

Entwicklung eines luftgekoppelten Ultraschall-Echo-Prüfverfahrens mittels fluidischer Anregung

Benjamin BÜHLING¹, Christoph STRANGFELD¹, Stefan MAACK¹

¹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

Kontakt E-Mail: benjamin.buehling@bam.de

Kurzfassung. In vielen technischen Bereichen werden Ultraschallverfahren zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung eingesetzt. Dabei wird ein Schallpuls von einem Prüfkopf in ein Prüfobjekt eingebracht. Der Puls kann unter anderem durch Membranen oder Piezoelemente erzeugt werden und wird in der Regel durch direkten Kontakt oder über ein Koppelmittel an das Objekt übertragen. Luftgekoppelter Ultraschall spielt in kommerziellen Anwendungen bisher eine untergeordnete Rolle, da die Differenz der akustischen Impedanzen von Luft und Festkörpern immense Verluste beim Übergang des Schallsignals hervorruft.

In diesem Beitrag soll ein neuartiges Anregungsprinzip vorgestellt werden, mit dem ein Großteil dieser Verluste vermieden wird. Anstelle eines Festkörpers soll mit Hilfe einer fluidischen Düse Druckluft zur Signalerzeugung eingesetzt werden. In dieser Düse wird eine selbsterhaltende Strömungsinstabilität erzeugt, die einen Schallpuls von bis zu 100 kHz hervorruft, sodass der Impedanzverlust in die Umgebungsluft entfällt. Da die charakteristische Frequenz eines fluidisch generierten Pulses maßgeblich von der Bauform der Düse und dem anliegenden Druck abhängt, lässt sich mittels einer geeigneten Strömungsregelung ein breiter Frequenzbereich zur Abtastung nutzen. Die so emittierten Pulse werden auf das Prüfobjekt gerichtet und die reflektierten Signale mit einem Laservibrometer an der Oberfläche des Objekts im Echo-Verfahren abgetastet. Von drei signalmindernden Materialübergängen bei gewöhnlichem luftgekoppeltem Ultraschall bleibt in dem hier vorgeschlagenen Messsystem lediglich die Grenzfläche von Luft zu Prüfkörper, sodass eine höhere Signalausbeute als bisher erwartet werden kann.

Einführung

Die Nutzung von Ultraschall zur Untersuchung unzugänglicher Strukturen wird bereits in vielen Bereichen der Diagnostik angewendet. Neben dem wohl bekanntesten Einsatzgebiet, der Medizin, werden Ultraschalluntersuchungen auch zur Untersuchung von Kompositwerkstoffen in der Luftfahrtindustrie, zur Untersuchung von Metallen und Kunststoffen in der Ölindustrie und in vielen weiteren technischen Bereichen genutzt. In den meisten dieser Gebiete werden dabei Schallfrequenzen im MHz-Bereich verwendet, da so eine hohe örtliche Auflösung gewährleistet werden kann. Da mit steigender Frequenz auch die Schalldämpfung steigt, verringern sich die erreichbaren Eindringtiefen des Signals in diesem Frequenzbe-



reich. Auch in der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen (ZfPBau) gehört die Ultraschallprüfung zu den Standardverfahren zur Untersuchung von Bauelementen (z. B. Dickenbestimmung) oder auch zur Detektion von Schäden (wie z. B. Risse oder Delaminationen). Da in Bauwerken häufig eine hohe Eindringtiefe benötigt wird und die Heterogenität des Betons die Signalstärke zusätzlich dämpft, werden Frequenzen bis 100 kHz genutzt. Zur Ultraschallsignalerzeugung werden in der Praxis meist trocken angekoppelte Prüfköpfe verwendet, da diese nach derzeitigem Stand der Technik im Vergleich zu gelgekoppelten Verfahren ein effizienteres Messen ermöglichen. Diese Prüfköpfe sind als Kompromiss anzusehen, da die Signalverluste bei der Einkopplung des Ultraschallpulses in den Baustoff relativ gering sind, aber die mögliche Abtastgeschwindigkeit deutlich erhöht ist, da die poröse Oberfläche das Aufbringen des Koppelmittels erschwert. Selbst mit derartigen Kontaktprüfköpfen ist es derzeit nicht möglich, Flächen von mehr als einigen Quadratmetern effizient zu untersuchen, da der Prüfkopf an jedem einzelnen Punkt des Messrasters angepresst werden muss. Eine wirtschaftliche Bearbeitung ganzer Bauwerke ist auf diese Weise schwer möglich. Eine Möglichkeit Ultraschall in der ZfPBau großflächig nutzen zu können, ist daher der Einsatz eines kontaktlosen, d. h. luftgekoppeltes Ultraschallverfahrens, bei dem der Prüfkopf lediglich planar über eine Oberfläche bewegt werden muss.

