

Refraktometrische Tomographie zur messtechnischen Erfassung von Schallfeldern in optisch transparenten Medien

Stefan J. Rupitsch, Lizhuo Chen, Reinhard Lerch

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Lehrstuhl für Sensorik, 91052 Erlangen, Deutschland

Email: stefan.rupitsch@fau.de

Einleitung

In technischen Anwendungen ist man häufig mit der Fragestellung konfrontiert, dass Schallfelder qualitativ und quantitativ messtechnisch zu erfassen sind [1]. Dies betrifft sowohl Schallfelder in flüssigen und gasförmigen Ausbreitungsmedien als auch mechanische Felder in Festkörpern. Aus diesem Grund wurden in der Vergangenheit diverse Messverfahren entwickelt und erfolgreich eingesetzt, z. B. Hydrophone, Mikrophone, Schlierenfotografie sowie Membran-basierte Interferometrie [2, 3, 4]. Generell sollte ein Messverfahren zur Schallfeldcharakterisierung in den unterschiedlichen Schallausbreitungsmedien folgende vier Eigenschaften aufweisen:

- Berührungslose Erfassung,
- Quantitative Messung,
- Orts- und zeitaufgelöste Messwerte,
- Omnidirektionale Richtcharakteristik.

Keines der kommerziell erhältlichen Messverfahren erfüllt allerdings bislang alle diese Eigenschaften, weshalb ein Bedarf an alternativen Verfahren besteht. In diesem Beitrag wird die Refraktometrische Tomographie (engl. „Light Refractive Tomography“, kurz LRT) vorgestellt, welche alle vier gewünschten Eigenschaften zur Schallfeldcharakterisierung miteinander vereint [5]. Bevor ausgewählte Resultate für flüssige, gasförmige sowie feste Schallausbreitungsmedien präsentiert und verifiziert werden, erfolgt eine kurze Erläuterung des zugrundeliegenden Messprinzips.

Messprinzip

Die Refraktometrische Tomographie basiert, wie auch die Schlierenfotografie, auf Wechselwirkungen von Schallwellen und elektromagnetischen Wellen (z. B. Laserstrahl). Solche Wechselwirkungen treten in jedem optisch transparenten Schallausbreitungsmedium (z. B. Wasser) auf [2]. Eine sich ausbreitende Schallwelle verursacht im Ausbreitungsmedium lokale sowie zeitliche Änderungen der Mediumdichte und folglich Variationen des optischen Brechungsindex. Falls ein Laserstrahl durch das Schallfeld einer Schallquelle läuft (siehe Abb. 1), ergibt sich aufgrund der Variation $\Delta n(x, y, z, t)$ des Brechungsindex eine Änderung der optischen Weglänge entlang des Laserstrahls. Bei der Refraktometrischen Tomographie wird der Laserstrahl mit Hilfe eines optischen Reflektors zurückgeworfen, was auf den integralen Zusammen-

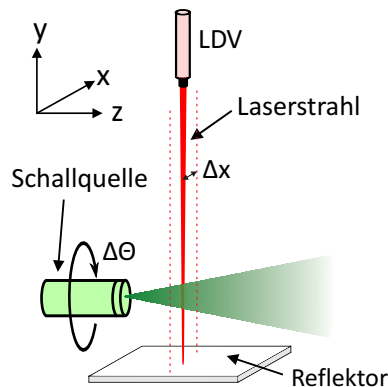


Abbildung 1: Messprinzip der Refraktometrischen Tomographie bei Verwendung eines Laser-Doppler-Vibrometers (LDV).

hang (Raumkoordinaten x , y und z ; Zeit t)

$$\Delta L(x, z, t) = 2 \int \Delta n(x, y, z, t) dy \quad (1)$$

zwischen der Änderung $\Delta L(x, z, t)$ der optischen Weglänge und $\Delta n(x, y, z, t)$ führt [6, 7, 8]. Somit erfährt der optische Reflektor eine virtuelle Bewegung in y -Richtung, obwohl dessen geometrischer Abstand durch die sich ausbreitende Schallwelle nicht beeinflusst wird. Zur messtechnischen Erfassung der optischen Weglängenänderung eignet sich ein Laser-Doppler-Vibrometer (LDV), das am Ausgang ein elektrisches Signal zur Verfügung stellt, welches direkt proportional zu $\Delta L(x, z, t)$ ist.

