

Schallfeldoptimierung und Beispiele der berührungslosen laser-akustischen Mikroskopie

Thomas WINDISCH, Matthias LIPPMANN, Frank SCHUBERT,
Norbert MEYENDORF

Fraunhofer Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP
Institutsteil Dresden
Maria-Reiche-Str. 2, 01109 Dresden
thomas.windisch@izfp-d.fraunhofer.de
Tel. +49 351 88815-501

Kurzfassung

Die zerstörungsfreie Prüfung unter Zuhilfenahme akustischer Methoden ermöglicht neben der reinen Darstellung geometrischer Strukturen Änderungen spezifischer Materialeigenschaften und mechanischer Spannungszustände abzubilden. Konventionelle Ultraschalltechnik setzt jedoch in den meisten Fällen ein direktes Ankoppeln eines Sensors an die Oberfläche des Prüflings oder das Arbeiten in Immersionstechnik voraus. Bei einer Vielzahl von Prüfaufgaben ist dies technologiebedingt allerdings nicht möglich und führt zwangsläufig zu einem Ausscheiden akustischer Methoden und dem Verzicht auf den damit verbundenen Informationsgewinn.

Diese Lücke der zerstörungsfreien Prüfung schließt die laser-akustische Mikroskopie, indem akustische Wellen durch den Einsatz von Lasersystemen gezielt angeregt sowie detektiert werden, ohne den Prüfling mit weiteren Medien in Kontakt bringen zu müssen. Dabei werden die Schallwellen nicht wie bisher von einem externen Schallwandler emittiert und anschließend in den Prüfling eingekoppelt, sondern direkt an der Oberfläche erzeugt. Realisiert wird dies durch einen gepulsten Anregungslaser, welcher einem oberflächennahen Volumenelement einen Temperaturgradient einprägt. Über der mit der thermischen Expansion einhergehenden Gefügeverschiebung entsteht ein mechanisches Spannungsfeld als Quelle akustischer Wellen. Treffen gestreute oder transmittierte Teile der akustischen Wellen auf eine freie Oberfläche wird diese in ihrer Normalenrichtung ausgelenkt und über ein zweites Lasersystem detektiert. Damit werden die Vorteile optischer Systeme mit den Stärken etablierter Ultraschallanalytik kombiniert und lassen ein vielversprechendes Prüfverfahren entstehen.

Eine zentrale Fragestellung ist die Charakterisierung und Optimierung der Laser-Akustischen Quellwirkung. Ein tiefgehendes Verständnis der Wechselwirkung zwischen den optischen und akustischen Strahlen bzw. Wellen ermöglicht in den optischen Aufbau einzugreifen und ein für die Messaufgabe optimales Schallfeld zu erzeugen. Neben realen Messergebnissen ist eine Methode vorgestellt, die es ermöglicht, ausgehend von der optischen Energieverteilung auf der Probenoberfläche das akustische Schallfeld im Probenvolumen abzuleiten. Dies dient als Werkzeug zur Verbesserung der Abbildungseigenschaften verdeckter Strukturen mittels Laser-Akustischem Ultraschall.





Schallfeldoptimierung und Beispiele der Laser-Akustischen Mikroskopie

DACH Jahrestagung der DGZfP 2012, Graz

Motivation: Abbildungsverbesserung der Laser-Akustischen Mikroskopie

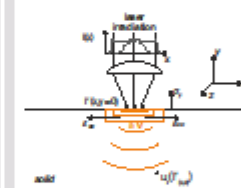
Die Methoden der Laser-Akustik ermöglichen das Anregen und Empfangen akustischer Wellen ohne die Notwendigkeit der akustischen Ankopplung. Dazu werden ein gepulst betriebener Laser für das Einprägen eines Temperaturgradienten und ein als continuous-wave betriebener Messlaser für das Aufzeichnen akustisch induzierter Oberflächenbewegungen oder Druckschwankungen eingesetzt. Durch die hohe Fokussierbarkeit optischer Systeme erfolgt eine flächige Abbildung durch ein Scannen der Probenoberfläche. Dabei definiert die optische Intensitätsverteilung des Anregungslasers das Schallfeld im Volumen und damit die Qualität der Mikroskopie. Für eine genaue Vorhersage und Optimierung des akustischen Feldes wurde ein Rechenalgorithmus entwickelt welcher die Verbindung zwischen Optik und Akustik herstellt und als Designtool dient.