Die größte Herausforderung bei der luftgekoppelten Ultraschalluntersuchung, nahezu unabhängig vom überprüften Material, ist der hohe Intensitätsverlust beim Übergang des akustischen Signals von Festkörpern in die Luft und andersherum. Dieser entsteht durch Schallreflektion an den Stoffgrenzen, die abhängig vom Unterschied der Stoffdichten und Schallgeschwindigkeiten ist. Bei einem Luft-Beton-Übergang wird so mehr als 99,98% der Signalintensität reflektiert. Beim klassischen Messaufbau einer luftgekoppelten Ultraschalluntersuchung, bei der ein piezoelektrischer Wandler ein Signal sendet, der Puls in einen (homogenen) Probekörper ein- und wieder austritt und wieder von einem Wandler aufgenommen wird, gibt es vier dieser Stoffübergänge. Das Resultat ist ein Intensitätsverlust von 110 dB oder 99,9997% [1]. In der Entwicklung neuer luftgekoppelter Ultraschallverfahren wird folglich versucht, diese Verluste zu umgehen oder abzuschwächen. Beispielsweise wird versucht, Lamb-Wellen zur Charakterisierung von oberflächennahen Beschädigungen zu nutzen, da diese eine zehnmal höhere Signalamplitude aufweisen können als Longitudinalwellen. Dieses Verfahren wird bereits erfolgreich im Bereich der Kompositwerkstoffe eingesetzt [2, 3], ist jedoch auf Werkstoffdicken in der Größenordnung der Wellenlänge begrenzt [4]. Um tieferliegende Stahlelemente oder Hohlräume erkennen zu können, wie es in der ZfPBau nötig ist, ist es nötig, eine Möglichkeit zu finden, Longitudinal- und Transversalwellen zu nutzen. Grager et al. [5] verwenden optische statt der üblichen kapazitiven oder piezoelektrischen Mikrofone, um bei der Signalaufnahme einen der vier Materialübergänge zu vermeiden. In anderen Studien [1, 6] wird zusätzlich der Übergangsverlust vom Material zurück in die Luft vermieden, indem mit einem Laser-Doppler-Vibrometer die Auslenkung der Festkörperoberfläche selbst gemessen wird. Große Anstrengungen wurden darüber hinaus in die Erforschung neuartiger elektromechanischer Wandler investiert. Diese reichen von der Entwicklung von Dünnschicht-Wandlern über Methoden zur Fokussierung des akustischen Signals bis hin zur Kodierung des Pulses, wie Chimenti [7] nachzeichnet. Teilweise ist mit Ferroelectret-Wandlern eine bis zu 15 dB höhere Signalamplitude zu erreichen als mit herkömmlichen piezoelektrischen Wandlern [8]. So stark diese Entwicklungen die Signalamplitude im Festkörper auch erhöhen, bleiben immer die Verluste beim Signalübergang von Wandler zur Luft bestehen. Eine Ausnahme bilden thermoakustische Wandler, die mithilfe eines starken elektrischen Pulses einen Schallpuls erzeugen [8]. Die dafür benötigten Spannungen von mehreren Kilovolt sind allerdings für Messungen außerhalb eines kontrollierten Umfeldes gegenwärtig wenig geeignet.

Im Folgenden soll ein neuartiges Verfahren zur Schallanregung für die ZfPBau vorgestellt werden, das diesen Signalübergang ebenfalls vermeiden soll und so in Kombination

mit bereits existierenden Ansätzen die Signalverluste auf den einmalig unvermeidbaren Übergang von Luft zu Beton reduziert. Dafür soll der Ultraschallpuls mit einer Strömungsinstabilität durch die Luft selbst erzeugt werden. Diese Instabilität soll mit Hilfe einer speziellen Düse entstehen, an die Druckluft angelegt ist. Diese Düse basiert auf dem Wirkprinzip eines fluidischen Oszillators und wird im nachstehend genauer erläutert. Das Signal soll anschließend mit einem Laservibrometer abgetastet werden. Um die Annahmen zur Schallerzeugung qualitativ zu überprüfen, werden laserrefraktometrische Messungen an einer solchen fluidischen Düse durchgeführt und ausgewertet.