Um orts- und zeitaufgelöste Variationen $\Delta n(x, y, z, t)$ aus $\Delta L(x, z, t)$ zu rekonstruieren, gilt es die Integralgleichung (1) aufzulösen. Im konkreten Fall wird hierfür eine Prozedur ausgeführt, die aus drei Schritten besteht [5].

1. Messtechnische Erfassung von $\Delta L(x, z, t)$ in einer xy -Querschnittsebene im Abstand z von der Schallquelle, wobei zwischen den einzelnen Positionen des LDV ein Abstand von Δx vorliegt. Daraus ergibt sich eine Projektion.
2. Rotation der Schallquelle um das Winkelinkrement $\Delta\Theta$ und Wiederholen von Schritt 1, bis der Winkelbereich $0^\circ - 180^\circ$ abgedeckt ist.
3. Nachdem der gesamte Datensatz erfasst ist, erfolgt die Rekonstruktion von $\Delta n(x, y, z, t)$ mittels der gefilterten Rückprojektion.

Als Ergebnis liegt die orts- und zeitaufgelöste Variation $\Delta n(x, y, z, t)$ in der gewählten xy -Querschnittsebene vor. Zur Ermittlung des gesamten Schallfelds der Schallquelle ist die dreistufige Prozedur für weitere Querschnittsebenen zu wiederholen.

In optisch transparenten Flüssigkeiten und Gasen kann $\Delta n(x, y, z, t)$ genutzt werden, um daraus den orts- und zeitaufgelösten Schalldruck $p(x, y, z, t)$ zu berechnen. Hierbei gilt in einem weiten Bereich der lineare Zusammenhang

$$\Delta n(x, y, z, t) = \left(\frac{\partial n}{\partial p} \right)_S \cdot p(x, y, z, t), \quad (2)$$

wobei $(\partial n / \partial p)_S$ den piezo-optischen Koeffizienten bezeichnet. Dieser Koeffizient hängt sowohl vom betrachteten Schallausbreitungsmedium als auch von der Wellenlänge λ_{opt} des verwendeten Laserstrahls ab. Bei $\lambda_{\text{opt}} = 633 \text{ nm}$ (HeNe-Laser) und der Temperatur $\vartheta = 25^\circ \text{C}$ folgt für den piezo-optischen Koeffizienten in Wasser $(\partial n / \partial p)_S = 1,473 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ und in Luft $(\partial n / \partial p)_S = 1,914 \cdot 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$.

Im Gegensatz zu (nichtviskosen) Flüssigkeiten und Gasen überträgt ein Festkörper auch Scherkräfte. Deshalb existieren streng genommen in Festkörpern weder Schallfelder noch Schalldrücke. Eine der skalaren Größe Schalldruck entsprechende Größe im Festkörper ist die relative Dichtänderung $\Delta \rho / \rho_0$, wobei ρ_0 dessen Ruhedichte (d. h. ohne Anwesenheit der mechanischen Welle) bezeichnet. In einem optisch transparenten Medium folgt gemäß der Lorentz-Lorenz-Beziehung [9]

$$R_{\text{LL}} = \frac{(n_0 + \Delta n(x, y, z, t))^2 - 1}{(n_0 + \Delta n(x, y, z, t))^2 + 2} \cdot \frac{1}{\rho_0 + \Delta \rho(x, y, z, t)}$$

mit der orts- und zeitaufgelösten Dichteänderung $\Delta \rho(x, y, z, t)$ aufgrund der sich ausbreitenden Schallwelle bzw. mechanischen Welle. Da R_{LL} für ein Medium konstant ist, lässt sich in einem optisch transparenten Festkörper $\Delta \rho(x, y, z, t)$ aus $\Delta n(x, y, z, t)$ bestimmen.

Resultate

In diesem Abschnitt werden Schallfelder in unterschiedlichen optisch transparenten Medien (Wasser, Luft und Plexiglas) messtechnisch erfasst. Dabei erfolgt in Wasser und Luft ein Vergleich von LRT-Messungen und herkömmlichen Messverfahren, d. h. Hydrophon- und Mikrophon-Messungen. Aufgrund fehlender alternativer Messverfahren werden die LRT-Ergebnisse in Plexiglas indirekt verifiziert.

