

Akustische Materialprüfung - ein progressives Prüfverfahren

Jörg RITTER¹

¹ RTE Akustik + Prüftechnik GmbH, Pfinztal

Kontakt E-Mail: j.ritter@rte.de

Kurzfassung. Die akustische Materialprüfung ist bekannt für die Qualitätsprüfung von Keramik-, Metall- und Verbundteilen in der Serienproduktion mit kurzen Zykluszeiten und einer robusten Leistung. Es handelt sich sowohl um eine referenzierende als auch um eine vergleichende Prüfmethode. Vorklassifizierte Referenzteile sind erforderlich, um den Auswertalgorithmus einzulernen. In der Realität ist es oft schwierig, eindeutig vorklassifizierte Teile (vor allem defekte Teile) bereitzustellen. Bei subjektiver Vorklassifizierung kommt es oft zu Abweichungen zwischen der subjektiven Bewertung und den objektiven Messergebnissen. Defekte müssen dann durch andere, aufwändigere und kostspieligere Prüfverfahren wie Ultraschall, Computertomographie oder auch zerstörende Prüfverfahren eindeutig festgestellt werden. Der Einlernprozess eines akustischen Materialprüfsystems (ART) für geeignete Prüfkriterien muss iterativ durch eine Erstbewertung und nachfolgende Optimierung erfolgen, um die Prüfeigenschaften und die Trennschärfe zu verbessern. Mit neuen Analysetechniken kann der Lehrprozess, insbesondere ohne die Verfügbarkeit von Ausfallteilen, verkürzt und vereinfacht werden.

1. Einführung

Die akustische Materialprüfung [1] ist sowohl ein referenzierendes als auch ein vergleichendes Prüfverfahren. Vorklassifizierte Referenzteile sind erforderlich, um den Auswertalgorithmus zu lehren. Es ist oft schwierig, eindeutig vorklassifizierte Teile (vor allem defekte Teile) bereitzustellen. Bei subjektiver Vorklassifizierung kommt es oft zu Abweichungen zwischen der subjektiven Bewertung und den objektiven Messergebnissen. Defekte müssen dann durch andere, aufwändigere und kostspieligere Prüfverfahren wie Ultraschall, Computertomographie oder auch zerstörende Prüfverfahren eindeutig festgestellt werden. Der Einlernprozess eines akustischen Materialprüfsystems (ART) für geeignete Prüfkriterien muss iterativ durch eine Erstbewertung und nachfolgende, serienbegleitende Anpassungen erfolgen, um die Prüfeigenschaften des Prüfsystems zu optimieren. Gängige akustische Prüfsysteme verwenden herkömmliche Kenngrößen wie Frequenzlage, Dämpfungsfaktor, Amplitudenüberwachung oder Amplitudendämpfung. Dies reicht jedoch unter Berücksichtigung von Chargen- oder Fertigungstoleranzen für eine zuverlässige Prüfung oft nicht aus. Moderne ART-Systeme bieten eine Auswahl intelligenter Algorithmen in Kombination mit auf Mustererkennung basierenden Merkmalen wie Frequenzaufteilung, Frequenzabstandsbeziehungen, Erkennung mehrerer Frequenzspitzen,

Kompensation und mehr. Ein weiterer Ansatz ist die Auswertung eines kompletten Frequenzbereichs statt nur einzelner Frequenzen, dies wird zur Grundlage fortschrittlicher Methoden der akustischen Materialprüfung.

2. Praktischer Ansatz

Die akustische Materialprüfung [1] nutzt den physikalischen Effekt, dass ein Bauteil, welches extern angeregt wird, in reproduzierbarer Weise mit seinen typischen Eigenfrequenzen schwingt. Abweichungen der Eigenfrequenzen, unter sonst gleichen Bedingungen, lassen daher Rückschlüsse auf die Veränderung der Materialstruktur und ihrer Festigkeit zu.

