

# Räumliche Auflösung im Subwellenlängenbereich in einer akustischen Mikroskopanordnung mit Faserspitzensensoren

Christian Koch

Lab. 1.43, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

## 1. Einführung

Mit Hilfe bildgebender Ultraschallverfahren wie z. B. der akustischen Mikroskopie lassen sich räumliche Auflösungen im mm- und  $\mu\text{m}$ -Bereich realisieren. Die dabei zum Einsatz kommenden Schallfelder haben Frequenzen zwischen ca. 1 MHz und mehreren Gigahertz. Poröse Stoffe, wie z. B. Holz oder Knochensubstanz weisen bei diesen Frequenzen jedoch hohe Absorptionsgrade auf. Um die Signalverluste bei einer Untersuchung mit Ultraschall gering zu halten, muß die Frequenz deutlich verringert werden [1,2], was andererseits aber zum Verlust der notwendigen Auflösung führt. Die Registrierung des Schallfeldes mit einem Detektor, dessen äußere Ausdehnung deutlich unter der der akustischen Wellenlänge  $\lambda$  liegt, stellt eine sinnvolle Lösungsmöglichkeit dar. In diesem Fall ist die Auflösungsgrenze nicht mehr durch die Wellenlänge  $\lambda$  sondern durch die Dimensionen des Detektors bestimmt.

Auf der Suche nach einem genügend kleinen Ultraschallsensor bieten sich Faserspitzensensoren an, die bisher für verschiedene Meßaufgaben eingesetzt wurden. Für einen solchen Sensor wird die senkrecht geschnittene Endfläche eines optischen Lichtwellenleiters mit einer Metallschicht [3] bedeckt und die Verschiebung der Faserendfläche interferometrisch gemessen. Alternativ kann man auch dielektrische Schichten nutzen und die Änderung des optischen Reflexionsfaktors des Schichtsystems infolge der Ultraschalleinwirkung detektieren [4]. Im folgenden Beitrag wird gezeigt, wie mit einem metallbeschichteten Faserspitzensensor eine Auflösung im Subwellenlängenbereich in einer akustischen Transmissionsmikroskopanordnung erreicht werden kann [5]. Als Objekt dient ein variabler Spalt, der bis zu  $\lambda/20$  schmal eingestellt werden kann und auf einen Polystyrolstab aufgebracht ist. Dieses Objekt simuliert eine mögliche Änderung der elastischen Eigenschaften in einem Festkörper z. B. durch ein Störung des Gitteraufbaus, Einschlüsse oder Risse.

## 2. Experimenteller Aufbau und Ergebnisse

Für den Nachweis der Auflösung im Subwellenlängenbereich wurde eine experimentelle Anordnung (Abb. 1) verwendet, bei der das Objekt in Transmission untersucht wurde. Der Spalt mit variabler Breite wurde dabei durch zwei 0.5 mm dicke Messingplatten gebildet, die auf einem Polystyrolstab mit 25 mm Durchmesser auflagen, wobei eine dünne Wasserschicht als Koppelmedium diente. Die Unterseite des Stabes war wiederum über eine dünne Wasserschicht mit einem ebenen Wandler verbunden (Breitbandwandler 0.7-3 MHz, aktiver Durchmesser 24 mm). Der Wandler wurde mit Tonbursts mit einer Mittenfrequenz von 1.4 MHz ( $\lambda = 1.1$  mm in Wasser) angeregt. Die Dauer der

Bursts von 6 Schwingungen war an die Länge des Polystyrolstabes (18 mm) angepaßt, um eine Trennung des direkten Schallsignals von reflektierten Anteilen zu ermöglichen.