Der am Lehrstuhl für Sensorik realisierte Messaufbau besteht im Wesentlichen aus einem Einpunkt-Laser-Doppler-Vibrometer (*Polytec OFV 303*), welches mittels einer dreiachsigen Präzisionsverschiebevorrichtung in allen drei Raumrichtungen positioniert werden kann. Um Projektionen des Schallfeldes unter unterschiedlichen Winkeln zu erstellen, wird die Schallquelle durch eine Rotationseinheit gedreht.

Wasser

Als Schallquelle diente hier ein linienfokussierter Ultraschalltransducer (*Olympus V306-SU-CF.00IN*) mit der Brennweite 25,4 mm, der mit einem Sinussignal (Frequenz $f = 1,0 \text{ MHz}$) zum Schwingen angeregt wurde. Für die LRT-Messung wurde ein Abstand von $\Delta x = 0,2 \text{ mm}$ zwischen zwei benachbarten LDV-Positionen und ein Winkelinkrement von $\Delta \Theta = 1,8^\circ$ gewählt. Abbildung 2 zeigt die rekonstruierte Schalldruckamplitude $\hat{p}(x, y)$ in der Fokalebene (d. h. $z = 25,4 \text{ mm}$) des Ultraschalltransducers. Zur Verifikation des LRT-Ergebnisses er-

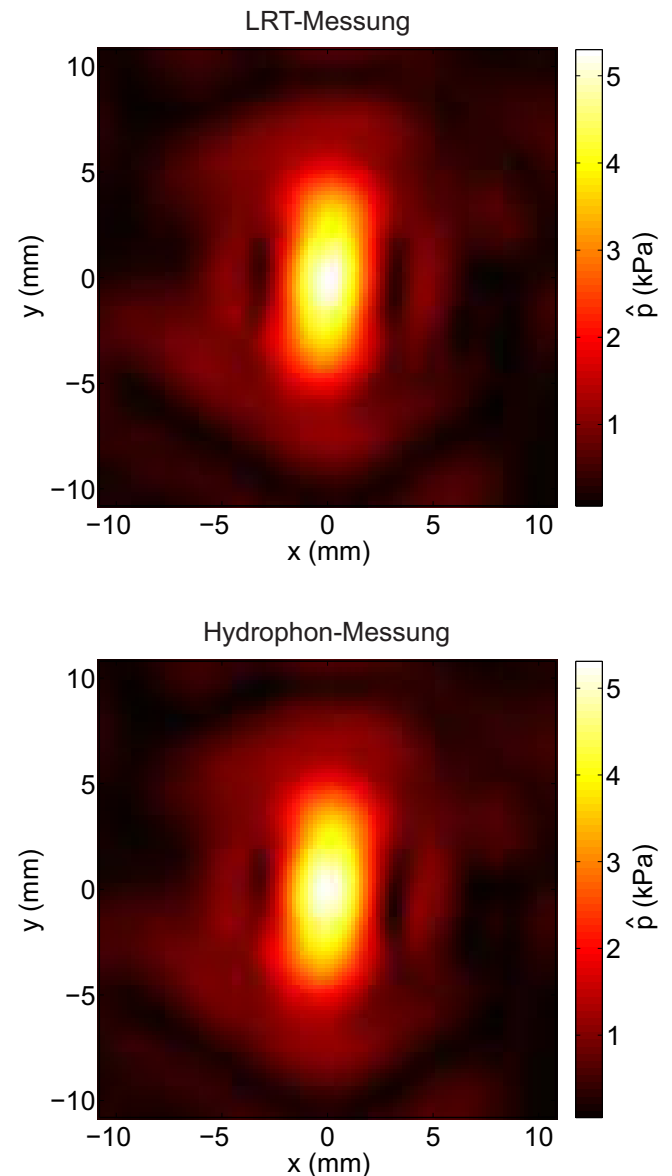


Abbildung 2: Resultierende Amplitudenwerte $\hat{p}(x, y)$ in Wasser aus der LRT- und Hydrophon-Messung in einer xy -Querschnittsebene; axialer Abstand $z = 25,4 \text{ mm}$; linienfokussierter Ultraschalltransducer mit der Brennweite 25,4 mm als Schallquelle.

folgte eine erneute Messung von $\hat{p}(x, y)$ mit einem Hydrophon (*Onda HGL-0400*), wobei hierbei die Fokalebene mit $\Delta x = 0,2 \text{ mm}$ und $\Delta y = 0,2 \text{ mm}$ abgetastet wurde. Der Vergleich beider Messergebnisse verdeutlicht sowohl ausgezeichnete qualitative als auch quantitative

Übereinstimmungen. Die maximale relative Abweichung zwischen den beiden Ergebnissen liegt bei 3,4 %.