In der Praxis wird in einem akustischen Prüfsystem ein iterativer Lernprozess verwendet. Im ersten Schritt werden die subjektiv beurteilten Prüfteile mit dem Prüfsystem vermessen. Die erhaltenen objektiven Messergebnisse werden den subjektiven Einschätzungen der Mitarbeiter gegenübergestellt. Dies führt erfahrungsgemäß zu abweichenden Ergebnissen. Ein Teil der subjektiv als „gut“ (OK) bewerteten Prüfteile wurde vom Prüfsystem als auffällig (fehlerhaft, NIO) bewertet und ein Teil der subjektiv als „fehlerhaft“ bewerteten Prüfteile wurde vom System als „gut“ bewertet.

Im gewählten Praxisbeispiel sollen die Bauteile mit fehlerhafter Materialstruktur detektiert werden. Da die Fehler in diesem Beispiel nur durch Zerstörung eindeutig nachweisbar sind, mussten für den Versuch vorab subjektiv klassifizierte Prüfteile verwendet werden. Eine größere Menge an nicht klassifizierten Prüfteilen wurde subjektiv und objektiv beurteilt. Die objektive Bewertung wurde anhand von Standard Frequenzprüfkriterien durchgeführt und mit den Ergebnissen der subjektiven Prüfung verglichen. Die Messergebnisse des Prüfsystems waren reproduzierbar und konnten somit als Tatsache akzeptiert werden. Die folgende Abbildung (Abbildung 1) verdeutlicht die Abweichungen zwischen objektiver und subjektiver Beurteilung anhand eines typischen Prüfkriterienbereichs.

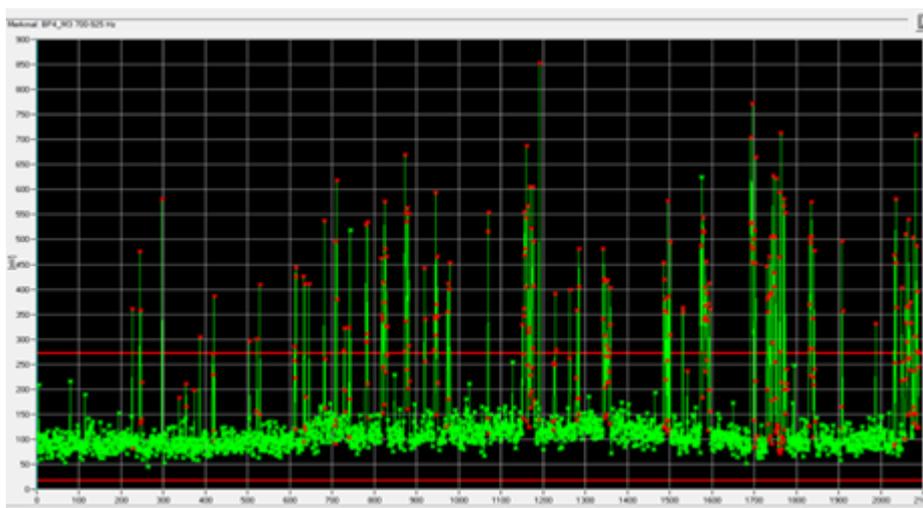


Abb.1. Darstellung der Messergebnisse inklusive der subjektiven Bewertung.

Die subjektive Bewertung der fehlerhaften Teile (NIO) ist in Abbildung 1 durch rote Punkte dargestellt. Die beiden roten Linien stellen den Bereich der Prüfkriterien dar, in dem die Messergebnisse der „guten“ und fehlerfreien (IO) Teile liegen müssen. Deutlich zu erkennen ist die Vermischung von roten und grünen Messpunkten im Gutbereich. Die widersprüchliche Bewertung zwischen subjektiver und objektiver Beurteilung muss nun in einem zweiten Schritt, idealerweise mit einem zusätzlichen, objektiven Prüfverfahren (Ultraschall, CT), überprüft werden.

