

Modellbasierte und experimentelle Charakterisierung von intensiven Ultraschall-Stehwellenfeldern für die Zerstäubung hochviskoser Flüssigkeiten

Paul Dunst¹, Tobias Hemsel¹, Peter Bornmann², Walter Littmann², Walter Sextro¹

¹ Universität Paderborn, Dynamik und Mechatronik, 33100 Paderborn, E-Mail: paul.dunst@uni-paderborn.de

² ATHENA Technologie Beratung GmbH, 33100 Paderborn

Einleitung

Für die Zerstäubung hochviskoser Flüssigkeiten werden neben Düsenzerstäubern vor allem Ultraschall-Stehwellenzerstäuber angewendet [1]. Diese ermöglichen ohne weitere Maßnahmen zwar keine gerichtete Zerstäubung, benötigen jedoch im Gegensatz zu Düsenzerstäubern keine hohen Drücke und haben keine hohen Austrittsgeschwindigkeiten.

Zur Erzeugung der Ultraschallwellen werden typischerweise piezoelektrische, mit Bolzen verschraubte Langevin-Wandler verwendet [1-4], die eine starke Schallabstrahlung bei einer elektrischen Eingangsleistung von bis zu einigen Kilowatt erzeugen können.

Wie bei jedem anderen schwingenden System emittiert der Ultraschallwandler zunächst eine Wanderwelle. Mit einem Reflektor, der gegenüber der Sonotrode angeordnet ist, wird eine stehende Welle erzeugt. Im Resonanzabstand zwischen Reflektor und Wandler werden abgestrahlte und reflektierte Wellen so überlagert, dass höhere Schalldruckamplituden erzielt werden.

Ein einfacher Ansatz zur Maximierung des Schallpegels im Stehwellenfeld ist die Erhöhung der Schwingungsamplituden des Wandlers, die jedoch zu Schäden oder zumindest zu einer Verringerung der Lebensdauer führen kann. Hohe Schalldrücke werden auch bei geringen Abständen zwischen Wandler und Reflektor erreicht. Das Volumen des Schallfeldes ist in diesem Fall jedoch für die meisten Prozesse zu klein. Ein weiterer Ansatz ist die Verwendung zweier entgegengesetzt angeordneter Wandler [5]. In diesem Fall erfordert jedoch die Erzeugung einer stehenden Welle eine genaue Abstimmung von Frequenz und Phase beider Wandler, was eine komplexe Steuerung erfordert. Ebenso ist es möglich, geometrische Randbedingungen des Stehwellensystems zu optimieren, sodass es zu optimaler Interferenz der Wellen kommt.

Im Folgenden wird der Anschaulichkeit halber vereinfachend angenommen, dass der Wandler an seiner Sonotrodenoberfläche einzelne Schallstrahlen aussendet, die in Nähe des Wandlers nahezu parallel verlaufen und sich mit zunehmender Entfernung vom Wandler auffächern. Ein einfaches Stehwellensystem, bestehend aus ebener Sonotrode und ebenem Reflektor, erzeugt bei kleinem Abstand zwischen Sonotrode und Reflektor sehr hohe Schallpegel, da nahezu sämtliche ausgesandten Schallstrahlen in Richtung der Sonotrode reflektiert werden positive Interferenz entsteht. Erhöht man jedoch den Abstand zwischen Sonotrode und Reflektor, so nehmen die

Verluste durch Schallstrahlen, die den Prozessraum verlassen, zu. Wie Abbildung 1 gezeigt, werden nur Schallstrahlen, die in etwa parallel zur Rotationsachse verlaufen, zum Wandler zurück reflektiert und tragen zum Stehwellenfeld bei.

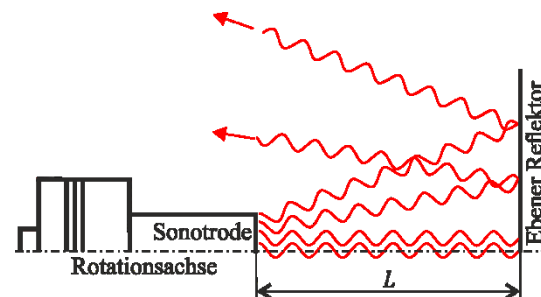


Abbildung 1: Stehwellensystem mit ebenem Reflektor

Die Strahlen haben zudem abhängig vom Abstrahlwinkel unterschiedliche Weglängen. Die Stehwellenbedingung ist demnach nur für Strahlen in der Nähe der Rotationsachse exakt erfüllt. Um dies zu vermeiden, müssen die Geometrien von Wandler und Reflektor optimiert werden.