Luft

In diesem Experiment wurde das Schallfeld eines unfokussierten Luftultraschallwandlers (*Sanwa SCS-401T*) untersucht, der eine Mittenfrequenz von 40 kHz aufweist. Aufgrund der größeren Wellenlänge der Schallwellen gegenüber dem vorherigen Experiment in Wasser konnte der Abstand zwischen zwei benachbarten LDV-Positionen auf $\Delta x = 1,0$ mm erhöht werden. Abbildung 3 zeigt das LRT-Ergebnis für $\hat{p}(x, y)$ im axialen Abstand $z = 20,0$ mm von der Transduceroberfläche. Hier

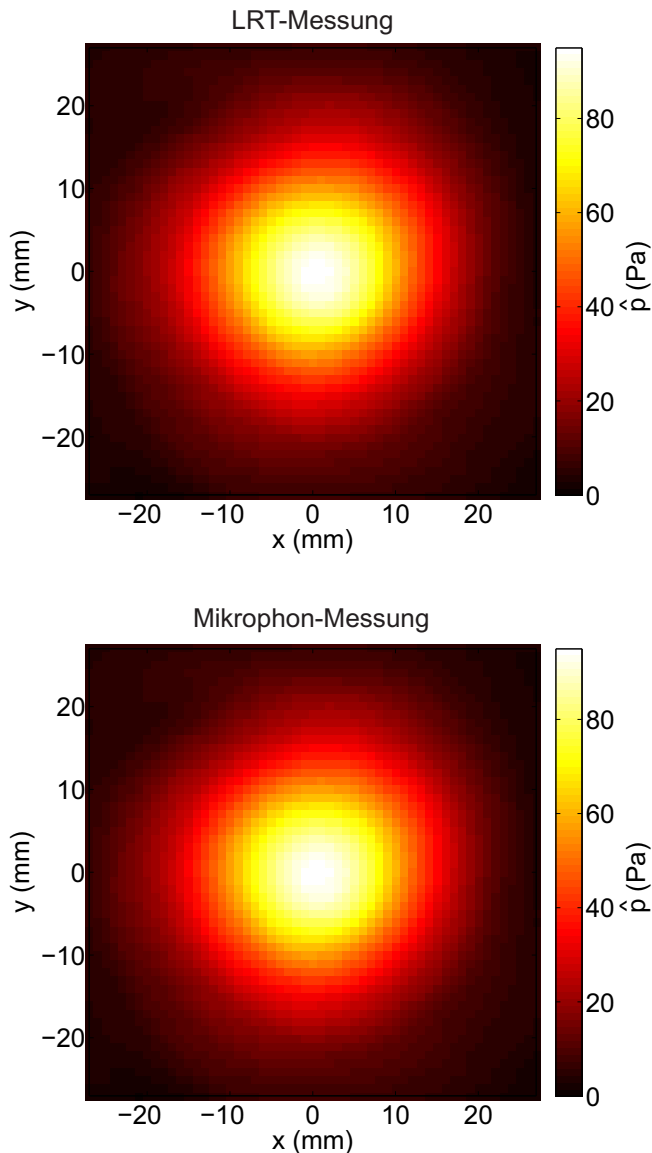


Abbildung 3: Resultierende Amplitudenwerte $\hat{p}(x, y)$ in Luft aus der LRT- und Mikrophon-Messung in einer xy -Querschnittsebene; axialer Abstand $z = 20,0$ mm; unfokussierter Ultraschalltransducer als Schallquelle.

wurden zur Verifikation der LRT-Ergebnisse Vergleichsmessungen mit einem kommerziell erhältlichen 1/4"-Messmikrophon (*Brüel & Kjær 4939*) durchgeführt. Aus dem qualitativen und quantitativen Vergleich der erzielten Resultate folgt unmittelbar, dass die Refraktometri-

sche Tomographie auch für die messtechnische Erfassung von Schallfeldern in Luft geeignet ist.