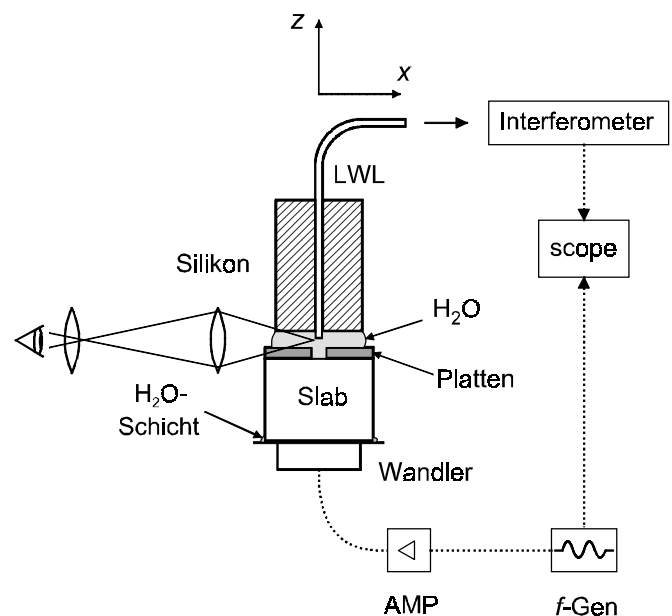


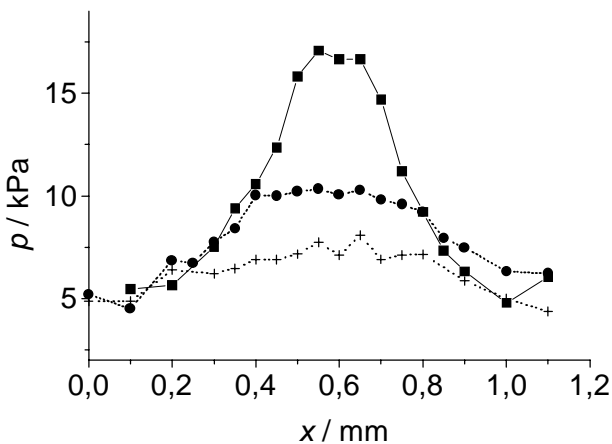
Abb. 1: Experimenteller Aufbau; f-Gen: Funktionsgenerator, AMP: Verstärker, LWL: Lichtwellenleiter.

Das durch den Spalt dringende Schallfeld wurde mit einem metallbeschichteten Faserspitzensensor (Schichtdicke ca. 200 nm, Material: Titan) registriert, der mit Hilfe eines Wassertropfens an das Objekt angekoppelt wurde. Die Verschiebung der Faserspitze infolge der Ultraschalleinwirkung wurde mit Hilfe eines Heterodynterferometers gemessen [3], das ein Ausgangssignal proportional zum Schalldruck lieferte. Die Amplitude der Bursts wurde mit Hilfe einer FFT im Fourierraum unter Einbeziehung der Verluste des verwendeten Hamming-Fensters ermittelt. Der Sensor war, mit Ausnahme der Spitze, von Silikon umschlossen, das den Wassertropfen zur Ankopplung nach oben hin begrenzte. Da die Impedanz des Silikons nahezu an das Wasser angepaßt war, traten keine Vielfachreflexionen im Wassertropfen auf.

Der Abstand des Sensors vom Objekt, der bei allen Nahfeldverfahren sehr kritisch ist [6], wurde mit einem Mikroskop bestimmt, das mit einem Meßokular ausgerüstet war. Auf diese Weise konnte der Abstand mit einer Genauigkeit von ca. 30  $\mu\text{m}$  ermittelt werden, was für dieses erste Experiment ausreichte.

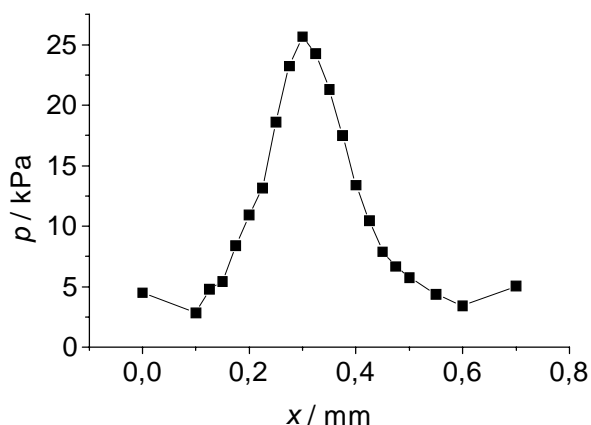
Die ermittelte Schalldruckamplitude ist in Abb. 2 für einen 0.2 mm breiten Spalt in Abhängigkeit von der Abtastweite

dargestellt, wobei der Abstand  $d_{SO}$  zwischen Sensor und Objekt variiert wurde. Der Spalt wird gut wiedergegeben, wenn  $d_{SO}$  klein ist und die gemessene Halbwertsbreite der Druckverteilung (FWHM) beträgt  $310\ \mu\text{m}$ . Steigt der Abstand zwischen Sensor und Objekt auf  $250\ \mu\text{m}$ , verschlechtert sich die Auflösung erheblich (FWHM =  $630\ \mu\text{m}$ ) und bei  $d_{SO} = 850\ \mu\text{m}$  verschwindet der Kontrast nahezu vollkommen.



