

# Untersuchungen zum Nachweis von Gefüge- und Spannungsveränderungen an randschichtverfestigten Bauteilen mittels akustischer Resonanzanalyse (Klangprüfung)

Matthias HEINRICH\*, Sven KURZENHÄUSER\*, Bernd VALESKE<sup>\*/\*\*</sup>, Walter CALLES\*\*

\* Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP), Campus E3.1,  
66123 Saarbrücken

\*\* Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes (HTWdS), Goebenstraße 40,  
66117 Saarbrücken

**Kurzfassung:** Diese Veröffentlichung zeigt Untersuchungsergebnisse mit akustischer Resonanzanalyse zum zerstörungsfreien Nachweis randschichtverfestigender Prozessschritte, durch welche gezielt oberflächennah wirkende Eigenspannungen in metallische Bauteile eingebracht werden können. Für die Untersuchungen standen zum einen rohrförmige Proben zur Verfügung, deren Eigenspannungszustände gezielt mit einem randschichtverfestigenden Verfahren eingestellt wurden. Zum anderen wurden als Referenz entsprechende Proben genutzt, die vor diesem zusätzlichen Prozessschritt aus der Fertigung entnommen wurden. Für die Bewertung der Prüfmerkmale der akustischen Resonanzanalyse kamen statistische Methoden zum Einsatz. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass die beiden Probensätze mit akustischer Resonanzanalyse anhand zahlreicher Prüfmerkmale eindeutig unterschieden werden können, sodass eine fertigungsbegleitende und zerstörungsfreie Überwachung randschichtverfestigender Prozessschritte realisierbar ist. Weiterhin wurde unter anderem mit Hilfe eines statistischen Modells untersucht, inwiefern Mittelungen aus wiederholten Prüfungen die Prüfaussage bei der akustischen Resonanzanalyse beeinflussen. Abschließend ist der Einfluss eines dünnen Oberflächenfilms auf die Ergebnisse der akustischen Resonanzanalyse gezeigt.

## 1. Einführung

In der Automobilindustrie, dem bedeutendsten Wirtschaftssektor Deutschlands [1, 2], liegt ein besonderer Fokus auf der gewichts- und materialoptimierten Gestaltung neuer Komponenten, um das Gesamtfahrzeuggewicht mit dem Ziel einer schonenden Ressourcen- und Kraftstoffnutzung zu reduzieren. Neben einer optimierten Bauteilkonstruktion werden die Gefügestrukturen und Eigenspannungszustände hochbeanspruchter Komponenten oftmals hinsichtlich der späteren Betriebsbelastung mit randschichtverfestigenden Verfahren (z. B. Kugelstrahlen oder Autofrettage) gezielt eingestellt. Gezielt eingebrachte Eigenspannungen und Betriebsspannungen überlagern sich zu günstigeren Spannungswerten, sodass die Belastbarkeit und die Dauerfestigkeit von Bauteilen signifikant erhöht werden können. So bieten randschichtverfestigende Prozessschritte gegenüber dem Einsatz leistungsfähigerer Werkstoffe kostengünstige Alternativen bei gleichzeitig reduziertem Bauteilgewicht.

Um in einer Serienfertigung sicherzustellen, dass randschichtverfestigende Prozesse zu den vorgesehenen und benötigten Bauteilveränderungen führen, ist eine vollständige Qualitätsüberwachung der produzierten Teile nötig. Der zerstörungsfreie Nachweis solcher



Prozessschritte mit akustischer Resonanzanalyse ist Gegenstand dieser Veröffentlichung. Dabei scheint vor allem die Auswertung der dämpfungsabhängigen Halbwertsbreiten von Resonanzpeaks zielführend, da z. B. für kugelgestrahlte Proben ein linearer Zusammenhang zwischen induzierten Druckeigenstressungen und der Dämpfungsfähigkeit des Materials erkannt wurde [3].

## 2. Prüfverfahren und Versuchsmaterial

### 2.1. Prüfverfahren

Mit der auch als *Klangprüfung* bezeichneten *akustischen Resonanzanalyse* (Acoustic Resonance Testing, ART) werden metallische und keramische Bauteile industriell vor allem auf „Inhomogenitäten und Fehlstellen (Risse, Gefügefehler, Einschlüsse, Abbrüche und Verbindungsgüte)“ geprüft [4]. Die ART bestimmt und bewertet als volumenorientiertes, akustisches Prüfverfahren reproduzierbar u. a. charakteristische Frequenzen (Resonanzfrequenzen), mit denen ein schwingbar gelagerter und elastisch deformierbarer Körper in Abhängigkeit seiner strukturellen Eigenschaften wie Geometrie, Werkstoff oder Gefüge nach einer äußeren Anregung schwingt [4, 5].