In den folgenden Abschnitten wird zunächst ein Optimierungsansatz vorgestellt. Mithilfe eines Finite-Elemente-Modells werden die Auswirkungen einer optimierten Geometrie auf den maximalen Schalldruckpegel untersucht. Ergebnisse werden durch Messungen an einem experimentellen Aufbau eines Stehwellensystems validiert. Es wird gezeigt, wie sich die Optimierung der geometrischen Randbedingungen auf die Zerstäubung hochviskoser Flüssigkeiten auswirkt.

Modellbasierte Optimierung

Um maximale Schalldrücke allein durch die Optimierung der geometrischen Randbedingungen des Schallfeldes zu erzielen, muss sichergestellt werden, dass die Stehwellenbedingung für alle Schallstrahlen erfüllt ist. Weiterhin ist darauf zu achten, dass möglichst keine Schallstrahlen den Prozessraum zwischen Sonotrode und Reflektor verlassen.

Abbildung 2 zeigt einen Ansatz eines verbesserten Stehwellensystems mit konkavem Reflektor. Unter der Annahme, dass die Sonotrode eine ideale Punktquelle darstellt, werden alle Strahlen zur Sonotrode reflektiert und legen gleiche Weglängen zurück, wenn der Radius R des konkaven Reflektors dem Abstand L von Sonotrode und Reflektor entspricht.

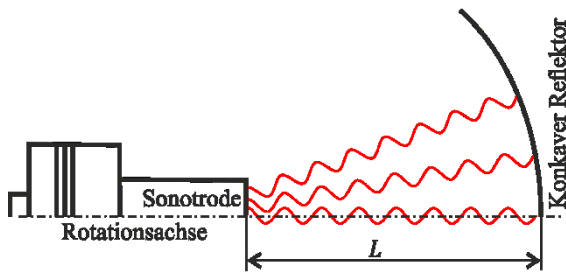


Abbildung 2: Ebene Sonotrode mit konkavem Reflektor als Ansatz für die Schallfeldoptimierung

Für die modellbasierte Optimierung der geometrischen Randbedingungen des Stehwellensystems wurde ein Finite-Elemente-Modell (Ansys 18.1 mit Acoustics ACT) aufgebaut. Um die Komplexität des Modells zu reduzieren, wurde nur eine Ebene des axialsymmetrischen Schallfelds modelliert. Sonotrode und Reflektor werden vereinfacht durch Randbedingungen implementiert. Abbildung 3 zeigt das FE-Modell des Stehwellensystems.

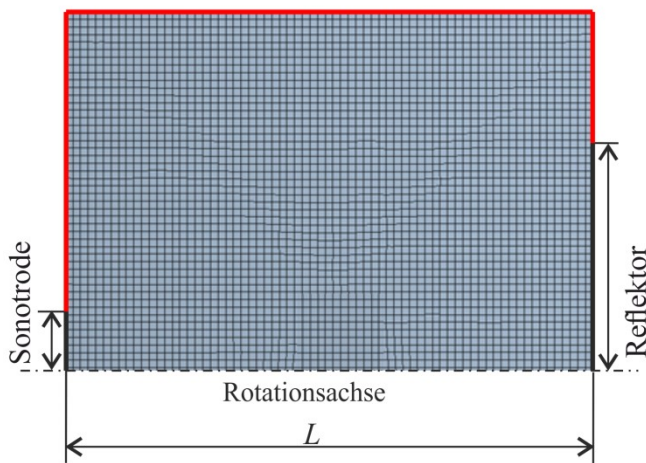


Abbildung 3: Zweidimensionales Finite-Elemente-Modell des Stehwellensystems

Die Abmessungen des Modells wurden an ein reales Stehwellensystem angepasst. Die Sonotrode mit einem Durchmesser von 30 mm wird idealisiert als Grenzfläche mit einer harmonischen Schwingung bei einer Frequenz von $f = 21,4 \text{ kHz}$ und einer Schwingungsamplitude von $\hat{v} = 2,55 \text{ m/s}$ modelliert. Ein Reflektor mit einem Durchmesser von 85 mm ist in einem Abstand L von der Sonotrodenfläche angeordnet. Da die Wellenlänge in Luft bei der Betriebsfrequenz von 21,4 kHz etwa 16 mm beträgt, wurde eine Elementgröße von 1 mm gewählt. Die Schallausbreitung wird linear modelliert. Schallabsorptionseffekte in Luft werden nicht berücksichtigt.