Abbildung 2 zeigt eine Stichprobe von 2091 Prüfteilen mit 91,1 % ähnlicher Bewertung durch Ergebnisse aus subjektiver und objektiver Bewertung. Während 8,9 % der Prüfteile eine widersprüchliche Bewertung aufweisen und eine Nachuntersuchung erfordern.

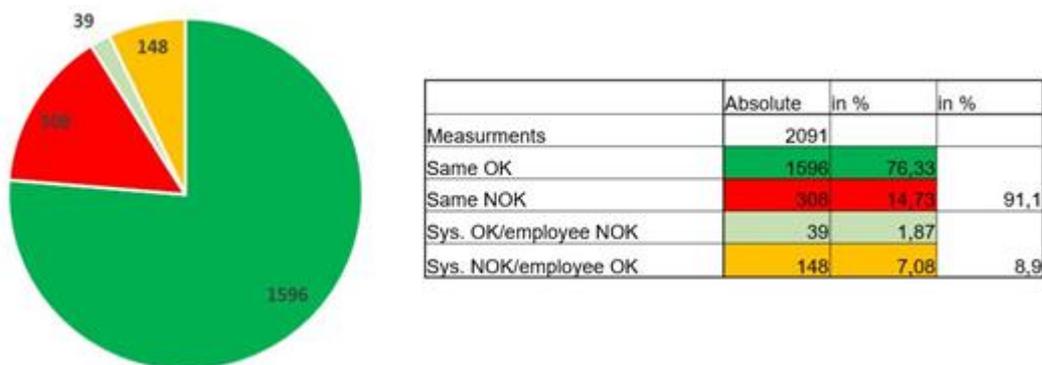


Abb. 2. Statistische Darstellung der subjektiven und objektiven Bewertungen

Der Unterschied zwischen subjektiver und objektiver Einstufung im gewählten Beispiel wurde noch dadurch verstärkt, dass die Prüfteile mit unterschiedlichen Fertigungsverfahren hergestellt wurden. Durch die unterschiedlichen Herstellungsverfahren weisen die Bauteile unterschiedliche Eigenfrequenzverhalten auf, was die Komplexität der Prüfaufgabe deutlich erhöht.

Abbildung 3 zeigt die abweichenden Messergebnisse, die durch identische Bauteiltypen verursacht werden, die durch unterschiedliche Herstellungsverfahren hergestellt werden. Bei Prozess 1 ist ein Doppelpeak im Spektrum zu sehen (Frequenzbereich 4.200 bis 6.000 Hz), während Prozess 2 nur einen Frequenzpeak im gleichen Frequenzbereich ergibt.

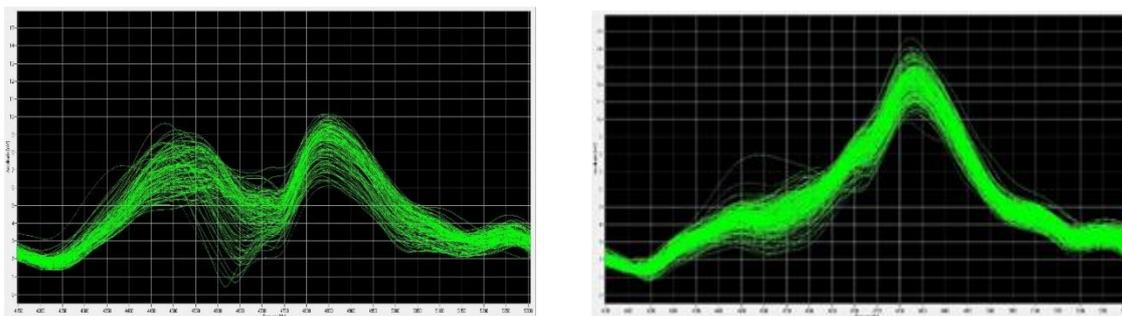


Abb. 3. Messergebnisse von Fertigungsprozess 1 (links) und Prozess 2 (rechts), alle Gutteile im Bereich 4.200 bis 6.000 Hz

Überlagert man nun die Messergebnisse der subjektiv als gut bewerteten Prüfteile aus beiden Verfahren und addiert die Spektren der subjektiv als fehlerhaft bewerteten Prüfteile, so ergibt sich das Problem, Prüfkriterien für die vorliegende Prüfaufgabe so zu gestalten, dass diese zuverlässig und reproduzierbar gelöst werden kann.