Die Anregung eines Prüfobjekts bzw. die Erfassung dessen zeitabhängiger Schwingungsantwort können u. a. durch einen breitbandigen Impuls mit einem kleinen Hammer respektive einem Mikrofon erfolgen [4, 5]. Letzteres registriert den vom schwingenden Objekt in die umgebende Luft abgestrahlten Schall, welcher nach einer kurzen Impulsanregung zahlreiche Frequenzkomponenten enthält, da der Körper mit bestimmten Resonanzfrequenzen in unterschiedlichen Schwingungsformen (Schwingungsmoden) gleichzeitig schwingt. Das digitalisierte Zeitsignal wird in der Regel mit einer diskreten Fourier-Transformation (DFT) vom Zeit- in den Frequenzbereich überführt. In dem so gebildeten Spektrum stellen sich die Resonanzfrequenzen des Prüfobjekts als Peaks dar. Zu jedem dieser Peaks können Prüfmerkmale bestimmt und mit zuvor festgelegten Wertebereichen verglichen werden, um eine Prüfentscheidung abzuleiten [4, 5]. Neben den Resonanzfrequenzen können von jedem Peak weitere Informationen wie die Amplitude oder die Halbwertsbreite als Prüfmerkmale extrahiert werden, wobei die Halbwertsbreite ein Maß für die Dämpfung der entsprechenden Schwingungsmoden ist [6, 7].

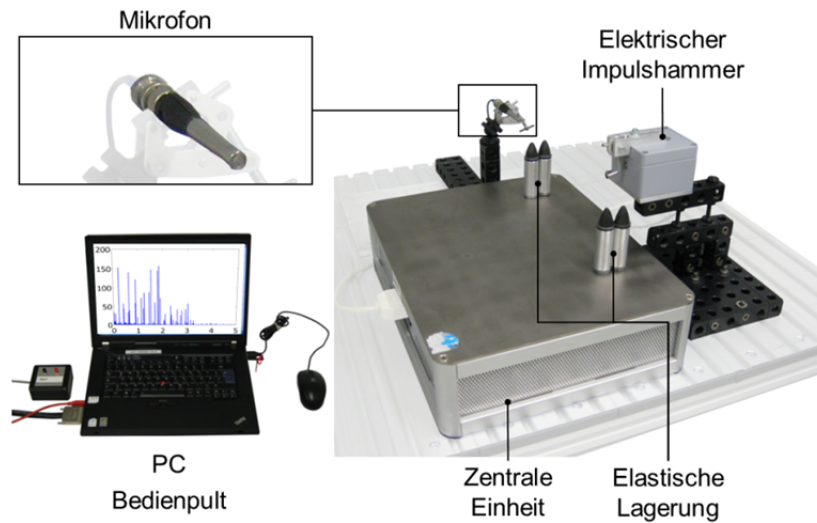
### 2.2. Proben

Die Untersuchungen wurden an 18 rohrförmigen, nicht rotationssymmetrischen Proben aus Stahl (Werkstoff *38MnVS6*) mit einer Länge von ca. 390 mm, einem Innendurchmesser von ca. 9 mm sowie einem zwischen 24 mm und 30 mm variierenden Außendurchmesser vorgenommen. Mit einem randschichtverfestigenden Verfahren wurden in 9 der Proben oberflächennah wirkende Eigenspannungen induziert. Für die 9 weiteren Proben wurde diese zusätzliche Bearbeitung nicht durchgeführt. Die Proben werden im Folgenden als *bearbeitete Proben* bzw. *unbearbeitete Proben* bezeichnet.

### 2.3. Prüfsystem, Prüfaufbau und Prüfparameter

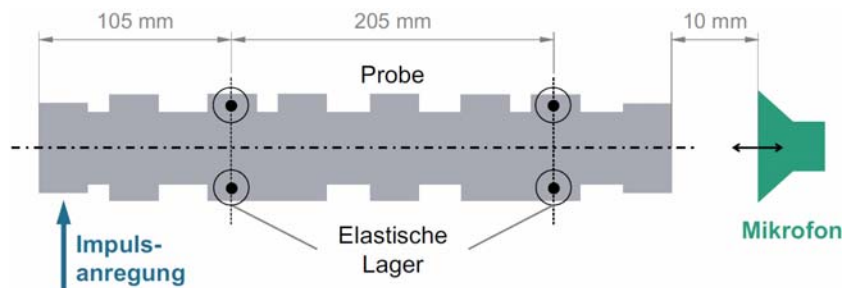
Die akustische Resonanzanalyse wurde mit einem mobilen Prüfsystem der Firma *RTE Akustik + Prüftechnik GmbH* durchgeführt (Abbildung 1). Die Hardware des Systems setzt sich aus der *SigTestBox* als zentrale Einheit zur Signalkonditionierung und Spannungsversorgung, magnetisch arretierbaren, elastischen Auflagen zur Werkstückaufnahme, einem elektrischen Impulshammer sowie einem Mikrofon des Typs *MI 17* der Firma *AVM Mess-*