Der Reflektionskoeffizient

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \quad (1)$$

mit den akustischen Impedanzen Z_1 und Z_2 der beiden Medien an der Grenzfläche (Dichte ρ , Schallschnelle v) ist jeweils gleich eins für die Grenzen von Wandler und Reflektor zum Schallfeld, d. h. die Schallwellen werden total re-

flektiert. Alle anderen Grenzflächen (rot markiert) haben einen Reflektionskoeffizienten von Null und dämpfen daher die Schallwellen vollständig, um einen unendlich ausgedehnten Raum zu simulieren.

Das Simulationsergebnis des Modells ist der Schalldruckpegel an jedem Punkt in der rotationssymmetrischen Ebene. Der Schalldruckpegel

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{p_{rms}}{p_0} \right) \quad (2)$$

wird aus dem RMS-Wert des Schalldrucks p_{rms} und dem Referenzschalldruck $p_0 = 20 \mu Pa$ berechnet.

Abbildung 4 zeigt den jeweils maximalen Schalldruckpegel L_p im Schallfeld bei ebenem und konkavem Reflektor über den Abstand L zwischen Sonotrode und Reflektor. Dieser maximale Schalldruckpegel tritt bedingt durch die Änderung des Abstands L an verschiedenen Positionen des Schallfelds auf.

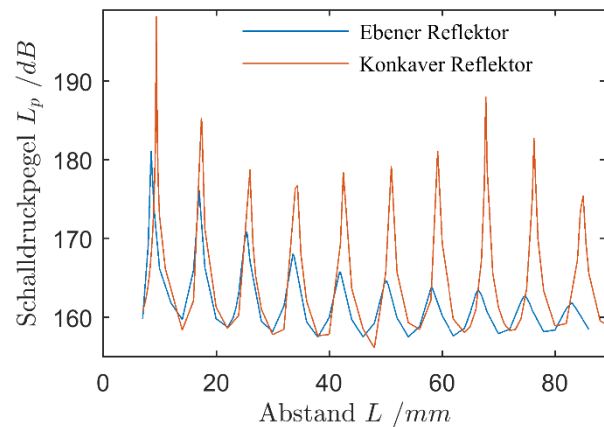


Abbildung 4: Schalldruckpegel über Abstand L von Sonotrode und ebenem bzw. konkavem Reflektor ($R = 72 \text{ mm}$, $f = 21,4 \text{ kHz}$, $\hat{v} = 2,55 \text{ m/s}$)

Sowohl beim Stehwellensystem mit ebenem als auch mit konkavem Reflektor treten lokale Maxima des Schalldruckpegels in Abständen von Vielfachen der halben Wellenlänge auf. Ein maximaler Schalldruckpegel wird beim Stehwellensystem mit ebenem Reflektor bei einem Abstand L von ca. 8 mm erreicht, was der halben Wellenlänge der Schallwelle entspricht. Mit zunehmendem Abstand L sinken die Schalldruckpegel in den lokalen Maxima drastisch aufgrund der zuvor beschriebenen Effekte. Im Gegensatz dazu treten bei dem Stehwellensystem mit konkavem Reflektor weit höhere Schalldruckpegel in allen lokalen Maxima auf. Zudem fällt der maximale Schalldruckpegel nicht stetig bei größerem Abstand L sondern erreicht ein zweites Optimum bei einem Abstand L von ca. 68 mm, was ungefähr dem Radius des konkaven Reflektors entspricht. Die Sonotrode darf offenbar nicht wie oben beschrieben als ideale Punktquelle angesehen werden, da dieses Ergebnis nicht zum theoretischen Ansatz von $R = L$ passt. Der bei diesem Abstand erzielte maximale Schalldruckpegel beträgt 188 dB.

