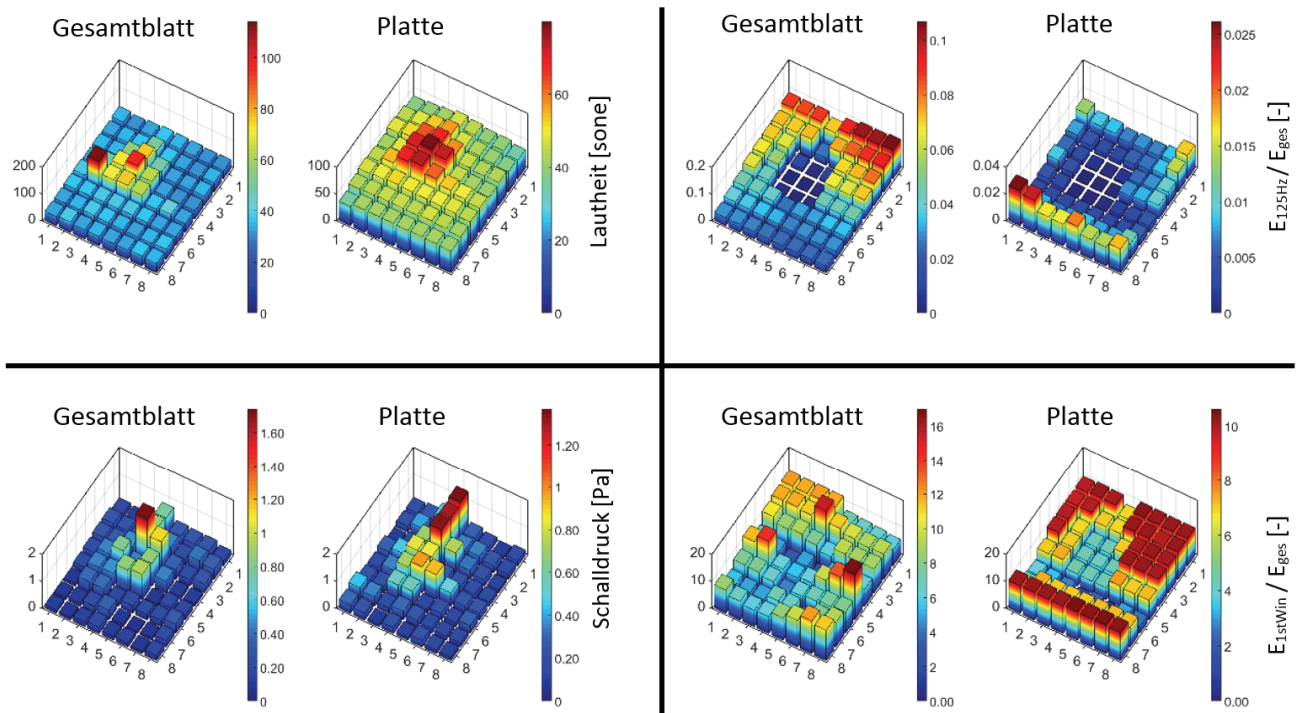
Die Fehlstelle wurde mittels Ultraschall Impuls-Echo Verfahren lokalisiert. Die hier vorliegende Delamination (fehlende Verbindung zwischen Materialschichten) befindet sich in etwa 1 – 1,4cm unterhalb der Oberfläche und ist für die Klopfpunkte mit Indizes 3 bis 5 vertikal und 3 bis 5 horizontal zu lokalisieren.

## Angleichung der Schallaufnahmen mittels Normhammersignal

Da die Klopfprüfung mit einem Impulshammer per Hand durchgeführt wurde, liegen für jede Messung unterschiedliche Maximalschlagkräfte vor, welche die Merkmale auf Basis der Amplitude des Schalldrucks beeinflussen.



**Abbildung 2:** Abfolge der Normalisierung der Schallaufnahmen  $p(t)$  mittels Impulshammersignalen  $F(t)$  und normierten Kraftsignal  $F_{norm}(t)$ . Durch den Prozess wird lediglich das Amplitudenspektrum der Schallaufnahme verändert.



**Abbildung 3:** Magnitude der akustischen Merkmale nach Klopfpunkte (Indizes: 1-8 vertikal und 1-8 horizontal) für Aufnahmen vom Gesamtblatt im Vergleich zu den Aufnahmen nach dem Ausschneiden: max. Lautheit (oben links), Energieverhältnis aus Energie im Oktavband 125Hz zur Gesamtenergie (oben rechts), max. Schalldruck in der Frequenzgruppe mit Mittenfrequenz 4000Hz (unten links) und Schallenergie des ersten Fensters (4,2msec) nach Ersteintritt der Frequenzgruppe mit Mittenfrequenz 450Hz im Verhältnis zur Gesamtenergie der ersten Fenster (unten rechts). Fehlstelle ist unterhalb der Klopfpunkte mit Indizes 3 bis 5 vertikal und 3 bis 5 horizontal.

Um eine uniforme Anregung für jeden Klopfpunkt zu gewährleisten, wurde ein Normimpuls  $F_{\text{norm}}(t)$  pro Klopfpunkt generiert, der wie folgt und in Abbildung 2 dargestellt mit allen Schallaufnahmen  $p(t)$  verrechnet wurde. Das Amplitudenspektrum einer Schallaufnahme  $p(t)$  wird durch das Amplitudenspektrum des entsprechenden Hammersignals  $F(t)$  dividiert und mit dem Amplitudenspektrum des Normimpulses multipliziert. Anschließend findet eine Transformation in den Zeitbereich statt. Das Phasenspektrum der Schallaufnahme bleibt während des gesamten Prozesses unberührt.

