

Mehr Licht in der Ultraschallermüdung

Einsatz der 3D-Scanning Vibrometrie zur Spannungs- und Dehnungsanalyse bei Beanspruchungsfrequenzen von 20 kHz

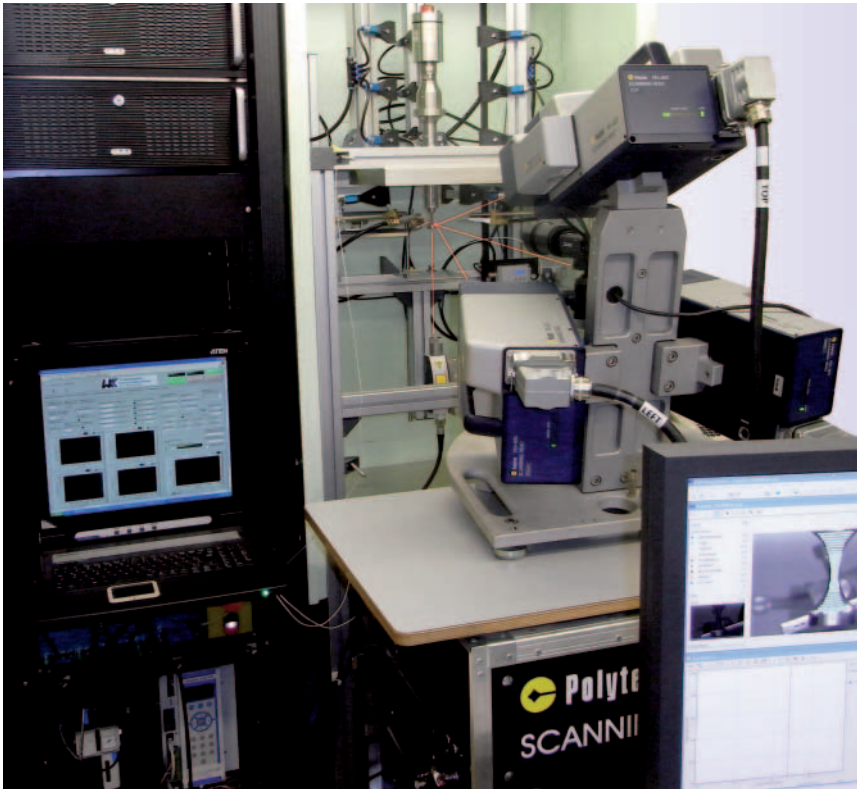


Bild 1: Versuchsaufbau für Ultraschall-Ermüdungsversuche

Das Ermüdungsverhalten von Hochleistungswerkstoffen, beispielsweise Titanlegierungen oder Metall-Matrix-Kompositen (MMC), interessiert insbesondere im Bereich hoher Lastwechselzahlen. Für die Untersuchungen werden in den letzten Jahren zunehmend Versuchseinrichtungen eingesetzt, deren Funktionsweise auf dem piezoelektrischen Effekt beruht. Dieses innovative Beanspruchungsprinzip erfordert jedoch angepasste Kalibrierungs- und Messmethoden. Die 3D-Scanning-Vibrometrie bietet sich hierzu in hervorragender Weise an.

Motivation

Moderne Systeme des Maschinenbaus werden im Laufe ihrer zu erwartenden Lebensdauer zunehmend Lastwechseln von mehr als 10 Millionen ausgesetzt – entweder aufgrund einer hochfrequenten Beanspruchung oder einer langen Einsatzzeit von bis zu 30 Jahren. Dieser Bereich wird als so genannter Very High Cycle

Fatigue (VHCF)-Bereich bezeichnet. Umfassende Kenntnisse zum Ermüdungsverhalten der eingesetzten Werkstoffe sind daher für eine betriebssichere Auslegung dieser Hochleistungsbauteile im VHCF-Bereich von entscheidender Bedeutung. Konventionelle Prüfsysteme arbeiten zumeist mit Beanspruchungsfrequenzen von maximal bis 200 Hz, in Sonderanwendungen bis zu 1000 Hz. Derartige VHCF-Untersuchungen führen somit zu langen und damit unwirtschaftlichen Versuchsdauern.

Die Ultraschallprüfeinrichtung am WKK

Am Lehrstuhl für Werkstoffkunde (WKK) der Technischen Universität Kaiserslautern wurde daher eine innovative Ultraschallprüfeinrichtung für wechselnde Zug-Druck-Beanspruchung entwickelt, die die Realisierung von beispielsweise 10^{10} Lastwechseln in vertretbaren Zeiträumen von weniger als einem Monat

ermöglicht. Das Beanspruchungsprinzip beruht auf einem piezoelektrischen Konverter, der die Ermüdungsprobe zur Resonanzschwingung bei einer festen Frequenz anregt, die zumeist bei 20 kHz liegt. Die sich ausbildende stehende longitudinale Welle führt im Bereich höchster mechanischer Spannung zur „provozierten“ Materialermüdung. Die Auslegung der Ultraschallermüdungsproben erfolgt am WKK durch ein eigenes FE-basiertes Softwarepaket mit dem Ziel, eine definierte Eigenschwingung bei 20 kHz in Abhängigkeit der mechanischen und akustischen Eigenschaften des Untersuchungswerkstoffes einzustellen.