Experimentelle Validierung

Der in Abbildung 5 gezeigte Versuchsaufbau dient der Validierung der Ergebnisse der modellbasierten Optimierung. Er besteht aus einem Ultraschallwandler, der wie im Modell bei einer Frequenz von $f = 21,4 \text{ kHz}$ mit einer Amplitude von $\hat{v} = 2,55 \text{ m/s}$ betrieben wird. Der Ultraschallwandler ist auf einer Linearführung montiert, um den Abstand zum Reflektor ($R = 72 \text{ mm}$) stufenlos einstellen zu können.

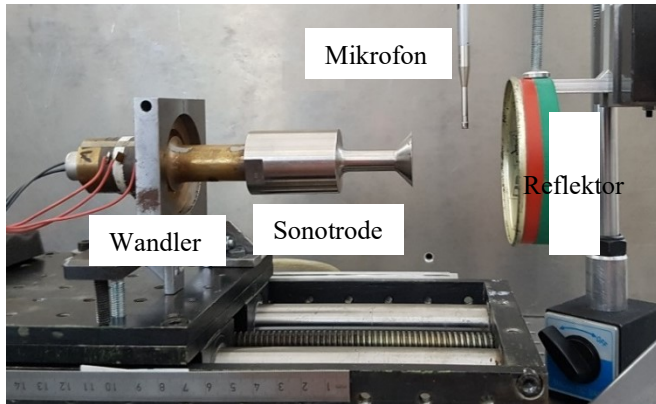


Abbildung 5: Experimenteller Aufbau des Ultraschall-Stehwellensystems mit konkavem Reflektor und Mikrofon

Um die Schalldruckverteilung im gesamten Prozessraum zu ermitteln, wurde die sogenannte „Refrakto-Vibrometrie“ unter Verwendung eines Scanning-Laser-Doppler-Vibrometers (SLDV, Polytec PSV 500) eingesetzt. Der Brechungsindex eines transparenten Mediums hängt von der Dichte des Materials und damit auch vom Schalldruck im Medium ab. Obwohl dieser Effekt in den meisten Fällen sehr klein und vernachlässigbar ist, kann er insbesondere bei extremen Schalldruckamplituden zur Visualisierung von Schallfeldern genutzt werden [6-7]. Die vom SLDV gemessene virtuelle Geschwindigkeit entspricht, abgesehen von einem Skalierungsfaktor, dem mittleren Schalldruck entlang des Laserstrahls, der das Schallfeld orthogonal zur Richtung der Schallwellenausbreitung durchschneidet und an der Wand hinter dem Stehwellensystem reflektiert wird.

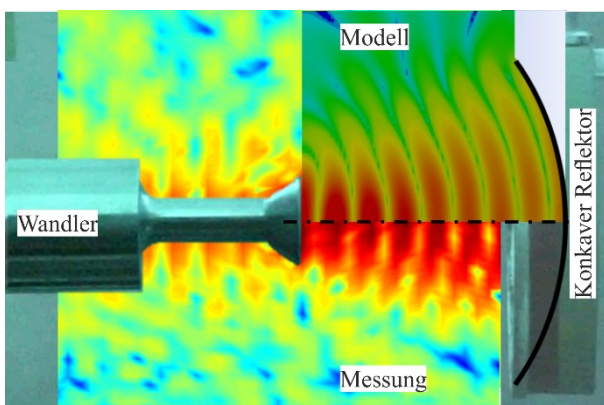


Abbildung 6: Simulierte Schallpegelverteilung im Vergleich zur gemessenen Verteilung der virtuellen Geschwindigkeit für das Stehwellensystem mit konkavem Reflektor ($R = 72 \text{ mm}$, $L = 68 \text{ mm}$, $f = 21,4 \text{ kHz}$, $\hat{v} = 2,55 \text{ m/s}$)

Abbildung 6 zeigt die mit dem Modell berechnete Schallpegelverteilung im Vergleich zur gemessenen virtuellen Geschwindigkeitsverteilung für das Stehwellensystem mit konkavem Reflektor bei einem Abstand von $L = 68 \text{ mm}$. Der Vergleich der Ergebnisse von Modell und Messung zeigt qualitativ eine gute Übereinstimmung.

Um das Schallfeld mit geringem Aufwand quantitativ beurteilen zu können, wurde zusätzlich zur SLDV-Messung der Schalldruck an einzelnen Stellen im Schallfeld mit einem Mikrofon (Brüel & Kjaer, Typ 4138) gemessen, ein Skalierungsfaktor zwischen virtueller Geschwindigkeit und Schalldruckpegel bestimmt und der Schalldruckpegel für die gesamte SLDV-Messung berechnet. Abbildung 7 zeigt die Schalldruckpegel im Schallfeld des Stehwellensystems mit konkavem Reflektor nach der Skalierung.