1. Konzept

Das hier vorgestellte Messkonzept ist Gegenstand laufender Forschung an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM). In diesem Rahmen soll das Prinzip der Nutzung einer fluidischen Düse zur Ultraschallerzeugung entwickelt sowie ein möglicher Messaufbau für Ultraschallmessungen skizziert werden.

1.1 Fluidische Oszillatoren

Fluidische Oszillatoren sind Düsen, in denen eine selbstangeregte Strömungsinstabilität einen oszillierenden Freistrahl mit konstanter Frequenz erzeugt. Dies geschieht ohne die Verwendung von beweglichen oder elektronischen Komponenten, was die Düsen widerstandsfähig gegen mechanische, elektrische und thermische Einwirkungen macht. In der Forschung werden fluidische Oszillatoren hauptsächlich im Bereich der Strömungskontrolle eingesetzt, wie Raghu [9] und Gregory und Tomac [10] zusammenfassend beschreiben, in der Anwendung auch in Reinigungssystemen [11].

Das Wirkprinzip soll exemplarisch an einem Oszillator mit zwei Rückkopplungskanälen, wie in Abb. 1 dargestellt, erklärt werden. Es sei darauf hingewiesen, dass auch an anderen Bauformen geforscht wird, genaueres kann Raghus [9] entnommen werden.

An den Einlass der Düse wird Druckluft angelegt, die sich in der Hauptkammer an eine der beiden Wände anlegt. Während der Hauptteil der Strömung die Düse am Auslass wieder verlässt, wird ein kleiner Teil über den nächstliegenden Rückkopplungskanal zurück in den Einlassbereich geleitet. Durch die Interaktion des rückgekoppelten Fluids mit der Hauptströmung löst sich die letztere von der Wand und legt sich an die gegenüberliegende an. Dieser Prozess wiederholt sich daraufhin, sodass ein stetig räumlich oszillierender Strahl die Düse verlässt. Innerhalb des durch den Auslass definierten Winkelbereichs oszilliert der

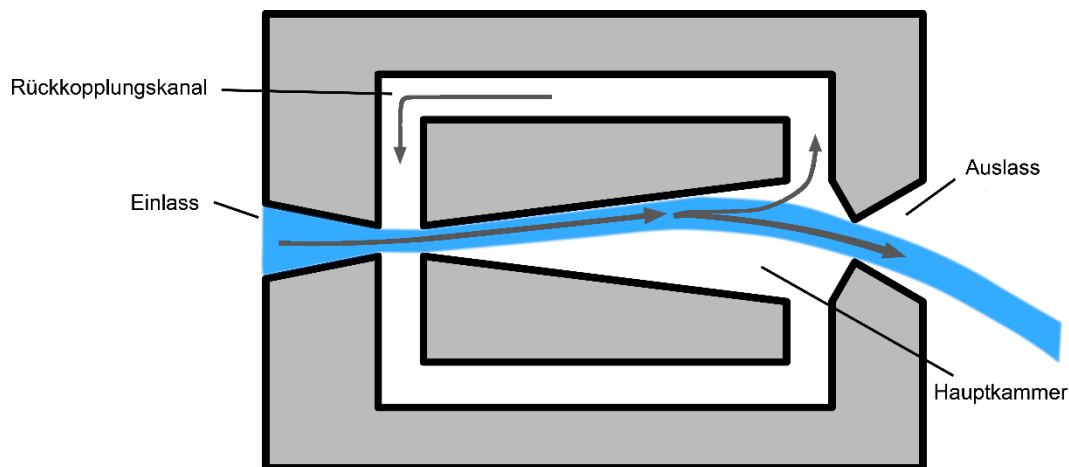


Abbildung 1. Schematische Darstellung eines fluidischen Oszillators. Ein qualitativer Schnappschuss des Verlaufs des Hauptmassenstroms ist blau dargestellt.

austretende Freistrahls sinusförmig. Bei einer gegebenen Düsengeometrie und inkompressibler Strömung ist die Frequenz der Oszillation dabei nahezu linear abhängig vom anliegenden Einlassdruck. Im kompressiblen Strömungsbereich nähert sie sich dann einem Maximum an [12]. Dieses wird maßgeblich von der Länge der Rückkopplungskopplungskanäle bestimmt [13]. Bisher sind Aktuationsfrequenzen von bis zu 20 kHz bekannt [9]. Durch Anpassung von Geometrie und Vordruck können jedoch theoretisch deutlich höhere Frequenzen erzeugt werden. Eine umfassende experimentelle Betrachtung der internen Dynamik eines fluidischen Oszillators kann der Arbeit von Bobusch et al. [14] entnommen werden, während Wozidlo et al. [15] eine ausführliche Analyse des resultierenden Freistrahls präsentieren.