und Prüfgeräte für Akustik und Vibration zusammen. Darüber hinaus dient ein Notebook mit der Software *SonicTC* (Version 4.7.0) zur Datenaufzeichnung.



**Abbildung 1:** Prüfsystem der Firma *RTE Akustik + Prüftechnik GmbH* zur ART

Für alle Prüfungen wurde ein einheitlicher Prüfaufbau genutzt. Dieser ist schematisch mit Angabe der wichtigsten Maße in *Abbildung 2* (nicht maßstäblich) gezeigt. Jede Probe wurde definiert auf den Lagern positioniert und mit dem elektrischen Impulshammer an einem Ende in radialer Richtung angeschlagen. Die Erfassung der Schwingungsantwort wurde mit dem Mikrofon am anderen Ende der Proben in axialer Richtung realisiert.



**Abbildung 2:** Schematische Darstellung des verwendeten Prüfaufbaus

Die Aufnahme der Daten erfolgte mit einer Abtastfrequenz von 100 kHz für eine Messdauer von 1200 ms. Zur weiteren Signalverarbeitung dieser Daten wurde die Software *Origin-Pro* des Entwicklers *OriginLab* genutzt, wobei die digitalisierten Daten zunächst mit einer DFT vom Zeitbereich in den Frequenzbereich transformiert wurden. In jedem der so gebildeten Spektren wurden daraufhin automatisiert Peaks bestimmt, die abschließend durch numerische Integration bezüglich ihrer Lagen (Resonanzfrequenzen), ihrer Halbwertsbreiten (Dämpfungsmaß) sowie weiterer sechs Merkmale charakterisiert wurden.

### 3. Versuchsreihen und Auswertungen

Die hier vorgestellten Untersuchungen verfolgten zwei Ziele. Primär wurde analysiert, inwiefern der randschichtverfestigende Prozessschritt an den entsprechenden Proben mit Hilfe der ART nachgewiesen werden kann. Zusätzlich wurde untersucht, ob ein dünner Oberflächenfilm die Prüfergebnisse beeinflusst und somit gegebenenfalls einen zu kontrollierenden Störeinfluss darstellt.

### 3.1. Untersuchungen zum Nachweis des randschichtverfestigenden Prozessschrittes

Jede Probe wurde dreimal mit ART geprüft, sodass ebenso viele Datensätze zur Verfügung standen, die getrennt ausgewertet wurden. Dabei umfasst der erste Datensatz die erste, der zweite Datensatz die zweite und der dritte Datensatz die dritte ART jeder Probe. Diese Datensätze sind im Folgenden mit  $M1$ ,  $M2$  und  $M3$  bezeichnet. Darüber hinaus wurde eine zufällig ausgewählte (unbearbeitete) Probe 20-mal mit ART geprüft, wobei vor jeder Prüfung eine Neupositionierung der Probe auf den Lagern vorgenommen wurde.

Statistische Bewertung der Prüfmerkmale: Die Bestimmung geeigneter Prüfmerkmale zum Nachweis des randschichtverfestigenden Prozessschrittes erfolgte mit der *standardisierten Mittelwertsdifferenz*  $d$ . Diese ergibt sich aus dem Betrag der Mittelwertsdifferenz zweier Stichproben bezogen auf deren (kombinierte) Standardabweichung [8]:

$$d = \frac{|\bar{x} - \bar{y}|}{\sqrt{s^2}} = \frac{|\bar{x} - \bar{y}|}{\sqrt{\frac{s_x^2 + s_y^2}{2}}}$$

Dabei ist  $\bar{x}$  das arithmetische Mittel der  $n_x = 9$  Werte ( $x_1, \dots, x_9$ ) eines bestimmten Prüfmerkmals aus der ART der 9 unbearbeiteten Proben. Die Varianz dieser Werte ist  $s_x^2$ . Analog bezeichnen  $\bar{y}$  und  $s_y^2$  den Mittelwert bzw. die Varianz der  $n_y = 9$  Werte ( $y_1, \dots, y_9$ ) des Prüfmerkmals aus der ART der 9 bearbeiteten Proben.