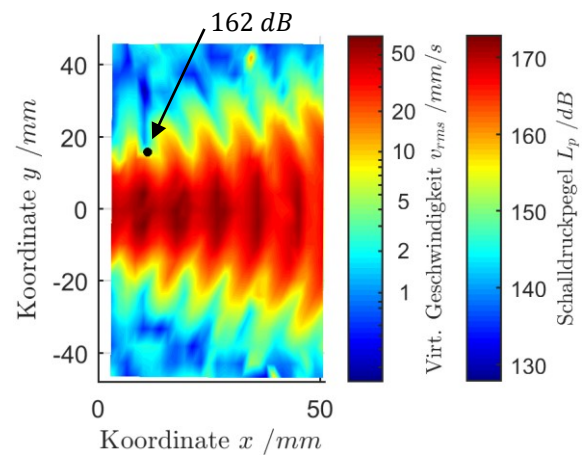


Abbildung 7: Schalldruckpegel im Stehwellensystem mit konkavem Reflektor bei Abstand $L = 68 \text{ mm}$

Im Vergleich zum Modellergebnis ($L_p = 188 \text{ dB}$) wurde im Experiment ein deutlich geringerer maximaler Schalldruckpegel erzielt ($L_p = 173 \text{ dB}$). Diese Abweichung ist auf Nichtlinearitäten (z. B. Wellenaufsteilung) zurückzuführen, die im Modell nicht berücksichtigt werden [8]. In Bereichen mit kleineren Schalldruckpegeln ist die Übereinstimmung zwischen Modell und Messung hinreichend gut.

Die Schallpegelverteilung wird durch die Nichtlinearitäten nicht wesentlich beeinflusst. Das lineare Modell ist daher für die Optimierung der geometrischen Randbedingungen gut geeignet.

Zerstäubung von hochviskosen Flüssigkeiten

Um die Auswirkung der geometrischen Schallfeldoptimierung auf die Zerstäubung hochviskoser Flüssigkeiten zu veranschaulichen, wurde dem Stehwellensystem 15 mm oberhalb des zweiten Schwingungsknotens (gezählt ab Sonotrode) bei Raumtemperatur (20° C) reines Glycerin (Viskosität $\eta = 1480 \text{ mPas}$) über ein Rohr mit 1 mm Innendurchmesser zugeführt.

Das Stehwellensystem mit ebenem Reflektor ($L = 66 \text{ mm}$) erreicht bei einer Anregungsamplitude von $\hat{v} = 5 \text{ m/s}$ einen maximalen Schalldruckpegel von 170 dB . Das Glycerin bildet einen Flüssigkeitsfaden, der stark verformt wird und es lösen sich wenige Tropfen ab (siehe Abbildung 8a). Jedoch wird der Flüssigkeitsfaden aufgrund des hohen Wan-

derwellenanteils stark in die Richtung des Reflektors und somit aus dem Schwingungsknoten verdrängt.

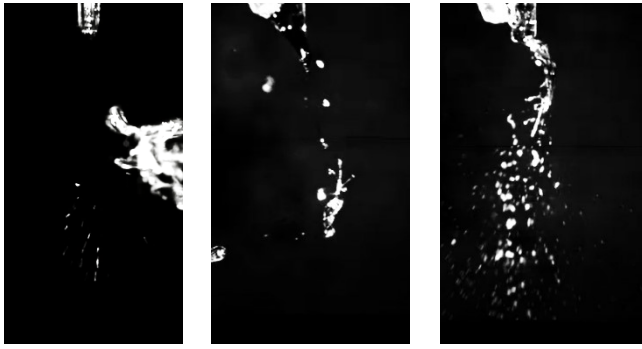


Abbildung 8: Standbilder der Zerstäubung von Glycerin in einem Stehwellenfeld mit a) ebenem Reflektor bei Anregungsamplitude von 5 m/s und mit konkavem Reflektor bei Anregungsamplituden von b) 0,5 m/s und c) 1 m/s

Bei Einsatz eines konkaven Reflektors wird bereits bei einer Anregungsamplitude von nur $\hat{v} = 0,5 \text{ m/s}$ ein maximaler Schalldruckpegel von 171 dB erreicht. Das zugeführte Glycerin verbleibt in der Ebene des Schalldruckknotens und wird daher bereits zu einem großen Teil zerstäubt (siehe Abbildung 8b). Bei Erhöhung der Anregungsamplitude auf $\hat{v} = 1 \text{ m/s}$, wird das gesamte zugeführte Glycerin zerstäubt (siehe Abbildung 8c). Eine weitere Erhöhung der Anregungsamplitude ist möglich und würde feinere Tröpfchen erzeugen oder einen größeren Flüssigkeitsstrom ermöglichen.