1.2 Modifikation zur Ultraschallerzeugung zeitlich begrenzter Signale

Auf dem Gebiet der fluidischen Oszillatoren existieren Ansätze, den räumlich oszillierenden Freistrahls in einen gepulsten Freistrahls umzuwandeln [16]. Dazu wird die Auslassströmung mit einem Splitter aufgespalten, wie in Abb. 2 dargestellt. So wird der Massenstrom hinter jedem einzelnen Auslass pulsartig abgegeben und kann mit geeigneter Auslassgeometrie auch beliebig in den Raum gerichtet werden. Dabei wird der Splitter so ausgelegt, dass die Frequenz, mit der die oszillierende Strömung den gewünschten Auslasskanal überstreicht, der benötigten Ultraschallfrequenz entspricht. Die Frequenz der in Abb. 2 dargestellten gepulsten Strömung würde also der Oszillationsfrequenz entsprechen, und der Pulsabstand entspricht dann genau einer Pulsperiode. Der gewünschte Ultraschallpuls wird dann durch diesen gepulsten Freistrahls erzeugt. Vergleichbar mit der Auslenkung einer Membran regt der Ausstoß eines Freistrahls eine Schallwelle an, deren Amplitude lediglich durch Luftabsorption abnimmt. Die Impedanzverluste sind dabei sehr gering.

1.3 Messanordnung

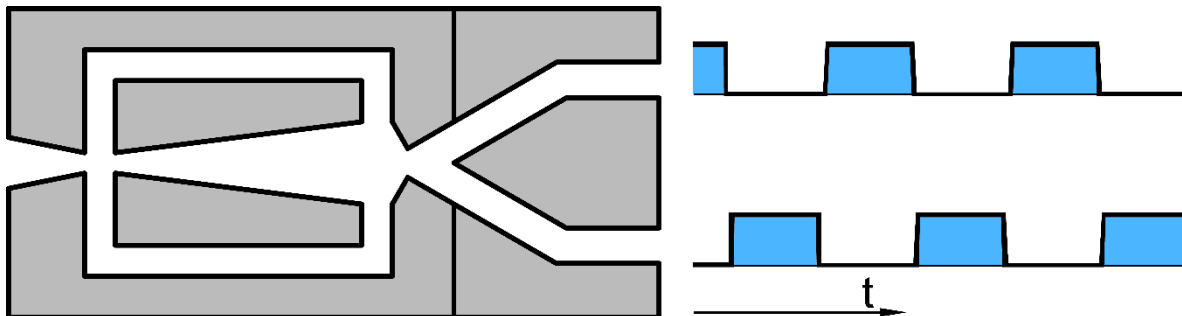


Abbildung 2. Schematische Darstellung der Umwandlung eines fluidischen Oszillators zu einer Pulsdüse. Die Signalverläufe an den Auslässen zeigen qualitativ den Zeitverlauf der Anregungspulse. Die Anregungsdauer ist als blaue Fläche dargestellt.

Ziel der laufenden Forschung soll es sein, ein funktionierendes Messsystem zur Charakterisierung von Bauwerken zu entwickeln, das auf Grund seines Messprinzips mit wesentlich geringeren Signalverlusten arbeitet als bisherige Systeme. Dieses ist angelehnt an das Konzept von Strangfeld und Maack [17] und soll im Folgenden skizziert werden. Um Ultraschallpulse in einen Probekörper einzubringen, soll die fluidische Düse mit einem gleichbleibenden Abstand über dessen Oberfläche geführt werden. Zur Abtastung soll ein Kurzwellen-Infrarot (SWIR) Laser-Doppler-Vibrometer (LDV) zur verlust- und rückkopplungsfreien Signalaufnahme verwendet werden. Neben der Möglichkeit direkt die Auslenkungsgeschwindigkeit der Objektoberfläche zu messen, bietet es gegenüber Helium-Neon (HeNe) Lasern den Vorteil, dass auch bei schlecht reflektierenden Oberflächen wie Beton eine hohe Signalstärke auch ohne den Einsatz von Reflektorfolie erreichbar ist. Die Kombination von Pulsdüse und LDV ermöglicht im Labor aber auch in ZfPBau-Anwendung an realen Bauwerken sowohl

Transmissions- als auch Echo-Messungen. Dabei wäre zur flächigen Abtastung eines Messrasters lediglich ein Spiegelsystem notwendig. Für die Stromversorgung während eines mehrstündigen Betriebs eines SWIR-LDV genügt ein externes Akkupack. Da aufgrund der geringen Dimensionen für den Betrieb der Pulsdüse nur ein geringer Massenstrom notwendig ist, soll es außerdem möglich sein, diese über mehrere Stunden mit einem tragbaren Druckluftbehälter zu betreiben.