Plexiglas

Wie bereits erwähnt, ist die Dichteänderung $\Delta\rho$ im Festkörper eine dem Schalldruck entsprechende skalare Größe, welche sich mit Hilfe der Refraktometrischen Tomographie aus Δn ermitteln lässt. Da $\Delta\rho$ jedoch keine gebräuchliche Größe im Zusammenhang mit der Ausbreitung von mechanischen Wellen in Festkörpern darstellt, ist eine Umrechnung in mechanische Spannungen σ zweckmäßig. Hierfür kann die Approximation (Elastizitätsmodul E ; Querkontraktionszahl ν)

$$\sigma_{zz} \approx -\frac{\Delta\rho}{\rho_0} \cdot \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3)$$

herangezogen werden [5, 10]. Dies ist eine gute Näherung, falls die mechanische Normalspannung in Ausbreitungsrichtung der mechanischen Welle (hier z -Richtung) die verbleibenden Normalspannungen (d. h. σ_{xx} und σ_{yy}) dominiert.

Um die Leistungsfähigkeit der Refraktometrischen Tomographie zur qualitativen und quantitativen Erfassung von mechanischen Wellen in Festkörpern zu demonstrieren, wurde ein optisch transparenter Plexiglasblock (PM-MA) als Ausbreitungshindernis in Wasser positioniert. Als Schallquelle diente ein unfokussierter Ultraschalltransducer (*Olympus V306-SU*), der mit Sinusburstsignalen bestehend aus acht Zyklen elektrisch angeregt wurde. Der 22 mm breite Plexiglasblock befand sich im axialen Abstand $z = 24,4$ mm von der aktiven Transduceroberfläche. In Abb. 4 sind die rekonstruierten Momentanwerte des Schalldrucks $p(x, z)$ in Wasser und der mechanischen Normalspannung $\sigma_{zz}(x, z)$ im Plexiglasblock zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten dargestellt. Zum Zeitpunkt $t = 18,2 \mu\text{s}$ erreicht der erste ausgesendete Wellenzug die Grenzfläche Wasser/Plexiglas. Während sich zum Zeitpunkt $t = 25,4 \mu\text{s}$ der Großteil der Wellen im Plexiglasblock befindet, haben zum Zeitpunkt $t = 32,0 \mu\text{s}$ alle bis auf drei Wellenzüge den Plexiglasblock wieder verlassen. Es ist eindeutig zu erkennen, dass im Plexiglasblock eine größere Wellenlänge als im Wasser vorliegt, was auf die höhere Schallausbreitungsgeschwindigkeit zurückzuführen ist. Des Weiteren ergeben sich in den rekonstruierten xy -Querschnitten Reflexionen an den Grenzflächen Wasser/Plexiglas sowie Plexiglas/Wasser. Diese Reflexionen resultieren aus den unterschiedlichen Schallkennimpedanzen der beteiligten Ausbreitungsmedien.

Zurzeit erlaubt kein kommerziell erhältliches Messverfahren eine quantitative Verifikation der ermittelten mechanischen Spannungen im Plexiglasblock. Aus diesem Grund wurden für die einfallenden Schallwellen bzw. mechanischen Wellen Reflexionskoeffizienten an den Grenzflächen von Wasser und Plexiglas berechnet. Dabei ergab sich eine relative Abweichung von maximal 5,1 %, wodurch indirekt die LRT-Ergebnisse im Plexiglasblock verifiziert werden konnten.