Die Berechnung der standardisierten Mittelwertsdifferenz  $d$  erfolgte getrennt für alle betrachteten Prüfmerkmale. Darüber hinaus wurde diese Bewertung separat für die Datensätze  $M1$ ,  $M2$  und  $M3$  durchgeführt. Je größer die standardisierte Mittelwertsdifferenz für ein Prüfmerkmal ist, desto eindeutiger unterscheiden sich unbearbeitete und bearbeitete Proben anhand dieses Merkmals.

Mittelungen von Werten aus wiederholten Prüfungen: Überlegungen zur Streuung der Werte eines bestimmten Prüfmerkmals bei der Prüfung mehrerer nominell gleicher Proben führten zu einem mathematischen Modell, bei dem die Verteilung dieser Werte durch eine Zufallsgröße  $X_{ART}$  beschrieben ist, die sich wiederum aus der Summe anderer Zufallsgrößen zusammensetzt. Die Zufallsgröße  $X_{ART}$  zur Beschreibung zufälliger Merkmalswerte setzt sich aus einer bauteilabhängigen Komponente  $X_{BT}$  sowie einer von der (zufällig schwankenden) Impulsanregung sowie der (zufällig schwankenden) Positionierung der Probe auf den Lagern abhängigen Komponente  $X_{I,P}$  zusammen. Da die Zufallsgrößen  $X_{BT}$  und  $X_{I,P}$  als stochastisch unabhängig voneinander angenommen wurden, ergibt sich die Varianz der Zufallsgröße  $X_{ART}$  aus der Summe der Varianzen der addierten Zufallsgrößen [9]:

$$\text{Var}(X_{ART}) = \text{Var}(X_{BT}) + \text{Var}(X_{I,P})$$

Im Rahmen der Untersuchungen wurde analysiert, welche dieser addierten Varianzanteile maßgeblich für die Gesamtvarianz  $\text{Var}(X_{ART})$  und damit für die Streuung bei der Prüfung mehrerer nominell gleicher Proben ist. Die Gesamtvarianz  $\text{Var}(X_{ART})$  wurde mit Hilfe des Datensatzes  $M1$  geschätzt, wobei die Werte der bearbeiteten Proben linear so verschoben wurden, dass sie im Mittel auf demselben Niveau wie die Werte der unbearbeiteten Proben liegen. Die Komponente  $\text{Var}(X_{I,P})$  ergab sich aus den Ergebnissen der 20-maligen ART einer Probe. Über den Vergleich der Varianzen  $\text{Var}(X_{ART})$  und  $\text{Var}(X_{I,P})$  ist eine Einschätzung zum Einfluss von Mittelungen auf ein bestimmtes Prüfmerkmal möglich. Darüber hinaus wurden aus den Datensätzen  $M1$ ,  $M2$  und  $M3$  gemittelte Werte gebildet, für die statistische Bewertungen mit der standardisierten Mittelwertsdifferenz durchgeführt wurden. Diese Analysen erfolgten getrennt für mehrere Prüfmerkmale.

Rechnerische Kombinationen mehrerer Prüfmerkmale: Abschließend wurden empirisch mehrere rechnerische Merkmalskombinationen gebildet. Dazu wurden verschiedene Merkmalswerte mit einfachen mathematischen Operatoren kombiniert. Um sicherzustellen, dass jedes einzelne Prüfmerkmal gleichermaßen in ein kombiniertes Merkmal eingeht, wurden die Werte vor der Kombination normiert. Die Bewertung der kombinierten Prüfmerkmale erfolgte ebenfalls mit Hilfe der standardisierten Mittelwertsdifferenz.

### 3.2. Untersuchungen zum Einfluss eines dünnen Oberflächenfilms

Eine zufällig ausgewählte (unbearbeitete) Probe wurde zunächst 20-mal mit ART geprüft, wobei vor jeder Prüfung eine Neupositionierung des Prüfobjekts erfolgte. Daraufhin wurde ein dünner Oberflächenfilm (handelsübliches WD40) auf die Probe appliziert. Abschließend wurden erneut 20 Prüfungen mit ART durchgeführt, bei denen die Probe wiederum vor jeder Prüfung neu positioniert wurde.