Fazit und Ausblick

Es wurde gezeigt, dass der maximale Schalldruckpegel in Stehwellensystemen durch Geometrieoptimierungen erhöht werden kann. Ein lineares Finite-Elemente-Modell wurde verwendet, um eine modellbasierte Optimierung eines Stehwellensystems durchzuführen. Die Validierung mit Messungen an einem Versuchsaufbau, bestehend aus einem piezoelektrischen Ultraschallwandler mit Sonotrode und einem konkaven Reflektor zeigte eine gute Übereinstimmung der Schallpegelverteilung. Es wurde jedoch festgestellt, dass die bei hohen Schalldruckpegeln auftretenden nichtlinearen Effekte zu höheren Abweichungen des absoluten Schalldruckpegels in den Schallpegelmaxima des Modells führten. Dennoch wird Schallpegelverteilung durch das Modell qualitativ sehr gut abgebildet. Dies ermöglicht eine Optimierung der geometrischen Randbedingungen (wie Reflektorform und Abstand) des Schallfeldes.

Die höchsten Schalldruckpegel können erreicht werden, wenn der Abstand zwischen dem Wandler und dem Reflektor auf ein Minimum von einer halben Wellenlänge eingestellt ist, unabhängig davon, welcher Reflektor verwendet wird. Bei größeren Entfernungen empfiehlt es sich, einen konkaven Reflektor zu verwenden, so dass ein zweites Optimum bei einem Abstand von $L \approx R$ entsteht. Laut Messungen war eine Erhöhung des Schalldrucks um mehr als das 10-fache durch die Verwendung eines konkaven Reflektors anstelle eines ebenen Reflektors möglich. Zusätzlich zum konkaven Reflektor kann auch die Sonotrode konkav gestaltet werden. Erste Untersuchungen hierzu zeigten, dass bei

einem doppelten Abstand von $L \approx 2R$ annähernd so große Schalldruckpegel erreicht werden, wie beim Stehwellensystem mit lediglich konkavem Reflektor bei einem Abstand von $L \approx R$.

Die Optimierung des Stehwellensystems ermöglichte die Zerstäubung von hochviskosen Flüssigkeiten mit dynamischen Viskositäten von weit mehr als 1000 mPas.

Literatur

- [1] Lierke, E. G.: Techniken und Anwendungen der Ultraschallzerstäubung – ein Rückblick auf 35 Jahre Forschung und Entwicklung. Chemie Ingenieur Technik 70 (1998), 815-826
- [2] Andersen, O.; Hansmann, S.; Bauckhage, K.: Production of fine particles from melts of metals or highly viscous fluids by ultrasonic standing wave atomization. Particle and Particle Systems Characterization 13 (1996), 217-223
- [3] Fritsching, U.; Bauckhage, K.: The interaction of drops and particles with ultrasonic standing wave fields. Transactions on the Built Environment 25 (1997), 151-160
- [4] Dunst, P.; Hemsel, T.; Bornmann, P.; Littmann, W.; Sextro, W.: Vibration assisted dosing, mixing and transport of dry fine powders. Conference Proceedings, 16th International Conference on New Actuators, 2018
- [5] Struckas, A.; Vasiljev, P.; Bareikis, R.; Borodinas, S.; Kasperovicene, J.: Ultrasonic zeppelin-shape transducer for algae oil extraction. Sensors and Actuators A 263 (2017), 754-761
- [6] Zipser, L.; Franke, H.: Laser-scanning vibrometry for ultrasonic transducer development. Sensors and Actuators A 110 (2004), 264-268
- [7] Littmann, W. Refracto-vibrometry. Infocus (1/2010), 2010
- [8] Naugolnykh, K.; Ostrovsky, L.: Nonlinear Wave Processes in Acoustics. Cambridge University Press, 1998