Zur Verifikation des simulierten Probenmodells bietet sich die 3D-Scanning-Vibrometrie als direkte Möglichkeit an, Eigenmoden und Eigenfrequenzen der realen Ermüdungsprobe zu messen. Weiteres Anwendungspotential besitzt die 3D-PSV im Bereich der hochfrequenten Spannungs- und Dehnungsanalyse, da berührende Messverfahren, wie beispielsweise Dehnungsmessstreifen, während der Ultraschallermüdung nur bedingt bzw. nicht dauerhaft eingesetzt werden können.

Versuchsaufbau

Zur Durchführung der Ermüdungsexperimente am WKK wurde ein PSV-400-3D Scanning Vibrometer der Firma Polytec eingesetzt. Bild 1 zeigt den gesamten Versuchsaufbau. Für die Bestimmung der Eigenfrequenzen und Eigenmoden wurden geringe Anregungsamplituden von lediglich 30 nm gewählt, um eine Materialermüdung während der Dauer der Vibrometrie-Untersuchungen auszuschließen.

Eine ortsaufgelöste Dehnungsmessung wurde gezielt nur in der 4 mm langen Messstrecke in Probenmitte durchgeführt, um den Werkstoffbereich der maximalen mechanischen Spannung in wenigen Beanspruchungszyklen zu erfassen. Die erzwungene Schwingung wurde mit der Probeneigenfrequenz und mit Wegamplituden von bis zu 42 μm realisiert.

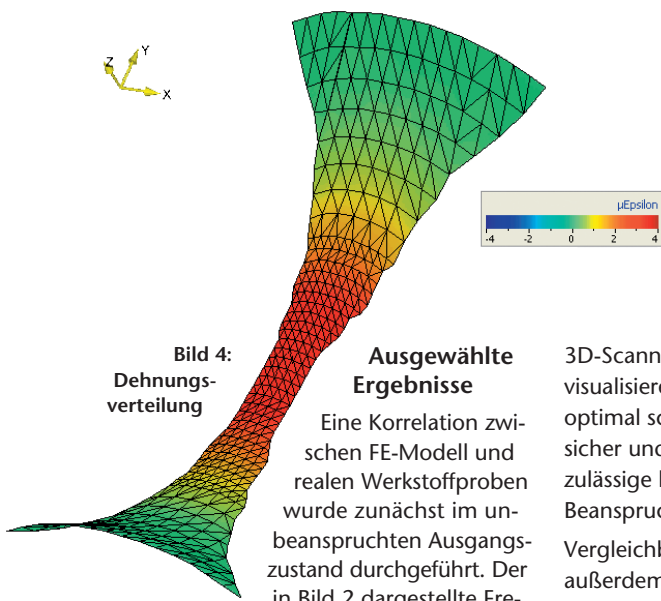


Bild 4:
Dehnungs-
verteilung

Ausgewählte Ergebnisse

Eine Korrelation zwischen FE-Modell und realen Werkstoffproben wurde zunächst im unbeanspruchten Ausgangszustand durchgeführt. Der in Bild 2 dargestellte Frequenzgang zeigt eine Eigenfrequenz bei 20060 Hz. Die zugehörige Eigenschwingung, die in Bild 3 (oben) als Geschwindigkeitsverteilung in Falschfarben dargestellt ist, zeigt die erwartete longitudinale Schwingform. Somit konnte das FE-Modell messtechnisch an einer real gefertigten Ermüdungsprobe erfolgreich validiert werden. Die Möglichkeit, das Schwingungsverhalten der VHCF-Proben mittels

3D-Scanning-Vibrometrie detailliert zu visualisieren, stellt die Verwendung von optimal schwingenden Ermüdungsproben sicher und schließt gleichzeitig eine unzulässige bzw. ungewollte mehrachsige Beanspruchung des Werkstoffes aus. Vergleichbare Untersuchungen wurden außerdem mit einer Probe durchgeführt, die über $N = 1.2 \cdot 10^9$ Lastwechsel bei einer nominellen Spannungsamplitude von lediglich 50 % der quasistatischen Streckgrenze beansprucht wurde. Im Vergleich zur Probe im Ausgangszustand ($N = 0$) konnte hierbei aufgrund der Ermüdungsschädigung eine Verschiebung der Eigenfrequenzen zu niedrigeren Frequenzen festgestellt werden (Bild 2b). Des Weiteren zeigt auch der Eigenmode

(Bild 3, unten) im Bereich von 20 kHz eindeutige Veränderungen in Form einer unsymmetrischen Geschwindigkeitsverteilung entlang der Probenachse und eine stark inhomogene Dehnungsverteilung im unmittelbaren Bereich des bereits an der Oberfläche angekommenen Ermüdungsrisses. Der Riss wurde im Probeninneren initiiert.