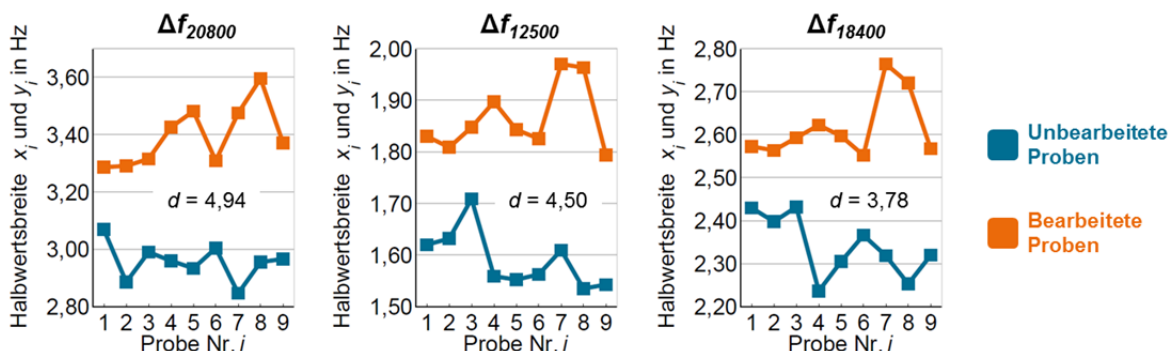
Zur Bewertung des Einflusses eines Oberflächenfilms auf die Ergebnisse der ART wurden für ausgewählte Prüfmerkmale die vor sowie die nach Aufbringen des Films ermittelten Werte grafisch in Diagrammen verglichen. Es sind nur Prüfmerkmale betrachtet, die zuvor den Nachweis des Randschichtverfestigenden Prozesses ermöglichten.

## 4. Versuchsergebnisse und Schlussfolgerungen

Im Folgenden wird zur sprachlichen Vereinfachung für das Prüfmerkmal *Halbwertsbreite des Resonanzpeaks bei ca. X Hz* die Bezeichnung  $\Delta f_x$  mit der jeweiligen Resonanzfrequenz als Index angegeben. Beispielsweise bezeichnet die Abkürzung  $\Delta f_{12500}$  die Halbwertsbreite des Peaks, der sich bei ca. 12500 Hz im Spektrum befindet.

### 4.1. Untersuchungen zum Nachweis des Randschichtverfestigenden Prozessschrittes

Statistische Bewertung der Prüfmerkmale: Es wurden insgesamt 184 Prüfmerkmale (23, Peaks, 8 Prüfmerkmale pro Peak) statistisch bewertet. Dabei zeigte sich, dass eine verlässliche Unterscheidung der unbearbeiteten und der bearbeiteten Proben ohne Überschneidung der Wertebereiche lediglich über die Halbwertsbreiten von 11 Peaks möglich ist. Abbildung 3 zeigt die Werte drei ausgewählter Merkmale ( $\Delta f_{20800}$ ,  $\Delta f_{12500}$ ,  $\Delta f_{18400}$ ) für den Datensatz M1 sowie die zugehörigen standardisierten Mittelwertsdifferenzen. Das Merkmal  $\Delta f_{20800}$  ( $d = 4,94$ ) ist das geeignetste Prüfmerkmal. Bei der Auswertung der Datensätze M2 und M3 ist die deutlichste Unterscheidung der unbearbeiteten und der bearbeiteten Proben mit den Merkmalen  $\Delta f_{20800}$  ( $d = 5,60$ ) bzw.  $\Delta f_{12500}$  ( $d = 4,87$ ) möglich. Davon angesehen führte die Auswertung dieser beiden Datensätze zu vergleichbaren Ergebnissen.



**Abbildung 3:** Ermittelte Werte drei ausgewählter Prüfmerkmale (links:  $\Delta f_{20800}$ , Mitte:  $\Delta f_{12500}$ , rechts:  $\Delta f_{18400}$ ) für den Datensatz M1 sowie zugehörige standardisierte Mittelwertsdifferenzen

Aus den Ergebnissen wurde geschlossen, dass die ART zur zerstörungsfreien Überwachung von randschichtverfestigenden Prozessschritten genutzt werden kann. Da die in die bearbeiteten Proben eingebrachten Eigenspannungen mit plastischen Verformungen und Gefügeveränderungen gekoppelt auftreten, gilt es die physikalischen Hintergründe der beobachteten Effekte zukünftig zu klären.