2. Messungen zur Verifikation der Pulsdüsenfunktion

Um in einem ersten Schritt die Funktion einer gepulsten fluidischen Düse zu verifizieren und die Druckfluktuation zu charakterisieren, wurden Messungen entlang der Strömungsrichtung des Massestroms, beginnend am Düsenauslass, durchgeführt. Diese werden nachstehend vorgestellt und diskutiert.

2.1 Messaufbau

Die oben beschriebene Düse wurde von der FDX Fluid Dynamix GmbH (Berlin) ausgelegt und an der BAM gefertigt. Die Düse hat einen Auslassquerschnitt von 4 mm^2 und ist in Abb. 3a im Schnitt dargestellt.

Zur Validierung der Funktionsfähigkeit der Düse wurden nach dem Prinzip der Refraktovibrometrie [18] die Druckschwankungen entlang der Strahlachse der Pulsdüse qualitativ gemessen. Der Messaufbau ist in Abb. 3b skizziert. Bei der Refraktovibrometrie wird im Gegensatz zur klassischen Vibrometrie nicht die Auslenkungsgeschwindigkeit einer Oberfläche gemessen, sondern die Schwankung der Dichte eines transparenten Mediums. Wird der Strahl eines LDV von einer starren Oberfläche reflektiert, so kann eine Druckschwankung, die den Strahl passiert, gemessen werden. Diese Druckschwankung, etwa durch eine akustische Welle hervorgerufen, bewirkt eine lokale Änderung des Brechungsindex im umgebenden Medium. Die Weglänge L des Laserstrahls zwischen Laserkopf A und Oberfläche B kann mit

$$L = \int_A^B n(t, x, y, z) dl$$

beschrieben werden, wobei n der räumlich und zeitlich variable Brechungsindex ist. Unter Beachtung des piezo-optischen Koeffizienten $\partial n / \partial p$ als Zusammenhang zwischen Brechungsindex und Druck p sowie der Tatsache, dass der Strahl den Messbereich zweimal passieren muss, ergibt sich an einem konstanten Messpunkt mit

$$u_n(t) = 2 \left(\frac{\partial n}{\partial p} \right) \int_V^O \frac{d}{dt} (\Delta p(t)) dl$$

eine lineare Abhängigkeit von der gemessenen scheinbaren Geschwindigkeit u_n zur zeitlichen Ableitung der integralen Druckänderung über den Strahlverlauf.

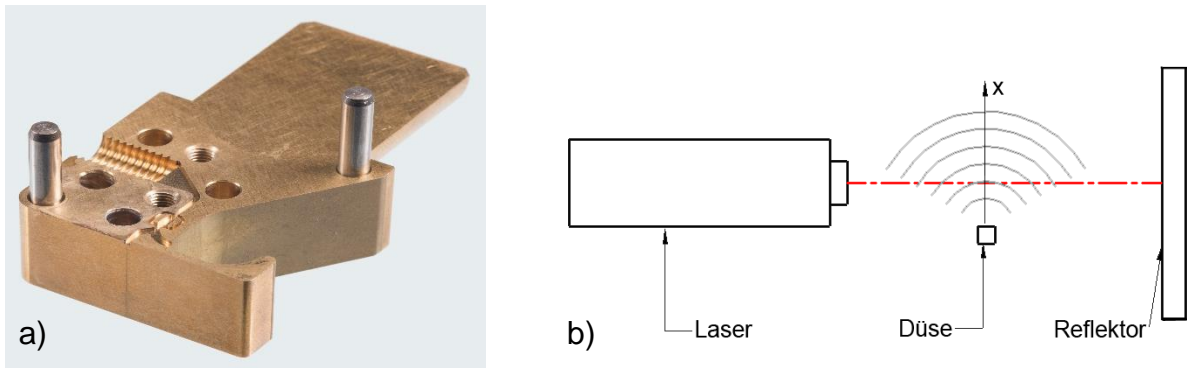


Abbildung 3. Von der BAM gefertigte Pulsdüse (a) und refraktovibrometrischer Messaufbau (b).