Rechenschema der Schallfeldbestimmung



Modell der Laser-Akustischen Anregung



$$\delta V_i = \frac{3\alpha}{\rho C} (1-R) \iint I_i \cdot dt dA$$

$$u_r = \frac{\alpha}{2\pi r^2} \frac{\delta V}{c \cdot t}$$

$$U(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{r,i} \cdot Y(\theta)$$

Vergleich zwischen simulierter und experimentell bestimmter Schallverteilungen

Strahlprofil des Lasers

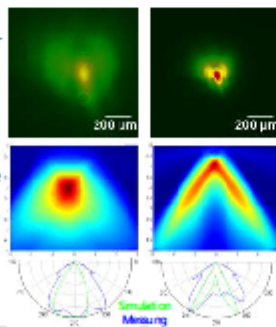
Die Auslegung des optischen Strahlengangs des Anregungslasers definiert die Intensitätsverteilungen auf der Probenoberfläche, womit unterschiedlich abstrahlende Schallquellen realisiert werden.

Schallfeldverteilung

Als Folge dessen ergeben sich typische Schallfelder der L- und T-Wellen wie nebenstehende Simulationsergebnisse für die T-Wellen veranschaulichen.

Abstrahleigenschaften

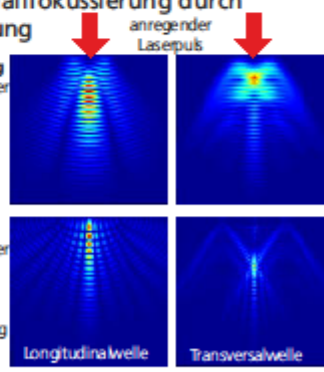
Der Vergleich zwischen Simulation und Messung zeigt Übereinstimmung der prinzipiellen Quellwirkung.



Optimierung der Schallfokussierung durch optische Strahlformung

Ohne optische Strahlformung

- ungünstiges Strahlprofil auf der Probenoberfläche
- vertikal gestrecktes Schallfeld
- diffuse laterale Fokussierung im Volumen der Probe
- ungünstig für Mikroskopie



Mit optischer Strahlformung

- verbessertes Strahlprofil auf der Probenoberfläche
- Reduktion der vertikalen und lateralen Schallverteilung
- hohe transversale Fokussierung
- günstig für Mikroskopie

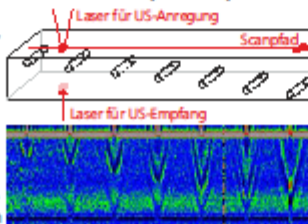
Laser-Akustisches Transmissionbild (B-Scan)

Prüfaufgabe

Abbildung zylindrischer Testfehler mit 0.7mm Durchmesser in unterschiedlichen Tiefenlagen als B-Scan (Ort, Zeit, Intensität)

Laser-Akustische Mikroskopie

Streuhyperbeln der Testfehler erscheinen mit zunehmenden Laufzeiten und repräsentieren die Tiefenlage der Zylinderbohrungen



Zusammenfassung

Die Laser-Akustische Mikroskopie bietet eine Bildgebung von verdeckten Strukturen, ohne die Probe selbst mit irgendeinem anderen Stoff in Verbindung bringen zu müssen. Die Anregung akustischer Wellen erfolgt dabei durch speziell geformte Laserpulse deren Intensitätsverteilung auf der Oberfläche das innere Schallfeld bestimmen. Über die Formung des Strahlprofils lässt sich nun eine gezielte Fokussierung im Schallfeld für hochauflösende Mikroskopie erreichen. Der vorgestellte Rechenalgorithmus ist damit das optisch-akustische Bindeglied, welches die Vorhersage der zu erwartenden akustischen Felder ermöglicht. Die beobachteten Abweichungen lassen sich auf eine unzureichende mathematische Abbildung der Quellthema zurückführen und werden im Weiteren durch halbnumerische ERT-Daten ersetzt.