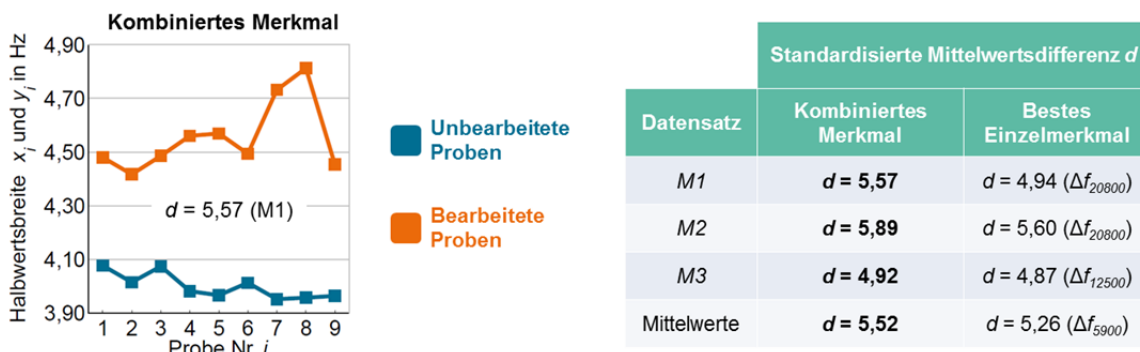
Mittelungen von Werten aus wiederholten Prüfungen: Die Bewertung der Varianzkomponenten mit dem statistischen Modell zeigte für das Merkmal  $\Delta f_{5900}$ , dass die von der Impulsanregung und Probenpositionierung abhängige Varianzkomponente  $\text{Var}(X_{I,P})$  die gleiche Größenordnung wie die Gesamtvarianz  $\text{Var}(X_{ART})$  aufweist. Für ein anderes Prüfmerkmal ( $\Delta f_{12500}$ ) hingegen war die Varianzkomponente  $\text{Var}(X_{I,P})$  deutlich kleiner als die Gesamtvarianz  $\text{Var}(X_{ART})$  (Abbildung 4). Daraus wurde geschlossen, dass Prüfwiederholungen und Mittelungen für das erste dieser Prüfmerkmale zu einer verbesserten Prüfaussage führen, wohingegen für das zweite Merkmal durch eine Mittelung keine wesentliche Verbesserung erreicht werden kann, da bei jeder wiederholten Prüfung ein vergleichbarer Wert ermittelt wird. Dies konnte über den Vergleich der aus den verschiedenen Datensätzen bzw. gemittelten Werten abgeleiteten standardisierten Mittelwertsdifferenzen bestätigt werden.

Vergleich der Varianzkomponenten aus statistischem Modell	Prüfmerkmal	Standardisierte Mittelwertsdifferenz $d$ errechnet für			
		Datensatz $M1$	Datensatz $M2$	Datensatz $M3$	Mittelwerte
$\text{Var}(X_{I,P}) \approx \text{Var}(X_{ART})$	$\Delta f_{5900}$	$d = 2,61$	$d = 2,30$	$d = 3,09$	$d = 5,26$
$\text{Var}(X_{I,P}) \ll \text{Var}(X_{ART})$	$\Delta f_{12500}$	$d = 4,50$	$d = 4,80$	$d = 4,87$	$d = 4,74$

**Abbildung 4:** Vergleich der Varianzkomponenten (links) und standardisierte Mittelwertsdifferenzen in Abhängigkeit des ausgewerteten Datensatzes (rechts) für zwei Prüfmerkmale ( $\Delta f_{5900}$ ,  $\Delta f_{12500}$ )

Die Ergebnisse zeigen, dass Mittelungen einen unterschiedlichen Einfluss auf die verschiedenen Prüfmerkmale nehmen können und potentiell eine deutliche Verbesserung der Prüfaussage ermöglichen. Weiterhin kann mit Hilfe eines statistischen Modells erkannt werden, welche Störeinflüsse (in diesem Fall: Abweichungen bei Impulsanregung und Probenpositionierung) maßgeblich sind. So können diese gegebenenfalls durch einen angepassten Prüfaufbau kontrolliert werden.

Rechnerische Kombinationen mehrerer Prüfmerkmale: Die Bildung empirischer Merkmalskombinationen führte zu einer geeigneten Kombination. Mit Hilfe eines kombinierten Prüfmerkmals (Summe aus  $\Delta f_{12500}$ ,  $\Delta f_{20800}$ ,  $\Delta f_{25900}$  und  $\Delta f_{27800}$ ) konnten die unbearbeiteten bzw. bearbeiteten Proben anhand jedes Datensatzes am deutlichsten unterschieden werden (Abbildung 5). Dies gilt ebenfalls für die aus allen Datensätzen gemittelten Merkmalswerte.