In den durchgeführten Messungen wurde die Düse bei einem Einlassdruck von 2 bar betrieben und entlang der Strahlachse x relativ zum Laser verschoben. Jeder Messpunkt wurde über einen Zeitraum von 2 Sekunden mit einer Frequenz von 1 MHz abgetastet. Zur Messung wurde ein OptoMET Nova LDV mit einem Geschwindigkeitsbereich von $\pm 122,5$ mm/s und 32 Bit Dynamikbereich verwendet.

2.2 Ergebnisse und Diskussion

Das Frequenzspektrum des gemessenen Signals bei einem Abstand von $x = 500$ mm vom Düsenauslass ist in Abb. 4 dargestellt. Deutliche Peaks nahe 5 Hz, nahe 11 kHz sowie bei weiteren höheren Harmonischen sind zu erkennen. Während die dominanten Frequenzen im kHz-Bereich auf die Anregung durch die Düse zurückzuführen sind, wird die Ursache des niederfrequenten Peaks bei ca. 5 Hz durch Störungen in der Messumgebung, wie etwa Gebäudeschwingungen oder Vibrationen in der Nähe des Messortes, hervorgerufen. Die Leistungsdichte der harmonischen Frequenz bei 11 kHz ist dabei zwei Größenordnungen über der ihrer Höherharmonischen bei 22 kHz und sogar 3 Größenordnungen über dem hochfrequenten Rauschen. Um die niederfrequenten Störungen und hochfrequentes Rauschen außerhalb der dominanten Frequenzen zu entfernen, wurde das Signal zwischen 500 Hz und 50 kHz bandpassgefiltert.

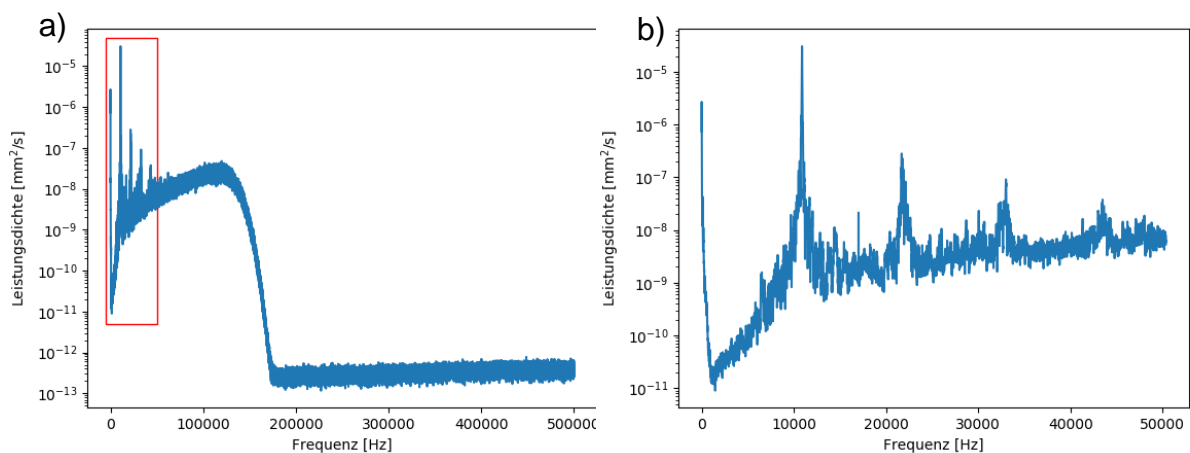


Abbildung 4. Leistungsdichtespektrum bei $x = 500$ mm des ungefilterten Messsignals (a) und Vergrößerung des rot markierten Bereichs (b).