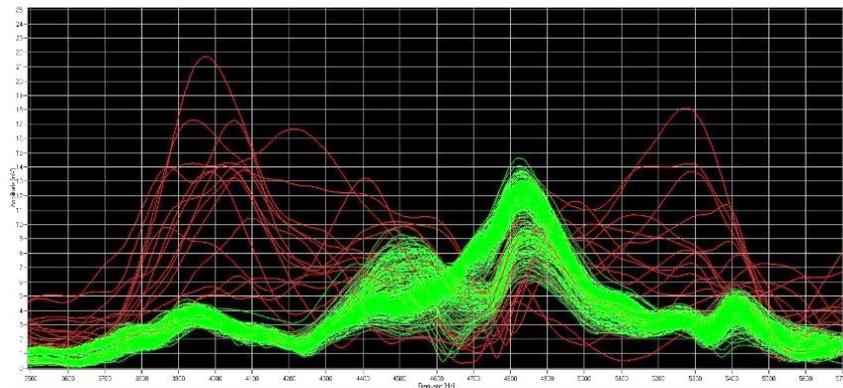


Abb. 4. Alle Messergebnisse der Herstellungsverfahren 1 und 2 im Bereich 3.500 bis 5.700 Hz alle Gut- und Schlechteile (rote Kurven)

Um diese Prüfaufgabe umzusetzen, war die Verwendung herkömmlicher Ansätze übermäßig kompliziert. In einem ersten Lösungsansatz waren bis zu 24 gemeinsame akustische Merkmale notwendig, um die fehlerhaften Prüfteile eindeutig zu klassifizieren. Zu den gemeinsamen Merkmalen gehören Frequenzverschiebung, Frequenzteilung, Amplitudenüberwachung und Amplitudendämpfung.

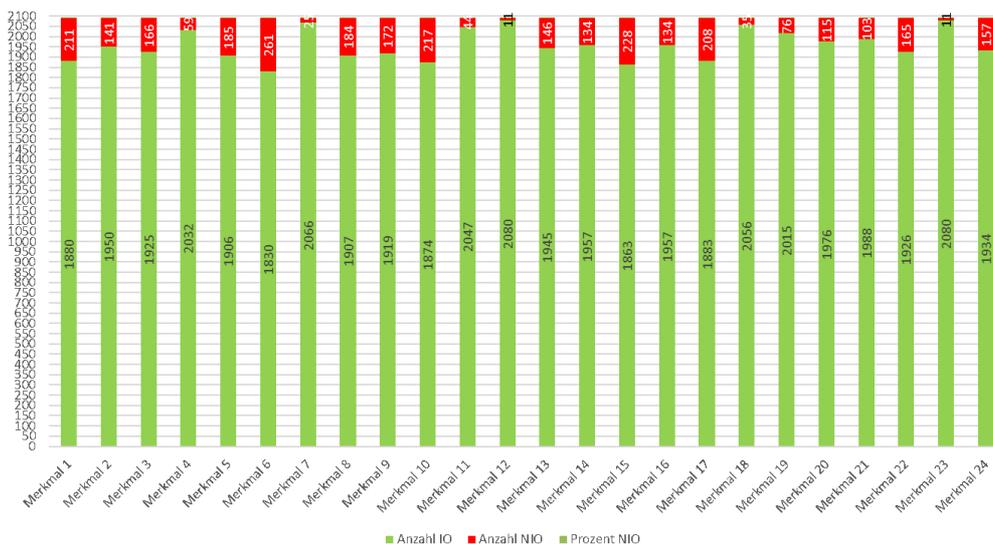


Abb. 5. Statistische Darstellung der einzelnen Merkmale

Eine derart große Anzahl von Prüfkriterien führt zu einer extremen Komplexität des Prüfprogramms und einem hohen Schulungsbedarf bei Bedienpersonal und Qualitätsprüfern. Der Kunde forderte daher, die Anzahl der Prüfkriterien deutlich zu reduzieren, sodass es nur

noch wenige, gemeinsame Kriterien für beide Produktionsprozesse gibt, ohne dass die Trennschärfe reduziert werden muss.