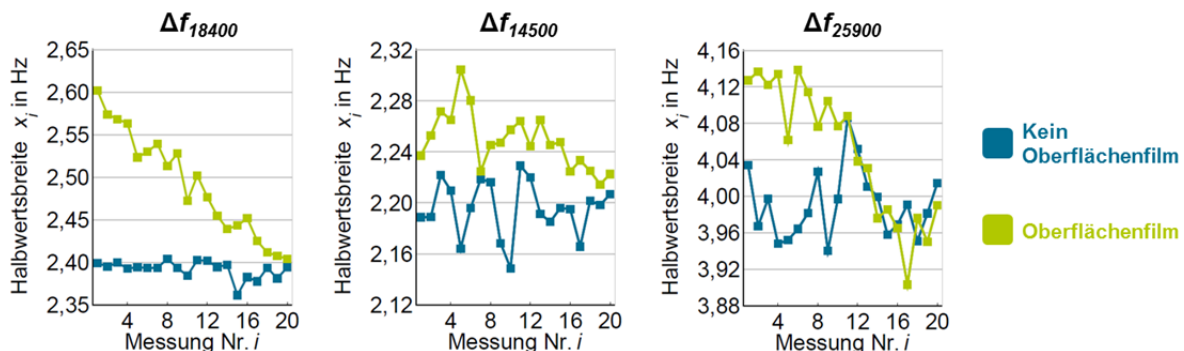


**Abbildung 5:** Ermittelte Werte eines kombinierten Prüfmerkmals (Summe aus  $\Delta f_{12500}$ ,  $\Delta f_{20800}$ ,  $\Delta f_{25900}$  und  $\Delta f_{27800}$ ,  $M1$ , links) sowie zugehörige standardisierte Mittelwertsdifferenzen (rechts)

Aus dieser Analyse wurde festgehalten, dass rechnerische Kombinationen mehrerer Prüfmerkmale ein Werkzeug zur verbesserten Unterscheidung unbearbeiteter und bearbeiteter Proben mit ART darstellen, welches auch für weitere Prüfaufgaben genutzt werden kann.

#### 4.2. Untersuchungen zum Einfluss eines dünnen Oberflächenfilms

Der applizierte Oberflächenfilm beeinflusste die Werte aller betrachteten Prüfmerkmale (Halbwertsbreiten). Abbildung 6 zeigt exemplarisch die Prüfergebnisse für drei Merkmale ( $\Delta f_{18400}$ ,  $\Delta f_{14500}$ ,  $\Delta f_{25900}$ ). Die Werte der ART liegen nach Aufbringen des Films jeweils höher als zuvor. Jedoch ist die Empfindlichkeit gegenüber dem Oberflächenfilm vom Prüfmerkmal abhängig. Weiterhin ist erkennbar, dass der Einfluss des Oberflächenfilms auf einige Prüfmerkmale mit jeder Prüfung abnahm.



**Abbildung 6:** Ermittelte Werte drei ausgewählter Prüfmerkmale (links:  $\Delta f_{18400}$ , Mitte:  $\Delta f_{14500}$ , rechts:  $\Delta f_{25900}$ ) vor sowie nach Aufbringen eines dünnen Oberflächenfilms

Aus den Ergebnissen wurde gefolgert, dass ein applizierter Oberflächenfilm (z. B. ein Korrosionsschutz) die Wertebereiche der Prüfmerkmale beeinflussen kann und somit eine zu kontrollierende Störgröße darstellt. Die Ursachen der beobachteten Effekte sind mit weiteren Untersuchungen zu klären.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Gegenstand dieser Veröffentlichung ist der zerstörungsfreie Nachweis randschichtverfestigender Prozessschritte, mit welchen oberflächennah wirkende Eigenspannungen gezielt in metallische Bauteile eingebracht werden können. Mit akustischer Resonanzanalyse (ART) wurden mehrere rohrförmige Proben zwei unterschiedlicher Eigenspannungszustände geprüft. Für einige der Proben wurde ein randschichtverfestigender Prozessschritt durchgeführt, um oberflächennah wirkende Eigenspannungen zu induzieren. Die anderen Proben wurden vor diesem zusätzlichen Prozess aus der Fertigung entnommen. Die Bewertung der Ergebnisse erfolgte mit statistischen Werkzeugen.

Mit ART wurden für die randschichtverfestigten Proben gegenüber den nicht randschichtverfestigten Proben größere Dämpfungen zahlreicher Schwingungsmoden erkannt, was messtechnisch über die Analyse der Halbwertsbreiten von Resonanzpeaks realisiert wurde. Die Ergebnisse der Untersuchungen lassen erkennen, dass die ART sensitiv gegenüber Eigenspannungen bzw. plastischen Verformungen und den damit gekoppelten Gefügeveränderungen reagiert. Die letztendliche Ursache des beobachteten Effekts bleibt auf Basis dieser Untersuchungen unbekannt, da die Eigenspannungen in den Proben mit den plastischen Verformungen und den Gefügeveränderungen korreliert auftreten. Jedoch ist die ART zum zerstörungsfreien Nachweis randschichtverfestigender Prozessschritte geeignet, was die fertigungsbegleitende 100 %-Überwachung solcher Prozesse ermöglicht.

