

Untersuchung des Photoakustischen Effekts durch Messung von Oberflächenschwingungen

Fabian Fritsch, Anne Harth

Aalen School of Applied Photonics, Zentrum für Optische Technologien, Hochschule Aalen, Aalen
mailto:fabian.fritsch@hs-aalen.de

In dieser Arbeit wird die kontaktlose Detektion laserinduzierter photoakustischer Schallwellen mittels Laser-Doppler-Vibrometrie untersucht. Messungen mit Nanosekundenpulsen bestätigen die prinzipielle Machbarkeit des Verfahrens. Zukünftige Untersuchungen mit Pikosekundenpulsen sollen hochfrequente Ultraschallanregung und eine verbesserte räumliche Auflösung ermöglichen.

1 Motivation

Die Laser-Ultraschalltechnik umfasst kontaktlose Messmethoden basierend auf der Erzeugung und Detektion von Ultraschallwellen. Ihre Anwendungen liegen in der Dickenmessung, Fehlererkennung und Materialcharakterisierung [1].

In dieser Arbeit wird untersucht, ob sich in Silizium laserinduzierte photoakustische Schallpulse mittels Laser-Doppler-Vibrometrie (LDV) nachweisen lassen. Dazu wird ein kurzer Laserpuls verwendet, um durch den photoakustischen Effekt einen elastischen Puls im Material zu erzeugen, dessen Oberflächenauslenkung anschließend mit einem Laser-Doppler-Vibrometer gemessen wird. (Siehe Fig.1)

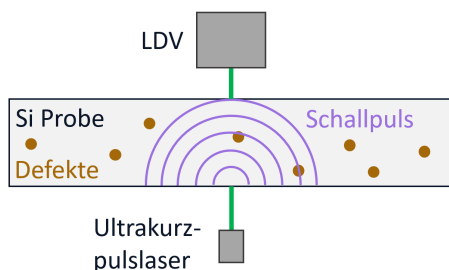


Fig. 1 Konzeptioneller Aufbau. Der Schallpuls ist schematisch dargestellt.

2 Der photoakustische Effekt

Beim photoakustischen Effekt wird absorbierte Strahlungsenergie in Wärme umgewandelt. Die dadurch hervorgerufene lokale Temperaturerhöhung führt über die thermische Ausdehnung zu einem Druckanstieg, der sich als elastische Welle im Material ausbreitet. Für den anfänglichen Druck p_0 gilt:

$$p_0 = \Gamma \eta_{th} \mu_a F$$

wobei Γ der Grüneisen-Parameter, η_{th} der Wirkungsgrad der Wärmeumwandlung, μ_a der Absorptionskoeffizient und F die optische Fluenz sind [2]. Die Amplitude des erzeugten Ultraschallpulses

hängt somit sowohl von den Materialeigenschaften als auch von den Laserparametern ab.

Zur Detektion der Oberflächenbewegung wird ein Laser-Doppler-Vibrometer eingesetzt. Dieses basiert auf einem interferometrischen Messprinzip, bei dem die Bewegung der Probenoberfläche eine Dopplerverschiebung des reflektierten Laserlichts verursacht. Aus der gemessenen Schwebungsfrequenz lässt sich die Geschwindigkeit der Auslenkung der Oberfläche und damit die zeitliche Entwicklung des Ultraschallsignals bestimmen [4].

3 Versuchsaufbau und Methodik

Zunächst wurde der Nachweis des Messprinzips mit einem Nanosekundenlaser durchgeführt, da diese Pulsdauer bei ähnlichen Experimenten zum Einsatz kam [3]. Hierzu kam ein Quanta-Ray DCR-11 frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm, einer Pulsenergie von bis zu 10 mJ, einer Pulsdauer von etwa 60 ns und einer Wiederholrate von 10 Hz zum Einsatz. Um eine Beeinflussung des Vibrometers durch Streulicht zu vermeiden, erfolgte die optische Anregung von der Unterseite der Probe, während die Oberflächenbewegung auf der gegenüberliegenden Seite mit einem Polytec MSA-600-X LDV gemessen wurde.

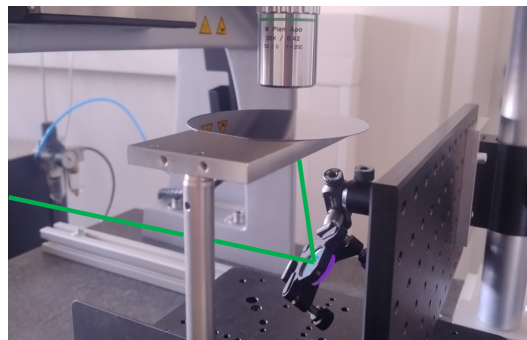


Fig. 2 Messaufbau. Strahlengang des Anregelasers ist grün markiert.

Im Frequenzspektrum der gemessenen Oberflächenschwingungen zeigte sich bei einer

0,55 mm dicken Siliziumprobe ein deutlicher Peak bei etwa 8,2 MHz (Siehe Fig.3).

