

# Analyse, Synthese und perzeptiv-motivierte Kodierung von Schallsignalen für die zerstörungsfreie Prüfung

Gaetano Andreisek<sup>1</sup>, Sebastian Schädler<sup>1</sup>, Bernhard U. Seeber<sup>1</sup>

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

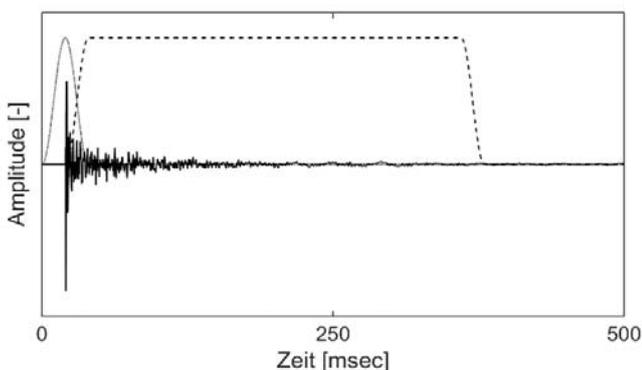
## Einleitung

Die zerstörungsfreie (Material-)Prüfung umfasst Prüfmethoden, bei denen transiente Schallsignale die Grundlagen zur Beurteilung des Materialzustandes eines zu untersuchenden Objektes bilden. Beispielhaft sei hierfür die Klopfprüfung von Rotorblättern von Windenergieanlagen zu nennen, bei der ausgewählte Bereiche der Rotorblattoberfläche mit einem Hammer von einem erfahrenen Prüfer abgeklopft werden. Die so erzeugten, transienten Schallsignale zeichnen sich durch einen etwa exponentiellen Abfall der Schallenergie aus und enthalten hörbare Informationen, die der Prüfer nutzt, um eine Entscheidung über den Zustand des Materials im Klopfbereich zu treffen [1].

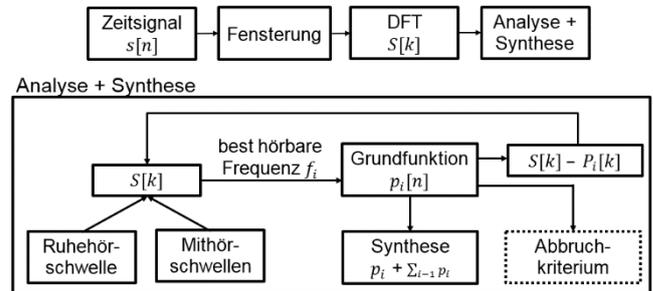
Im Folgenden wird ein vorläufiges Analyse- und Synthese-Modell vorgestellt, welches das transiente Schallsignal zunächst auf die hörbaren Anteile untersucht und in einem zweiten Schritt mithilfe von exponentiell abfallenden, harmonischen Schwingungen (Grundfunktionen) synthetisiert. Eine hohe Datenreduktion lässt sich durch Auslassen von nicht hörbaren Schallanteilen im Syntheseprozess erzielen. Das Analyse- und Synthese-Modell wird auf Schallsignalen eines Klopftests an einem Rotorblatt angewendet und das Ergebnis mithilfe des Lautheitsverlaufes der Syntheseprodukte analysiert.

## Analyse- und Synthese-Modell

Zunächst wird das Signal mit zwei Fenstern, wie in Abbildung 1 dargestellt, gefenstert und jedes Fenster separat in den Frequenzbereich transformiert, bevor die Daten dem Analyse- und Synthese-Prozess zugeführt werden. Die Länge des zweiten Fensters ist variabel und endet an dem Zeitpunkt, bei dem das Nutzsignal vom Rauschen verdeckt wird. Der Ablauf des Modells ist in Abbildung 2 dargestellt.



**Abbildung 1:** Gewählte Fensterfunktionen vor der Analyse und Synthese des Signals. Erstes Fenster, Von-Hann-Fenster mit einer Länge von 40 ms; zweites Fenster, Tukey-Fenster mit einer variablen Länge und einem Anstieg, sowie Abfall von je 20 ms.