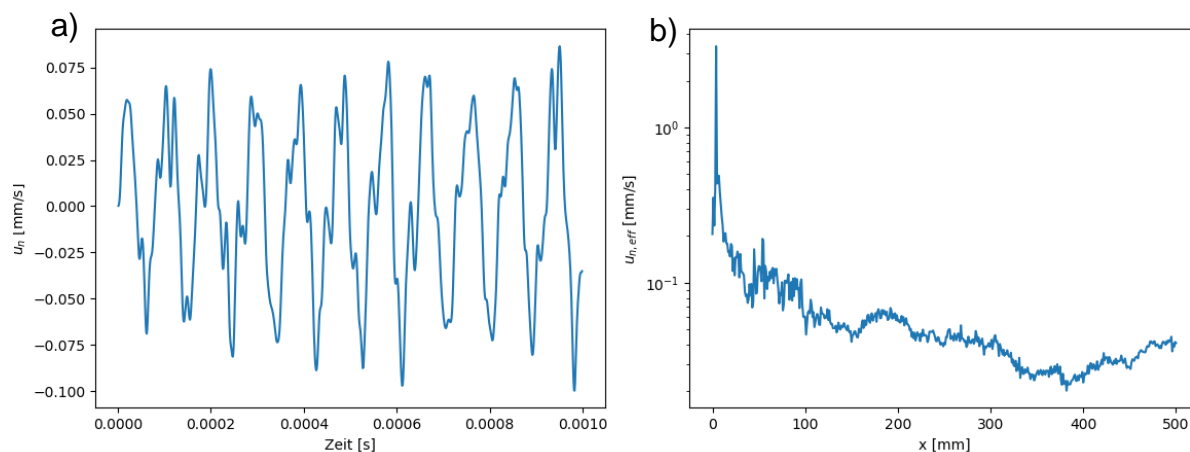


Abbildung 5. Bandpassgefiltertes Messsignal (a) und Effektivwert der scheinbaren Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Entfernung zum Auslass (b).

Abb. 5a zeigt einen Ausschnitt aus dem gefilterten Signal an derselben Messposition. Die Periodizität des Signals ist deutlich erkennbar, ebenso die von höheren Harmonischen verursachten Schwankungen, die das gepulste Grundsignal überlagern.

Um die Stärke dieser Fluktuation und damit ein Maß für die Druckschwankungen zu ermitteln, wurde an jedem Messpunkt der Effektivwert des gefilterten Signals gebildet. Der Verlauf der Effektivwerte in Abhängigkeit von der Entfernung zum Düsenauslass ist in Abb. 5b dargestellt. Die maximale effektive scheinbare Geschwindigkeit wurde mit $u_n = 3,33$ mm/s im Bereich direkt hinter dem Auslass bei $x = 3$ mm gemessen. Diese starke Oszillation resultiert aus einer Überlagerung der Druckschwankungen in der Strömung selbst und dem resultierenden akustischen Signal. Mit steigendem Abstand sinkt der Effektivwert stark bis auf ein Minimum von $u_n = 0,2$ mm/s bei $x = 38$ mm. Der sinkende Verlauf ist dabei unstetig, sodass bei $x = 500$ mm eine Geschwindigkeit von $u_n = 0,4$ mm/s gemessen werden konnte. Trotz dieser Schwankungen kann ein klarer Abwärtstrend beobachtet werden. Dieser Verlauf entspricht im Allgemeinen den zu erwartenden Ergebnissen, da mit steigendem Abstand zum Auslass sowohl der Einfluss der Dichteschwankungen durch die Strömung sinkt als auch die akustische Welle durch deren räumliche Ausbreitung an Intensität verliert.

3. Fazit und Ausblick

Der Ansatz für die Entwicklung eines neuartigen Verfahrens zur Ultraschallerzeugung für die ZfPBau wurde vorgestellt und in ersten Schritten überprüft. Schallpulse wurden durch einen modifizierten fluidischen Oszillator angeregt und mit einem SWIR-LDV abgetastet. Aus den hier präsentierten Verfahren ergeben sich insbesondere für die ZfPBau eine Reihe von Vorteilen:

- Potentiell geringere Signalverluste, da der akustische Puls nur eine Stoffgrenze passieren muss;
- hohe Variabilität durch luftgekoppelte Schallanregung;
- Robustheit gegenüber thermischen, mechanischen und elektromagnetischen Einflüssen, die besonders bei Messungen an Bauwerken erforderlich ist;
- exakte, resonanzfreie und verlustarme Signalaufnahme an Beton durch das SWIR-LDV, sodass keine Reflektoren am Bauwerk angebracht werden müssen

- Geringer Energiebedarf, da für die Schallerzeugung lediglich ein Druckluftbehälter und für das LDV ein Akku mitgeführt werden muss.

Um das Funktionieren des Konzepts zur Schallerzeugung zu verifizieren, wurde eine erste fluidische Düse entwickelt, die kontinuierlich mit etwa 11 kHz Pulse erzeugt. Messungen an dieser Düse bestätigen, dass die erwarteten Pulse erzeugt werden können. Dabei sinkt die Signalstärke mit zunehmendem Abstand zum Düsenaustritt.