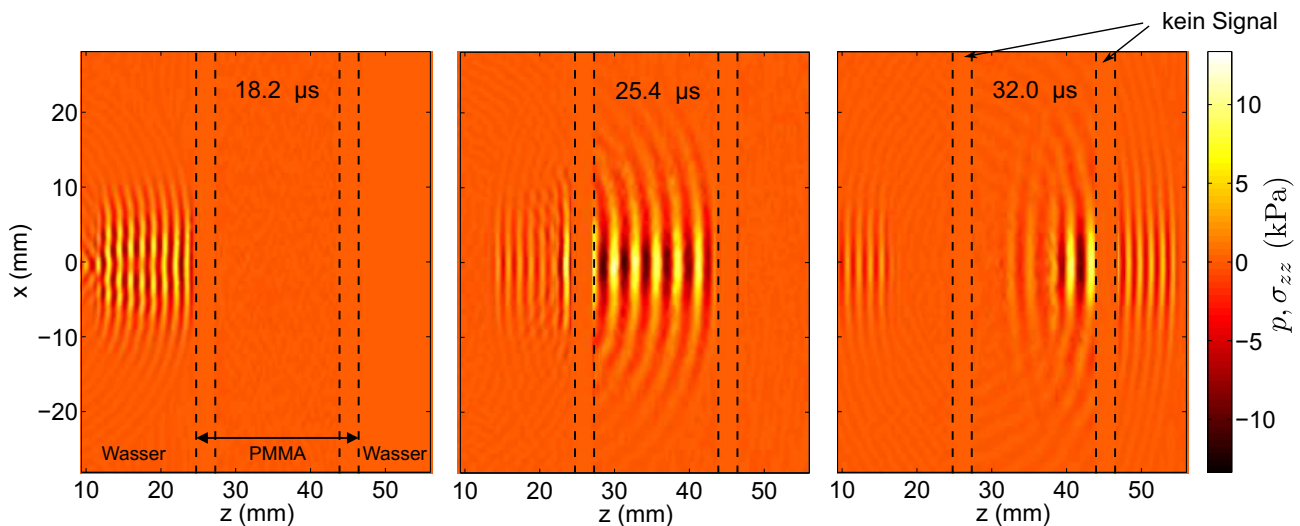


Abbildung 4: Rekonstruktionsergebnisse für die Momentanwerte des Schalldrucks in Wasser bzw. der mechanischen Spannung in Plexiglas (PMMA) zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten ($t = 18,2 \mu\text{s}$, $t = 25,4 \mu\text{s}$ und $t = 32,0 \mu\text{s}$); unfokussierter Ultraschalltransducer als Schallquelle; da sich am Rand des Plexiglasblocks aufgrund der mechanischen Bearbeitung die optischen Eigenschaften verändern, erfolgte dort keine Rekonstruktion der xy -Querschnittsebenen.

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde zur rückwirkungsfreien sowie orts- und zeitaufgelösten Erfassung von Schallfeldern in optisch transparenten Medien die Refraktometrische Tomographie (LRT) als Messverfahren vorgestellt. Anhand von ausgewählten Messergebnissen in Wasser, Luft und Plexiglas konnte der Nachweis erbracht werden, dass die LRT präzise Messergebnisse liefert. Falls das gesamte Schallfeld in einer Querschnittebene ermittelt werden soll, ist zudem die Messdauer bei der LRT bedeutend geringer als bei abtastenden Messverfahren (z. B. Hydrophon und Mikrophon).

Bislang kommt im realisierten Messaufbau ein Einpunkt-Laser-Vibrometer zum Einsatz. Durch die Verwendung eines Laser-Scanning-Vibrometers kann die Dauer der Messdatenaufnahme auf 1/20 reduzieren werden.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung dieser Forschungsarbeit durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der „Erlangen Graduate School in Advanced Optical Technologies (SAOT)“.

Literatur

- [1] Lerch, R., Sessler, G., Wolf, D.: Technische Akustik. Springer, Berlin, 2009
- [2] Settles, G.S.: Schlieren and Shadowgraph Techniques. Springer, Berlin, 2001
- [3] Bacon, D.R.: Primary calibration of ultrasonic hydrophone using optical interferometry. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control 35 (1988), 152-161
- [4] Sherman, C.H., Butler, J.L.: Transducer and Arrays for Underwater Sound. Springer Publishing Company, 2007

- [5] Chen, L.: Light Refractive Tomography for Noninvasive Ultrasound Measurements in Various Media. Shaker Verlag (2014)
- [6] Chen, L., Rupitsch, S.J., Lerch, R.: A reliability study of light refractive tomography utilized for noninvasive measurement of ultrasound pressure fields. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control 59 (2012), 915-927
- [7] Chen, L., Rupitsch, S.J., Lerch, R.: Application of light refractive tomography for reconstructing ultrasound fields in various media. Technisches Messen 79 (2012), 459-463
- [8] Chen, L., Rupitsch, S.J., Lerch, R.: Quantitative reconstruction of a disturbed ultrasound pressure field in a conventional hydrophone measurement. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control 60 (2013), 1199-1206
- [9] Born, M., Wolf, E., Bhatia, A.B., Clemmow, P.C., Gabor, D., Stokes, A.R., Taylor, A.M., Wayman, P.A., Wilcock, W.L.: Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light, Cambridge University Press (2000)
- [10] Chen, L., Rupitsch, S.J., Grabinger, J., Lerch, R.: Quantitative reconstruction of ultrasound fields in optically transparent isotropic solids. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control 61 (2014), 685-695