Mit Hilfe statistischer Kennwerte und Methoden wurden der Einfluss von wiederholten Prüfungen mit anschließender Mittelung sowie der Einfluss rechnerischer Merkmalskombinationen auf die Ergebnisse der ART analysiert. Für die verfügbaren Proben wurde erkannt, dass die Prüfaussage anhand einiger Prüfmerkmale durch Mittelungen signifikant verbessert werden konnte. Für andere Prüfmerkmale zeigte sich kein nennenswerter Einfluss der Mittelungen. Dies konnte mit Hilfe eines Modells vorhergesagt werden. Außerdem wurde mit Hilfe des Modells festgestellt, dass eine schwankende Impulsanregung sowie eine schwankende Positionierung bei der Lagerung der Proben zu unterschiedlich starken Störeffekten in Abhängigkeit des Prüfmerkmals führen können. Eine rechnerische Kombination mehrerer Merkmale führte darüber hinaus zu einer verbesserten Prüfaussage.

In einer weiteren Untersuchung wurde beobachtet, dass einige Prüfmerkmale empfindlich gegenüber einem dünnen Oberflächenfilm reagierten. Daher sind Oberflächenfilme, -beschichtungen oder -verschmutzungen potentielle Störeinflüsse, die berücksichtigt werden müssen. Andererseits stellt die zerstörungsfreie Charakterisierung solcher Oberflächenzustände ein neues potentielles Anwendungsgebiet der ART dar.

Für die Zukunft sind am IZFP weitere Untersuchungen mit ART geplant. Beispielsweise soll das Verfahren mit unterstützenden Simulationen weiterentwickelt werden. So ist unter anderem eine vollständige, virtuelle Nachbildung des Prüfverfahrens geplant, um auf Basis eines Modells z. B. Machbarkeitsstudien durchzuführen oder den Einfluss von Variationen bei der Prüfanordnung mit geringem Aufwand vorauszusagen.

## Referenzen

- [1] Gehr, F.; Hellingrath, B. (Hrsg.): *Logistik in der Automobilindustrie. Innovatives Supply Chain Management für wettbewerbsfähige Zulieferstrukturen*. Springer, Berlin, **2007**
- [2] Statistisches Bundesamt: *Statistisches Jahrbuch 2011. Für die Bundesrepublik Deutschland mit »Internationalen Übersichten«*. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, **2011**
- [3] Singh, L.; Kahn, R. A.; Aggarwal, M. L.: *Relationship between Damping Factor and Compressive Residual Stress for Shot-Peened Austenitic Stainless Steel*. ISRN Mechanical Engineering, Volume 2011, Article ID 867484, doi:10.5402/2011/867484, **2011**
- [4] Hertlin, I.: *Informationsschriften zur zerstörungsfreien Prüfung. ZfP-kompakt und verständlich. Band 5: Akustische Resonanzanalyse*. Castell Verlag, Wuppertal, **2003**
- [5] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V., Unterausschuss Akustische Resonanzverfahren im DGZfP-Fachausschuss Ultraschallprüfung: *Richtlinie US 6. Akustische Resonanzverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung. Prinzip, Vorgehensweise, Merkmale, Validierung*. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V., Berlin, **2009**
- [6] Möser, M.; Kropp, W.: *Körperschall. Physikalische Grundlagen und technische Anwendung*. Springer, Berlin, **2010**
- [7] Kokavecz, J.: *Modalanalyse*. In: Möser, M. (Hrsg.): *Messtechnik der Akustik*. Springer, Berlin, **2010**
- [8] Cohen, J.: *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, **1988**
- [9] Papula, L.: *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Band 3: Vektoranalysis, Wahrscheinlichkeitsrechnung, Mathematische Statistik, Fehler- und Ausgleichsrechnung*. Vieweg, Wiesbaden, **2001**

## Kontakt Daten

Matthias Heinrich  
Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP)  
Grundlagen der ZfP  
Campus E3.1  
66123 Saarbrücken  
Tel.: +49 (681) 9302 - 3915  
E-Mail: [matthias.heinrich@izfp.fraunhofer.de](mailto:matthias.heinrich@izfp.fraunhofer.de)