Statt einzelner Frequenzen werden nun ganze Frequenzbereiche mit einem neuen analytischen Ansatz überwacht (Abbildung 6). Diese Prüfmerkmale (wie Summen- oder Mittelwertpegel, quadratische Summe, Ebenheitstoleranz ...) sind aus der NVH-Prüfung bekannt und werden z.B. zur Bewertung von elektrischen Antrieben und vergleichbaren Komponenten eingesetzt. Diese Vorgehensweise bietet den Vorteil, mit einem einzigen Kriterium alle Fertigungseinflüsse ausblenden zu können und dennoch eine zuverlässige und reproduzierbare Bewertung in Serie zu erreichen. Allerdings ist auch hier die manuelle Einrichtung des Prüfsystems notwendig. Diese gestaltet sich jedoch deutlich einfacher als mit herkömmlichen Prüfmerkmalen. Das Prüfsystem wird so eingerichtet, dass alle als "auffällig" bewerteten Prüfteile mit dem Frequenzbereichskriterium aussortiert werden können. Die aussortierten, auffälligen Bauteile werden dann mit anderen, geeigneten Prüfverfahren gegengeprüft. Die Erkenntnisse aus dieser Folgeprüfung werden zur Anpassung des Prüfsystems genutzt. Dadurch kann das Prüfsystem kontinuierlich optimiert und die Pseudo-Ausschlussquote verbessert werden reduziert (Abbildung 7).

