

Gesteuerte Laser-Akustische Quellen in zeit- und räumlich aufgelöster Darstellung

Thomas Windisch¹, Matthias Lippmann¹, Frank Schubert¹, Norbert Meyendorf^{1,2}

¹ Fraunhofer IZFP, 01109 Dresden, Email: thomas.windisch@izfp-d.fraunhofer.de

² Institut für Aufbau und Verbindungstechnik der TU Dresden, 01062 Dresden

Einleitung

Der Vorteil Laser-Akustischer Quellen gegenüber konventioneller Methoden ist das Anregen hochfrequenter Schallwellen ohne die Notwendigkeit der akustischen Ankopplung. Durch die Kombination zweier Lasersysteme für das Anregen und Empfangen akustischer Wellen entsteht ein System zur kontaktlosen Einpunkt-Messung mit Ultraschall. Wird nun der Messpunkt rasterförmig über die Oberfläche eines Prüflings geführt, so lässt sich anhand der gesammelten Ultraschalldaten das Volumen hinsichtlich Diskontinuitäten im Material untersuchen. Dabei definiert die Verteilung der Schallenergie die erreichbare Ortsauflösung und damit die Qualität der mikroskopischen Abbildung, welche wiederum eine Funktion der räumlich-zeitlichen Intensitätsverteilung des Anregungslasers auf der Probenoberfläche ist.

Die Vorgelegten Arbeiten widmen sich der Frage, wie sich anhand simulierter sowie realer Messdaten der Strahlprofile die Schallverteilung in zunächst homogenen Zielmaterialien beschreiben lassen. Besonders Interesse liegt dabei auf der räumlichen Verteilung der Teilchenauslenkungen sowie der zeitlichen Entwicklung der Wellenfronten. Damit entsteht ein Softwaretool, welches die optischen Strahleigenschaften an der Festkörperoberfläche mit den akustischen Gesetzen der Schallausbreitung im Volumen verknüpft und dem Nutzer ermöglicht, Strahlprofile zu finden, welche vorteilhafte Schallfelder erzeugen.

Laser-Akustische Quellen

Die einfachste Methode zur Laser-Akustischen Anregung hochfrequenter Schallwellen besteht in der Verwendung eines kurzgepulsten Lasermoduls, dessen Strahl auf eine nichttransparente Festkörperoberfläche fokussiert ist. Gemäß der Ausführungen in [1] führt dies zu einem oberflächennahen Temperaturanstieg dessen Anstiegszeit um mehrere Größenordnungen schneller ist, als die thermische Diffusionsgeschwindigkeit im Material. Über die Gesetze der Eindringtiefe elektromagnetischer Wellen ergibt sich ein Zone erhöhter Temperaturen von wenigen Nanometern Dicke. Durch die hohe Fokussierbarkeit monochromatischer Strahlen bis zu wenigen μm Durchmesser ergibt sich ein Quellgebiet der Größenordnung $10^{-15} \dots 10^{-12} \text{ m}^3$. Wie in Abbildung 1 veranschaulicht erfährt das Quellgebiet eine temperaturinduzierte Volumenänderung δV gemäß Gleichung (1).