In Bild 4 ist die Dehnungsverteilung während der hochfrequenten Schwingung in der Probenmitte dargestellt. Ein Korrelation zwischen der Auslenkung am freien Probenende, die mit einem CLV-2534-2 Einpunkt-Laservibrometer gemessen wurde, und der mittels 3D-Scanning-Vibrometer real gemessenen mechanischen Spannungsamplitude in der Probenmitte zeigt den zu erwartenden proportionalen Spannungsanstieg bei ansteigender Schwingungswegamplitude im elastischen Werkstoffbereich. Die mittels des vorhandenen FE-Modells berechneten Spannungsamplituden zeigen eine gute Übereinstimmung (Bild 5).

Die hier dargestellten ersten Untersuchungen zeigen das große Potential der 3D-Scanning-Vibrometrie im Bereich der Ultraschallermüdung. Hierzu zählen einerseits Analysen von Eigenfrequenzen und Eigenmoden, die zudem zur Charakterisierung eines Ermüdungszustandes herangezogen werden können. Andererseits ist die berührungslose, orts aufgelöste Verformungsmessung gepaart mit moderner Video-Triangulation, wie sie aktuell im 3D-PSV-System eingesetzt wird, eine vielversprechende Option zur hochfrequenten Spannungs- und Dehnungsmessung im Ultraschallbereich.

Zusammenfassung
Die hier dargestellten ersten Untersuchungen zeigen das große Potential der 3D-Scanning-Vibrometrie im Bereich der Ultraschallermüdung. Hierzu zählen einerseits Analysen von Eigenfrequenzen und Eigenmoden, die zudem zur Charakterisierung eines Ermüdungszustandes herangezogen werden können. Andererseits ist die berührungslose, orts aufgelöste Verformungsmessung gepaart mit moderner Video-Triangulation, wie sie aktuell im 3D-PSV-System eingesetzt wird, eine vielversprechende Option zur hochfrequenten Spannungs- und Dehnungsmessung im Ultraschallbereich.

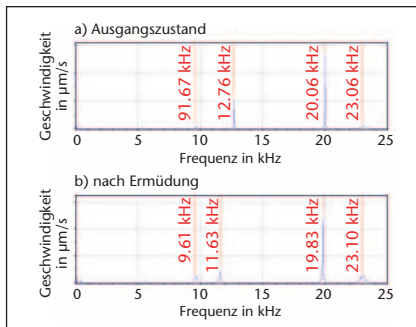


Bild 2: Frequenzgang
a) bei Versuchsbeginn; b) nach Ermüdung

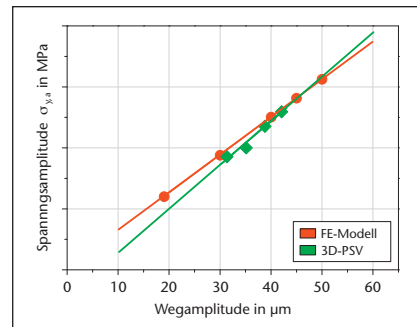


Bild 5: Vergleich FE-Modell und Messung

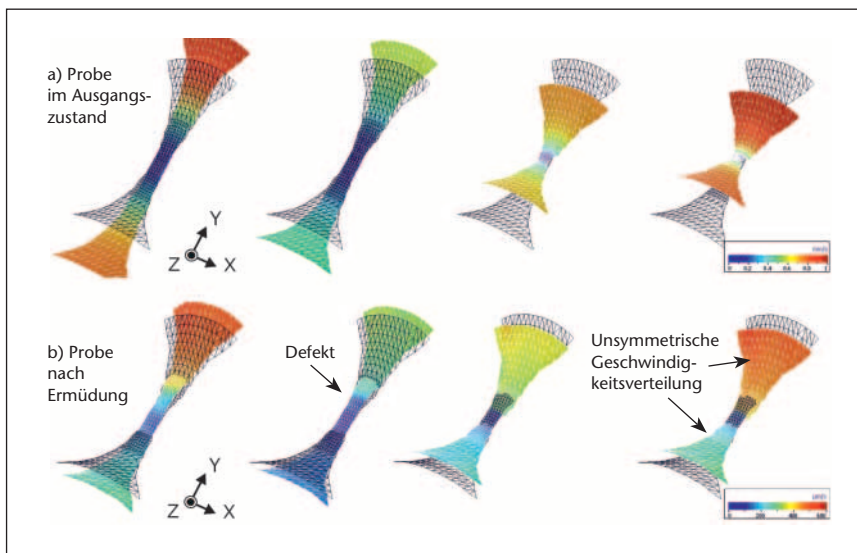


Bild 3: Schwingform; oben: bei Versuchsbeginn; unten: nach Ermüdung

Autoren · Kontakt

Dipl.-Ing. Stefan Heinz¹,
Dr.-Ing. Frank Balle¹, Dr.-Ing. Stefan König²,
Dipl.-Ing. Thomas Mechnig²

heinz@mv.uni-kl.de; balle@mv.uni-kl.de

¹ Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Lehrstuhl für Werkstoffkunde (WKK), Technische Universität Kaiserslautern, D-67663 Kaiserslautern, www.uni-kl.de/WKK

² Polytec GmbH