**Abbildung 2:** Ablauf des Analyse- und Synthese-Modell.

## Analyse

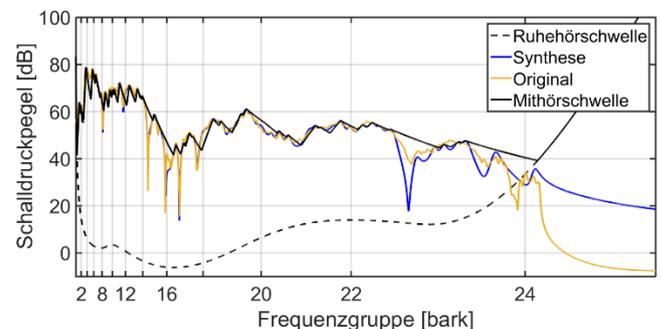
Im ersten Schritt werden die Ruhehörschwelle, sowie die Mithörschwellen des vorhandenen Spektrums nach [2] berechnet. Es wird im Folgenden diejenige Frequenz  $f_i$ , die die größte Pegel-Differenz zur Ruhehörschwelle aufweist („best-hörbare Frequenz“), ermittelt. Amplitude  $a_i$  und Phase  $\varphi_i$  können dann aus dem Magnituden-, sowie Phasenspektrum abgelesen werden. Die Dämpfung  $\tau_i$  wird über die Steigung des Phasenverlaufes an  $\varphi_i$  ermittelt.

## Synthese

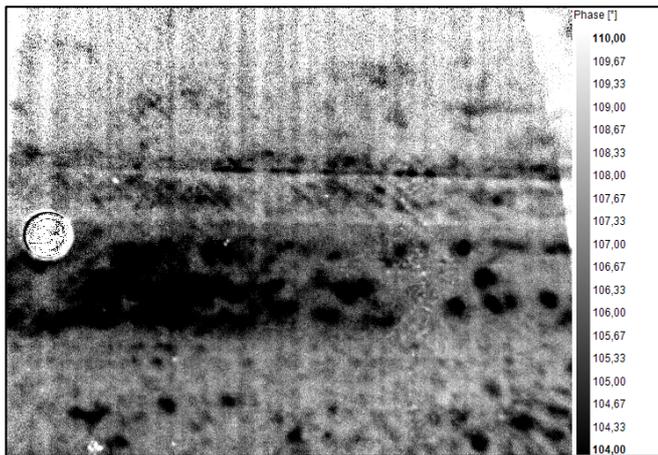
Die gewonnenen Parameter, Amplitude  $a_i$ , Frequenz  $f_i$ , Phase  $\varphi_i$  und Dämpfung  $\tau_i$  aus der Analyse werden zur Erstellung der Grundfunktion  $p_i[n]$  benötigt. Diese berechnet sich wie folgt,

$$p_i[n] = a_i \cdot \cos(2\pi \cdot f_i \cdot t[n] + \varphi_i) \cdot e^{-t[n]/\tau_i} \text{ [Pa]} \quad (1)$$

Die synthetisierte Grundfunktion wird vom originalen Schallsignal subtrahiert und das Residuum einem erneuten Analyseprozess unterzogen. Die Synthese setzt sich aus der Summe der einzelnen, synthetisierten Grundfunktionen zusammen. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis die neu gefundenen Grundfunktionen keine hörbare Änderung des Syntheseproduktes mehr hervorrufen.



**Abbildung 3:** Ergebnis der Synthese (blau) beispielhaft für das erste Fenster im Vergleich mit der originalen Schallaufnahme (gelb). Weiterhin sind die Ruhehörschwelle (schwarz gestrichelt), sowie die Mithörschwellen der Synthese eingezeichnet (schwarz durchgezogen).



**Abbildung 4:** Phasenbild einer Lock-In Thermografie des abgeklopften Bereiches auf der Rotorblattoberfläche für eine Lock-In Frequenz von 0,05 Hz. Die Fehlstelle zeichnet sich durch eine veränderte Phase der Materialantwort auf thermischer Anregung aus (dunkler Bereich in Bildmitte). Weiterhin ist eine Münze mit einem Durchmesser von 2 cm mittig links zu sehen.

## Anwendung

Zur Verifizierung des Analyse- und Synthese-Modells stehen 320 transiente Schallsignale zur Verfügung, welche mittels eines Klopfests an einem Rotorblatt gewonnen wurden. Die erfasste Fläche umfasst einen Bereich von etwa 30 x 30 cm, bei der eine Fehlstelle in Form einer Delamination vorliegt. Das Phasenbild einer Lock-In Thermografie des beschriebenen Bereiches ist für die gesamte Breite und etwa 20 cm Höhe der Abbildung 4 zu entnehmen [3].