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

Neben Materialparametern wie dem thermischen Ex-

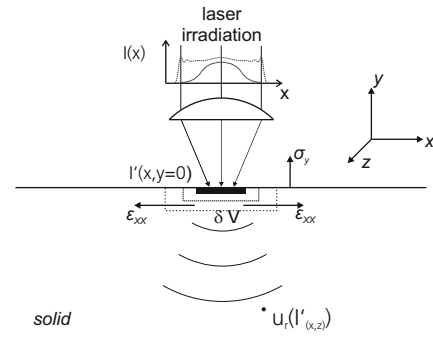


Abbildung 1: Modell der thermoelastischen Laser-Akustischen Anregung

pansionskoeffizient α , der Dichte ρ , der spezifischen Wärmekapazität C und dem optischen Reflektionsgrad R ist diese Änderung umso größer, je kleiner die Anregungsfläche ist und je schneller die Temperaturerhöhung erzwungen wird. Die Verteilung der Volumenänderung erfolgt als Schallwelle im Material, deren Ausbreitungseigenschaften im wesentlichen durch die Randbedingungen der lokalen mechanischen Spannung und Dehnung bestimmt sind. An der Halbraumgrenze parallel zur x-z-Ebene verschwinden die Spannungen in y-Richtung ($\epsilon_y = 0$) während parallel zur Halbraumgrenze die Spannungen bestehen bleiben ($\epsilon_{x,y} \neq 0$). Die Dehnung senkrecht zur Oberfläche ist dabei größer Null ($\sigma_y \neq 0$). Für kleine Quellgebiete deren Abmessungen signifikant kleiner als die kleinste betrachtete Wellenlänge ist, lässt sich eine analytische Beschreibung für das Schallfeld finden. Reale Quellgebiete erfüllen jedoch nicht in jedem Fall diese Bedingung. Zusätzlich zeigen sie Unregelmäßigkeiten in der Intensitätsverteilung, was rein analytisches Beschreiben des Schallfeldes zu einer sehr aufwendigen, wenn nicht sogar undurchführbaren Aufgabe werden lässt. Aus diesem Grund wird hier zu einer Diskretisierung in Teilquellen übergegangen deren Einzelwirkungen anschließend zur Überlagerung gebracht werden.

Berechnung der akustischen Felder

Kern des Rechenalgorithmus ist die Lösung der Anregungsfunktion einer Teilquelle für das betrachtete Volumen. Als Eingabewerte dienen neben den spezifischen Materialparametern der Zeitverlauf der Anregung sowie die Intensitätsverteilung des auf die Probenoberfläche projizierten Laserstrahles. Anschließen erfolgt eine Zerlegung in einzelne amplitudenbewertete Teilquellen, deren akustische Feldverteilung analytisch beschreibbar ist. Dabei werden longitudinale und transversale Wellen getrennt betrachtet und mit den jeweiligen win-

kelabhängigen Schallintensitätsverteilungen multipliziert [2]. Durch eine lineare Überlagerung der Wirkung aller Teilquellen ergibt sich das Schallfeld der gesamten Laser-Akustischen Anregung. Dieser Rechenalgorithmus lässt sich nun auf beliebige Strahlprofile anwenden ohne an bestimmte Symmetriebedingungen gebunden zu sein. Die Ausgabe der Simulation erfolgt als Ortsdiskrete Darstellung der Schallamplituden oder als zeitliche Momentaufnahmen der Wellenfronten. Bei der erstgenannten Variante wird jedem Bildpunkt das Maximum der Teilchenverschiebung in einem bestimmten Zeitfenster zugeordnet wodurch die räumliche Amplitudenverteilung sichtbar wird. Momentaufnahmen der Wellenfronten entstehen dagegen über die Abbildung der Teilchenverschiebung zu einem bestimmten Zeitpunkt für alle Bildpunkte.

Ergebnisse

Untersucht wurden zunächst die longitudinalen und transversalen Teilchenverschiebungen bei gauß- und nicht-gaußförmigen Strahlprofilen des Lasers. Zusätzlich erfolgte in Abbildung 2 die Betrachtung der Überlagerungseffekte in einem schmalen Frequenzband der Mittenfrequenz $f_m = 1$ MHz. Deutlich sichtbar ist das Ausbilden einer natürlichen Fokuszone, ähnlich derer hervorgerufen durch Kreiskolbenschwinger. Die breite bzw. unscharfe Verteilung der Schallmaxima ist für mikroskopische Abbildungen jedoch nur begrenzt nutzbar. Verändert man die Verteilung der Strahlintensität derart, dass eine Schallüberlagerung wie in der unteren Zeile dargestellt entsteht, so lassen sich deutlich verbesserte Abbildungseigenschaften realisieren. Aussagekräftig zeigt sich dabei die weitgehend unterschiedliche Gestalt der Schallfelder der longitudinalen und transversalen Schallwellen. Während die longitudinalen Wellenfronten nahezu einen Linienfokus ausbilden überlagern sich die Transversalen Wellen fast punktförmig.