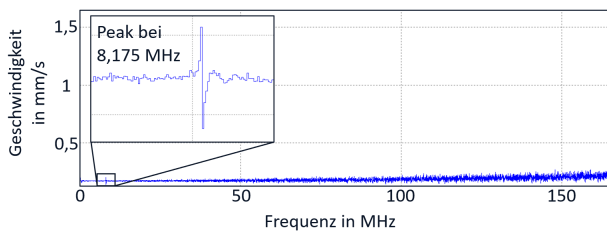


Fig. 3 Gemessenes Spektrum bei Anregung der 0,55 mm dicken Siliziumprobe mit ca. 60 ns Pulsen.

Dieser Peak entsteht wahrscheinlich durch den zwischen den beiden Probenoberflächen hin und her reflektierten longitudinalen Schallpuls.

Die gemessenen Resonanzfrequenzen wurden zusätzlich an einer 1 mm dicken Siliziumprobe sowie einer 2 mm dicken eloxierten Aluminiumprobe untersucht (Siehe Tab.1).

Probe	Erwartete Frequenz	Gemessene Frequenz
0,55 mm Si	7,665 MHz	8,156 MHz
1 mm Si	4,216 MHz	4,938 MHz
2 mm Al	1,594 MHz	1,462 MHz

Tab. 1 Vergleich gemessener und erwarteter Frequenzen verschiedener Proben.

In allen Fällen stimmten die gemessenen Frequenzen gut mit den aus Schallgeschwindigkeit und Probendicke erwarteten Werten überein. Dies bestätigt, dass die beobachteten Signale auf laserinduzierte photoakustische Schallwellen zurückzuführen sind.

4 Diskussion und Ausblick

Die durchgeführten Experimente zeigen, dass photoakustisch erzeugte Ultraschallpulse mittels Laser-Doppler-Vibrometrie detektiert werden können. Gleichzeitig wird deutlich, dass eine Pulsdauer von 60 ns für dünne Siliziumproben bereits in der Größenordnung der Laufzeit des Schallpulses durch die Probe liegt. Dadurch entsteht kein ideal kurzer Ultraschallpuls, wodurch sowohl die zeitliche als auch die spektrale Auflösung begrenzt werden.

Die Qualität des erzeugten Ultraschallpulses wird maßgeblich durch die Dauer des Laserpulses bestimmt. Damit ein möglichst kurzer Druckpuls entsteht, müssen sowohl die Bedingungen des Stress Confinement als auch des Thermal Confinement erfüllt sein [2]. Die Pulsdauer t_p muss daher kleiner sein als

$$t_p < \frac{\delta}{v_s}$$

beziehungsweise

$$t_p < \frac{\delta^2}{4D_T}$$

wobei $\delta = \frac{1}{\mu_a}$ die optische Absorptionstiefe, v_s die Schallgeschwindigkeit und D_T die thermische Diffusivität sind. Wenn Stress und Thermal Confinement erfüllt sind, ist der Laserpuls kurz genug, dass während der Absorption keine signifikante thermoelastische Ausdehnung oder thermische Diffusion stattfindet, d.h. die anfängliche Druckverteilung hat minimale Ausdehnung und maximale Amplitude. Für Silizium bei einer Wellenlänge von 532 nm ergibt sich daraus eine maximale Pulsdauer von etwa 128 ps.

Im Ultrakurzpulsregime existiert jedoch auch eine untere Grenze. Nach der optischen Absorption erfolgt die Energieübertragung von den angeregten Elektronen auf das Kristallgitter erst über die Elektron-Phonon-Kopplung, deren Zeitkonstante im Pikosekundenbereich liegt [5]. Dadurch kann die effektive Anregedauer nicht beliebig verkürzt werden. Gleichzeitig steigt bei den hohen Intensitäten sehr kurzer Pulse die Wahrscheinlichkeit nichtlinearer Absorptionsprozesse, die zu Materialschädigungen führen können. Aus diesen Überlegungen ergibt sich ein sinnvoller Arbeitsbereich von etwa 1 bis 100 ps.

Aus diesem Grund werden zukünftige Untersuchungen mit einer Pikosekundenlaserquelle (Trumpf Tru-Micro 2030) durchgeführt. Aufgrund der geringen Absorptionstiefe von etwa 1 μm in Silizium bei 515 nm werden Ultraschallfrequenzen im Bereich von etwa 100 MHz bis 1 GHz erwartet. Erste Messungen zeigen bereits spektrale Linien bei ganzzahligen Vielfachen der Anregungsfrequenz. Die physikalische Ursache dieser Signale ist Gegenstand aktueller Untersuchungen.

References

- [1] Jean-Pierre Monchalain. *LASER-ULTRASONICS: PRINCIPLES AND INDUSTRIAL APPLICATIONS* (2007) doi:10.1142/9789812770943-0004
- [2] Zhou Y, Yao J, Wang LV. *Tutorial on photoacoustic tomography*, J Biomed Opt. 2016;21(6):61007. doi:10.1117/1.JBO.21.6.061007
- [3] A. G. Every and Wolfgang Sachse. *Imaging of laser-generated ultrasonic waves in silicon*, Physical Review B (1991)
- [4] Rembe, C., Bucher, I., Halkon, B. et al. *Laser Doppler vibrometry*, Nat Rev Methods Primers 6, 30 (2026). <https://doi.org/10.1038/s43586-026-00487-2>
- [5] S. I. Anisimov, B. L. Kapeliovich, T. L. Perelman. *Electron emission from metal surfaces exposed to ultrashort laser pulses* (1974)