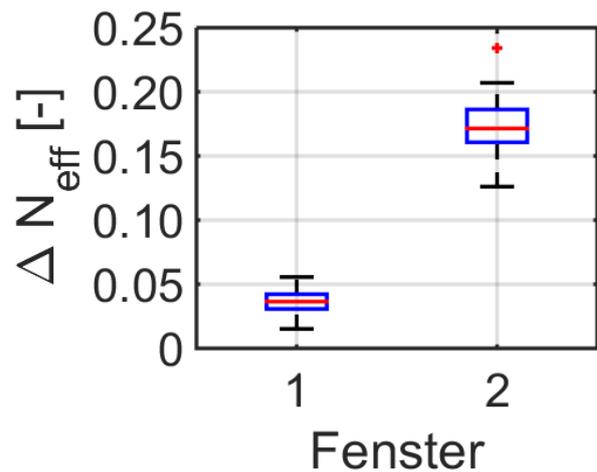
## Ergebnisse

Die Ergebnisse des Analyse- und Synthese-Modells werden mithilfe des Lautheitsmodells nach Zwicker verifiziert [4]. Zunächst werden für beide Fenster des originalen und synthetisierten Schallsignals der Effektivwert der Lautheit bestimmt und danach die Differenz ins Verhältnis zum Lautheits-Effektivwert des originalen Schallsignals gesetzt, nachfolgend mit  $\Delta N_{eff}$  bezeichnet. Die so ermittelten Ergebnisse für alle 320 Schallsignale können Abbildung 5 entnommen werden. Der Median für das erste Fenster liegt bei 0,037, die Quartil-Werte an 0,031 und 0,042. Für das zweite Fenster beträgt der Median 0,171, die Quartil-Werte liegen bei 0,161 und 0,186.

Die Datenreduktion wird aus dem Verhältnis der vorhandenen Datenpunkte des gefensterten Originalsignals und der Anzahl an Parametern des synthetisierten Schallsignals ermittelt. Mithilfe des Analyse- und Synthese-Modells kann somit der vorliegende Datensatz auf 7,7% der ursprünglichen Größe reduziert werden. Der Wertebereich der Datenreduktion für einzelne Schallsignale liegt zwischen 3 und 18%.

## Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass das Syntheseprodukt des Analyse- und Synthese-Modells sehr gute Übereinstimmungen bezüglich des frühen Lautheitsverlaufes (bis



**Abbildung 5:** Ergebnisse des Lautheitsvergleiches zwischen originalem Schallsignal und dem Syntheseprodukt pro Fensterfunktion für alle 320 Schallsignale. Mediane sind in rot, Quartil-Werte in blau gefasst. Antennen markieren den 1,5-fachen Interquartil-Abstand.

20 ms nach Ersteinsatz) mit dem originalen Schallsignal aufweisen. Im späteren Verlauf zeigen sich größere Abweichungen, wobei die Lautheit der Synthese minimal geringer als die Lautheit des originalen Schallsignals ausfällt. In einem weiteren Entwicklungsschritt sollte diese Differenz behoben werden. Darüber hinaus kann ein Hörtest mit Prüfern von Rotorblättern zur Transparenz der Synthese durchgeführt werden. Weiterhin kann geklärt werden, ob bei Verwendung von synthetisierten Schallen des Analyse- und Synthese-Modells unterschiedliche Fehlstellendetektionen festgestellt werden können.

## Danksagung

Diese Arbeit wurde durch die GreenTech Initiative der Eurotech Universities, die International Graduate School of Science and Engineering (IGSSE) an der Technischen Universität München (GA) und BMBF 01 GQ 1004B (BS) unterstützt.

## Literatur

- [1] Andreisek, G., Große, C.U., Seeber, B.U.: Attribute zur Beschreibung akustischer Unterschiede von Fehlstellen an Rotorblättern von Windenergieanlagen. Fortschritte der Akustik (2015), 513 – 515
- [2] Terhardt, E. Akustische Kommunikation: Grundlagen mit Hörbeispielen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998, S. 322
- [3] Busse, G., Wu, D. und Karpen, W.: Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography. J. Appl. Phys. 71 (1992), 3962 – 3965
- [4] DIN 45631/A1:2010-03, Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum – Verfahren nach E. Zwicker – Änderung 1: Berechnung der Lautheit zeitvarianter Geräusche. Beuth-Verlag, Berlin, 2010