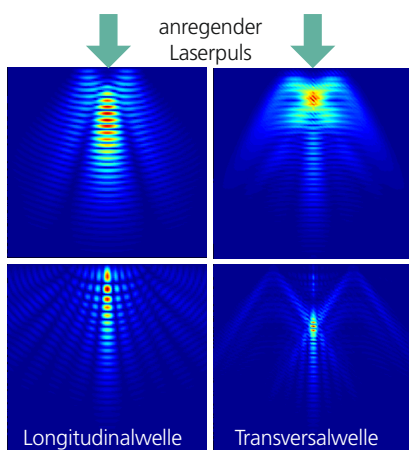


Abbildung 2: Simulation der Teilchenverschiebung für eine Kreisquelle mit Gauß-Profil (obere Zeile) und einer nicht-gaußförmigen Intensitätsverteilung (untere Zeile)

Abbildung 3 zeigt dagegen die zeitliche Entwicklung der fortschreitenden Wellenfronten. Im Gegensatz zu den voranstehenden Ergebnissen wurde hier breitban-

dig gerechnet. Damit ist in diesen Darstellungen die vollständige Laser-Akustische Anregung im Volumen erfasst. Auch hier zeigen sich Überlagerungseffekte in verschiedener Gestalt für longitudinale und transversale Wellenfronten. Bei genauer Betrachtung fällt jedoch eine gewisse Asymmetrie in den Abbildungen auf. Ursache dafür ist, dass hier mit einem real gemessenen Strahlprofil gerechnet wurde, welches naturgemäß Symmetrieabweichungen mit sich führt.

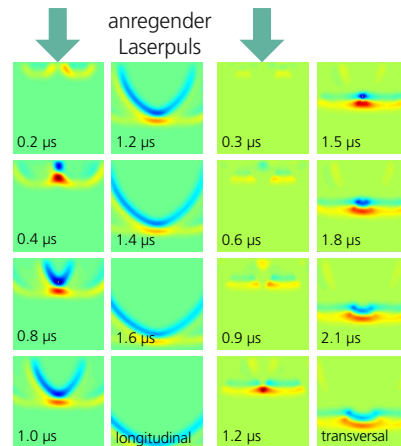


Abbildung 3: Momentaufnahmen der longitudinalen und transversalen Teilchenverschiebung eines realen Strahlprofils

Diskussion

Laser-Akustische Methoden ermöglichen akustische Messungen ohne Schallankopplung. Auch wenn die Grundlagen bereits in den 80er Jahren gelegt wurden gibt es dennoch offene Fragestellungen mit direktem Bezug zur aktuellen Mess- und Analysetechnik, wie beispielsweise der gezielten Schallfeldformung durch Variation der Strahlprofile. Auch wenn nur die Grundzüge vorgestellt werden konnten, so zeigt sich sehr gut, wie durch die Kombination von analytischen, numerischen und messtechnischen Methoden ein Werkzeug zur Vorhersage und damit zum Design Laser-Akustischer Wellenfelder entsteht. Aktuell durchgeführte Vergleichsmessungen deuten auf eine gute Vorhersagegenauigkeit der Simulation, auch wenn der Beweis für das Übertragen der thermo-mechanischen Gleichungen von der infinitesimalen Punktquelle hin zur ausgedehnten Quelle nur schwer zu führen ist. Die Auswertung der Messdaten sowie eine Gegenrechnung unter Nutzung der EFIT-Methode [3] wird helfen, die Rechenmodelle weiter zu präzisieren.

Literatur

- [1] Scruby, C.B.: Laser ultrasonics: techniques and applications, Taylor & Francis, 1990
- [2] Hutchins, D.A.: Directivity patterns of laser generated ultrasound in aluminum, J. Acoust. Soc. Am. Volume 70, Issue 5, pp. 1362-1369, 1981
- [3] Schubert, F.: The elastodynamic finite integration technique for waves in cylindrical geometries, Volume 104, Issue 5, pp. 2604-2614, 1998