Im nächsten Schritt sollen weitere Düsen im Ultraschallbereich entwickelt werden, sowie über das Splitterkonzept hinausgehende Umwandlungsmethoden der räumlichen in eine zeitliche Oszillation erprobt werden. Weiterhin sollen Transmissions- sowie Echo-Messungen an Betonprobekörpern durchgeführt werden, um das Messprinzip zu verifizieren und mit herkömmlichen luftgekoppelten Ultraschallmethoden vergleichen zu können.

Referenzen

- [1] B. Gräfe, "Luftgekoppeltes Ultraschallecho-Verfahren für Betonbauteile," Technische Universität Berlin, 2008.
- [2] M. Gaal, F. Schadow, D. Nielow und V. Trappe, "Prüfung von Rotorblattschalen mit Luftultraschall," in *Tagungsband der DGZfP-Jahrestagung 2018*, 2018.
- [3] W. Hillger, L. Bühling und D. Ilse, "Air-coupled ultrasonic testing-method, system and practical applications," in *11th European Conference on Non-destructive Testing*, 2014.
- [4] Z. Su und L. Ye, "Fundamentals and Analysis of Lamb Waves," *Identification of Damage Using Lamb Waves: From Fundamentals to Applications*, S. 15-58, London: Springer London, 2009.
- [5] J. C. Grager, D. Kotschate, J. Gamper, M. Gaal, K. Pinkert, H. Mooshofer, M. Goldammer und C. U. Grosse, "Advances in air-coupled ultrasonic testing combining an optical microphone with novel transmitter concepts," in *12th European conference on Non-Destructive Testing*, 2018.
- [6] S. Maack, "Untersuchungen zum Schallfeld niederfrequenter Ultraschallprüfköpfe für die Anwendung im Bauwesen," Technische Universität Berlin, 2012.
- [7] D. E. Chimenti, "Review of air-coupled ultrasonic materials characterization," *Ultrasonics*, 54 (7), 2014.
- [8] M. Gaal und D. Kotschate, "New technologies for air-coupled ultrasonic transducers," in *12th European Conference of Non-Destructive Testing*, 2018.
- [9] S. Raghu, "Fluidic oscillators for flow control," *Experiments in Fluids*, 54 (2), 2013.
- [10] J. Gregory und M. N. Tomac, "A Review of Fluidic Oscillator Development," in *43rd Fluid Dynamics Conference*, 2013.
- [11] B. Bobusch, O. Krueger, J. Wintering und O. Kruger, *Fluidic component used in fluid distribution device e.g. dishwasher, has main structure whose curved portion is designed to deflect direction of flow of fluid stream in region of outlet opening*, DE102016208344-A1; WO2017194525-A1, Anmelder Technische Universität Berlin.
- [12] F. von Gosen, F. Ostermann, R. Woszidlo, C. Nayeri und C. O. Paschereit, "Experimental Investigation of Compressibility Effects in a Fluidic Oscillator," in *53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2015.
- [13] H.-J. Schmidt, R. Woszidlo, C. Nayeri und C. O. Paschereit, "Fluidic oscillators for bluff body drag reduction in water," in *54th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2016.
- [14] B. C. Bobusch, R. Woszidlo, J. M. Bergada, C. N. Nayeri und C. O. Paschereit, "Experimental study of the internal flow structures inside a fluidic oscillator," *Experiments in Fluids*, 54 (6), 2013.
- [15] R. Woszidlo, F. Ostermann, C. N. Nayeri und C. O. Paschereit, "The time-resolved natural flow field of a fluidic oscillator," *Experiments in Fluids*, 56 (6), 2015.
- [16] C. Cerretelli und E. Gharaiabah, "An experimental and numerical investigation on fluidic oscillators for flow control," in *37th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit*, 2007.
- [17] C. Strangfeld und S. Maack, *Ultrasound test method for investigation of sample in medical technology, involves exciting mechanical deformation propagating in sample by fluidic oscillator, determining characteristic of deformation, and generating excitation signal*, DE102016120454-A1; WO2018077759-A1, Anmelder Bundesrepublik Deutschland.
- [18] L. Zipser, "Refraktovibrometrie zur Messung und Visualisierung akustischer Pänomene in transparenten Medien," in *34. Deutsche Jahrestagung für Akustik*, 2008.