**Abb. 2:** Gemessene Druckamplitude beim Abtasten eines  $200\ \mu\text{m}$  breiten Spaltes in Abhängigkeit von der Abtastweite für verschiedene Sensor-Objekt-Entfernungen; Quadrate:  $d_{SO} = 50\ \mu\text{m}$ , Punkte:  $d_{SO} = 250\ \mu\text{m}$ , Kreuze:  $d_{SO} = 850\ \mu\text{m}$ ,

Die gemessene Halbwertsbreite der Druckverteilung ist mit minimal  $310\ \mu\text{m}$  deutlich größer als die Spaltbreite des Objektes, auch wenn  $d_{SO}$  mit  $50\ \mu\text{m}$  kleiner als der Sensordurchmesser ist. Um die Auflösungsgrenze der Anordnung genauer untersuchen zu können, wurde die Spaltbreite auf  $50\ \mu\text{m}$  reduziert und damit kleiner als der Sensordurchmesser eingestellt.



**Abb. 3:** Gemessene Druckamplitude beim Abtasten eines  $200\ \mu\text{m}$  breiten Spaltes in Abhängigkeit von der Abtastweite

Die gemessene Schalldruckverteilung zeigt Abb. 3 und ihre Halbwertsbreite beträgt  $160\ \mu\text{m}$ . Dieser Wert ist ungefähr gleich der Summe aus Sensordurchmesser und Objektspaltsbreite. Dieser Umstand legt die Vermutung nahe, daß

Randwellen, die an der Faserbegrenzung entstehen, die Auflösung begrenzen. Befindet sich der Faserrand genau gegenüber dem Spalt, werden an der Kante Randwellen erzeugt, die den Faserkern erreichen und ein Meßsignal erzeugen.

An den in Abb. 2 gezeigten Ergebnissen fällt weiterhin auf, daß die räumliche Auflösung bereits für Sensor-Objekt-Entfernungen von ca.  $200\ \mu\text{m}$  stärker sinkt, als dies von theoretischen Vorhersagen zu erwarten wäre [6]. Hierfür sind wahrscheinlich Wellenleitungs- und Resonanzeffekte verantwortlich. Zum Einen werden Randwellen am Objekt und an der Faser reflektiert, die ohne Objekt in den freien Raum abgestrahlt worden wären und so den Kern erreichen. Zum Anderen bildet sich zwischen der Polystyrol-Wasser-Grenzfläche am Boden des Spaltes und der Faserendfläche ein Resonator aus, der außer Resonanz gerät, wenn  $d_{SO}$  vergrößert wird und damit eine stärkeres Abklingen des Signals erzeugt.

### 3. Ausblick und Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurde eine Auflösung im Subwellenlängenbereich in einer akustischen Mikroskopanordnung demonstriert, wobei ein Faserspitzensensor als Miniaturdetektor genutzt wurde. Es konnte ein Spalt mit einer Breite von  $\lambda/20$  dargestellt werden, wenn der Abstand zwischen Sensor und Objekt ebenfalls etwa  $\lambda/20$  betrug. Die Auflösung war durch den äußeren Durchmesser der Faser begrenzt. Sie kann jedoch durch spezielle Präparation der Faserendflächen verbessert werden. So würde eine Vergrößerung des Sensors über den Abtastbereich hinaus, z. B. durch Einsetzen in eine Kapillare, die störenden Randwellen vermeiden. Umgekehrt erscheint aber auch ein Anspitzen des Sensors möglich. Eine Erweiterung des Meßsystems ist auch dadurch möglich, daß teilreflektierende Schichten verwendet werden und das aus dem Sensor austretende Licht für eine optische Abbildung verwendet wird. Damit ergibt sich die Möglichkeit, ein optisches und ein akustisches Mikroskop miteinander zu kombinieren.

### 4. Literatur

- [1] M. L. Peterson, S. Srinath, J. Murphy, „A waveguide-based acoustic microscope“ *Ultrasonics* **36**, (1998), 855.
- [2] J. L. Sandoz (Ed.), Proceedings of the 10th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Lausanne (Swiss Federal Institute of Technology 1996).
- [3] Ch. Koch, „Measurement of ultrasonic pressure by heterodyne interferometry with a fiber-tip sensor“, *Appl. Opt.* **38** (1999), 2812.
- [4] V. Wilkens, Ch. Koch, „Fiber-optic multilayer hydrophone for ultrasonic measurement“, *Ultrasonics* **37** (1999), 45-49.
- [5] Ch. Koch, „Sub-wavelength resolution in a transmission acoustic microscope configuration using fiber-tip sensors“. *Appl. Phys. Lett.* **75** (1999), 1691-93.
- [6] E. Betzig, A. Harootunian, A. Lewis, M. Isaacson, „Near-field diffraction by a slit: implications for superresolution microscopy“ *Appl. Opt.* **25**, 1890 (1986).