## Ergebnisse

Die 330 Merkmale der Schallaufnahmen wurden zwischen beiden Konditionen auf Werteunterschiede zwischen Fehlstellen und intakten Stellen verglichen. Ein Merkmal wurde als robust definiert, sofern sich die Fehlstelle in beiden Konditionen durch eine veränderte Magnitude gegenüber der den Merkmalen von intakten Klopfpunkten unterscheidet. Auf Basis dieser Sichtprüfung sind etwa 30% der Merkmale für die Kondition „Gesamtblatt“ nutzbar und etwa 11% für beide Konditionen.

Abbildung 3 vergleicht ausgewählte Merkmale zwischen den Konditionen „Gesamtblatt“ und „Platte“. Im vorliegenden Fall mit Delamination in 1 – 1,2cm Tiefe zeichnet sich folgendes Bild ab: (i) weniger Schallenergie im Oktavband mit Mittenfrequenz an 125Hz, (ii) höhere maximale Schalldrücke für die Frequenzgruppe mit Mittenfrequenz an 4000Hz und (iii) aufgrund der breiteren Frequenzgruppen zu höheren Frequenzen erhöhte Lautheit gegenüber intakten

Fehlstellen. Zum Vergleich ist ein Merkmal in Abbildung 3 unten rechts abgebildet, welches zwar eine Detektion der Fehlstelle in der Platte ermöglicht, jedoch keine einwandfreie Detektion für den Fall „Gesamtblatt“ zulässt. Hierbei handelt es sich um das Verhältnis der Schallenergie des ersten Fensters (4,2msec) nach Ersteintritt in der Frequenzgruppe mit Mittenfrequenz 450Hz im Verhältnis zur Gesamtenergie der ersten Fenster für Frequenzgruppen bis 12,5kHz. Es stellt sich heraus, dass intakte Klopfpunkte ähnliche Werte im Vergleich zu der Fehlstelle haben.

## Zusammenfassung und Ausblick

Um die Vergleichbarkeit der Merkmale zwischen den Klopfpunkten und den beiden Konditionen aufgrund unterschiedlicher Schlagkräfte sicherzustellen, wurde ein Normhammersignal pro Klopfpunkt entworfen und folglich die Amplituden der Schallaufnahmen pro Klopfpunkt angepasst. Der anschließende Merkmalsvergleich macht deutlich, dass es Merkmale für beide geometrische Randbedingungen gibt, die im Bereich der Fehlstelle unterschiedliche Magnituden im Vergleich zu den intakten Klopfpunkten aufweisen. Es stellt sich heraus, dass nur etwa ein Drittel der zuvor als nutzbar deklarierten Merkmale für beide Konditionen verwendbar sind. Merkmale von Fehlstellen beider Konditionen zeichnen sich durch wenig Schallenergie für niedrige Frequenzbereiche ( $f < 400\text{Hz}$ ) und viel Energie für hohe Frequenzbereiche ( $f > 2000\text{Hz}$ ) aus. Dieses Ergebnis spiegelt sich somit in der maximalen Lautheit der Schallaufnahmen wieder, bei der die

Schallaufnahmen der Fehlstellen deutlich lauter als die intakte Umgebung sind.

Weitere Platten mit Fehlstellen in anderen Bauteiltiefen können nun nach den ersten erfolgreichen Test untersucht werden, um ein holistisches Bild über robuste Merkmale für die Fehlstellendetektion zu erhalten. Die Erkenntnisse können für eine Klassifikation zur automatisierten Detektion von Fehlstellen auf Basis des Klopfestes dienen.

### Danksagung

Die Arbeit wird unterstützt durch die GreenTech Wind Initiative der EuroTech Universities und der der International Graduate School of Science and Engineering (IGSSE) an der Technischen Universität München. Die akustischen Messungen wurden mit dem PAK-System der Fa. Müller BBM VibroAkustik Systeme GmbH durchgeführt (finanziert durch DFG INST 95/1301-1 FUGG). Die Autoren bedanken sich bei Malcom McGugan und Gregor Giebel von der Danmarks Tekniske Universitet (DTU) für das zur Verfügung Stellen der Proben.

### Literatur

- [1] Bundesverband WindEnergie, Grundsätze für die “Wiederkehrende Prüfung von Windenergieanlagen”, URL: <http://www.wind-energie.de/sites/default/files/attachments/page/sachverstaendigenbeirat/20121029-grundsaeetze-wiederkehrende-pruefung2.pdf>
- [2] Cawley, M. und Adams, R. D.: The Mechanics of the Coin-Tap Method of Non-destructive Testing. Journal of Sound and Vibration 122 (1988), 299-316
- [3] 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
- [4] Andreisek, G., Große, C. U., Seeber, B. U.: Attribute zur Beschreibung akustischer Unterschiede von Fehlstellen in Rotorblättern von Windkraftanlagen. Fortschritte der Akustik – DAGA '15 Dt. Ges. f. Akustik e.V. (DEGA), 2015, 513-515
- [5] Andreisek, G., und Seeber, B. U.: Feature Extraction Toolbox for Transients. Fortschritte der Akustik – DAGA '17 Dt. Ges. f. Akustik e.V. (DEGA), 2017