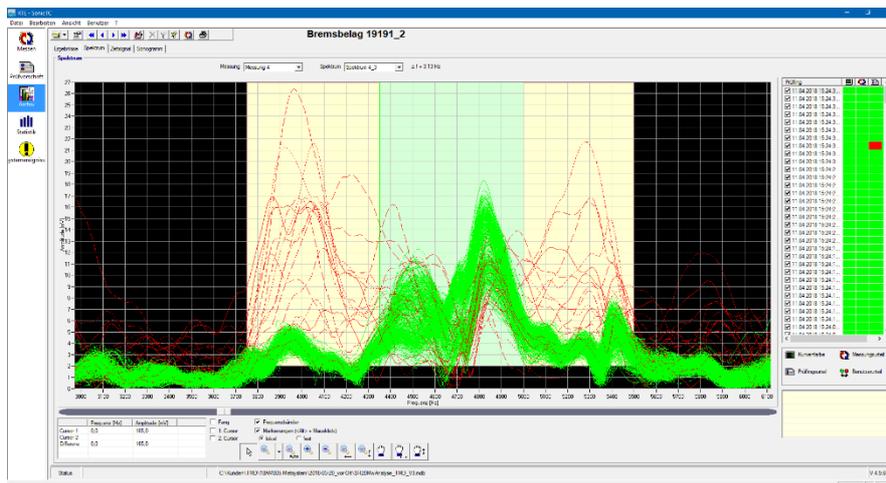


Abb. 6. Neues Kriterium mit Überwachung mehrerer Bandbereiche

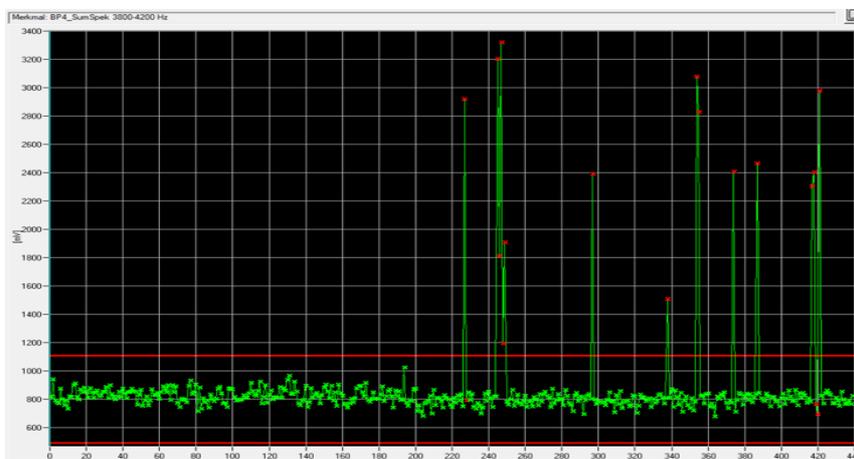


Abb. 7. Statistische Darstellung der Ergebnisse des neuen Prüfmerkmals

Der beschriebene manuelle Prozess der Erstbewertung und Optimierung der Prüfkriterien zur Verbesserung der Trefferquote, kann in einem Folgeschritt auch automatisiert werden. Mit Hilfe mathematischer Mustererkennungsverfahren und automatischer Rückmeldung an den Fertigungsprozess, wird schließlich der Schritt zum selbstlernenden Prüfsystem getan. Erste Versuche in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut IDMT zeigen große Erfolge und versprechen Anwendern eine deutlich einfachere Implementierung und Handhabung akustischer Materialprüfsysteme.

Die bekannten automatischen Einlernverfahren berechnen beispielsweise aus einer Stichprobe von Prüfteilen für ausgewählte einfache Kriterien nach einem statistischen Ansatz den Mittelwert und setzen die Grenzen mit einer vorgegebenen Toleranz (z. B. +/- 3 %). Die Kriterien und die Grenzen werden jedoch nach wie vor manuell durch den Benutzer festgelegt.

Die automatische Justierung der Prüfkriterien ist eine weitere bekannte Option, um den Prozess für die Benutzer zu vereinfachen. Dabei werden die Grenzkurven eines Kriteriums konsequent verfolgt und bei Bedarf nachjustiert [2]. Die Idee dabei ist, Prozessschwankungen aufgrund von Produktionsschwankungen und Umwelteinflüssen nachzubilden, um die Ausschussrate zu minimieren. Ein Nachteil dieses Verfahrens besteht darin, dass die Schwankungen nicht als Fehler oder Prozessfehler gewertet werden und je nach Algorithmus Fehlereffekte überdeckt werden können. Auch vorhandene Referenzteile werden damit womöglich nicht mehr anerkannt. Weiterhin ist die Änderung von Sollwerten und deren Grenzen durch Werksnormen und Qualitätsrichtlinien oft nicht gestattet.

Der neue Ansatz mit Breitbandkriterien hingegen ermöglicht konsistente Kriterien, die die Prozessschwankungen berücksichtigen und immer eine korrekte Erkennung der ausgewählten Referenzteile ermöglichen.

3. Ergebnis Zusammenfassung

Der innovative Aspekt des neuen analytischen Ansatzes ist die Verwendung spezifischer NVH-Merkmale, die Anwendung von Mustererkennungstechniken, die zur zukünftigen Implementierung von Technologien der künstlichen Intelligenz führen. Mit diesen innovativen Ansätzen wird die akustische Prüfung für alle Metall- und Hybridmaterialien anwendbarer und die Akzeptanz für die Qualitätsprüfung erhöht.

Referenzen

- [1] Dipl.-Inform. Ingolf Hertlin, "Akustische Resonanzanalyse", ZfP kompakt und verständlich, Castell 2003
- [2] Dipl.- Dagmar Metzger, "Überwachung von Qualitätsmerkmalen bei Komponenten und Bremssystemen", VDMA 2020