

Simulationsgestützte synthetische Aperturfokussierungstechnik für die Anwendung in der Ultraschallmikroskopie

Michael Wüst¹, Johannes Eisenhart¹, Michael Nierla¹, Stefan J. Rupitsch¹

¹ Lehrstuhl für Sensorik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Deutschland, Email: michael.wuest@fau.de

Einleitung

Die Ultraschallmikroskopie ist ein etabliertes Verfahren im Bereich der zertörungsfreien bildgebenden Prüfung. Sie findet dort Anwendung, wo das Auftreten von Materialinhomogenitäten zu erwarten ist (beispielsweise Risse, Delaminationen, Fremdeinschlüsse oder Lunker). Die Mittenfrequenzen der eingesetzten Prüfköpfe liegen im Bereich oberhalb von 10 MHz bis hin zu einigen 100 MHz. An den Materialgrenzschichten entsteht aufgrund eines Sprungs der akustischen Impedanz ein Echo, das detektiert werden kann und zu Bilddaten weiterverarbeitet wird.

Überwiegend finden Scanning Acoustic Microscopes (SAMs) Verwendung. Diese bestehen aus Linearachsen, die einen Ultraschallprüfkopf in der lateralen Ebene verfahren, d.h. der Prüfkopf wird mechanisch bewegt. Prüfköpfe für SAMs sind üblicherweise Einzelelementwandler mit einer fokussierenden, meist kugelkalottenförmigen Linse. Das Element wird pulsartig von einem Pulsler/Receiver beaufschlagt, woraufhin die Linse die Schallwelle auf einen gewissen Fokusbereich bündelt. Allerdings ist das laterale Ortsauflösungsvermögen in Tiefenbereichen außerhalb des Fokus deutlich herabgesetzt. SAMs werden daher eher für Aufnahmen im C-Mode (C für engl. *complex*) genutzt. Die Betrachtung tiefenabhängig dargestellter Bilddaten aus B-Mode-Messungen (B für engl. *brightness*) ist nicht generell hilfreich zur Beurteilung des Prüflings.

Gängige Verfahren zur Fokussierung mit synthetischer Apertur schaffen hierbei Abhilfe, berücksichtigen allerdings nur die Schallausbreitung nach strahlenakustischen Gesichtspunkten. Der im Folgenden vorgestellte simulationsbasierte Ansatz beinhaltet hingegen präzise die auftretende transiente Schallausbreitung in Koppelmedium und Prüfling.

Zunächst wird auf die Abbildungsmodalitäten des B-Mode-Scans genauer eingegangen. Der präsentierte Ansatz wird im Detail erläutert und das semi-numerische Simulationsmodell behandelt. Es werden exemplarische Ergebnisse präsentiert, die aus Messungen an ein- und mehrlagig geschichteten Prüflingen gewonnen wurden. Abschließend wird eine Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse gegeben.

Motivation

In Abb. 1 sind schematisch Schallkeulen benachbarter Prüfkopfpositionen skizziert. Der markierte Punkt stellt einen Punktstreuer dar, der außerhalb der Fokalebene F liegt. Da der Punktstreuer im Schallfeld der verschiedenen Prüfkopfpositionen liegt, ist an diesen Positionen

ein entsprechendes Echo detektierbar. Infolge der unterschiedlichen Laufzeiten, die die Schallwelle vom Prüfkopf zum Punktstreuer und zurück benötigt, weist die entstehende B-Mode-Aufnahme einen sichelartigen hyperbelförmigen Verlauf auf.

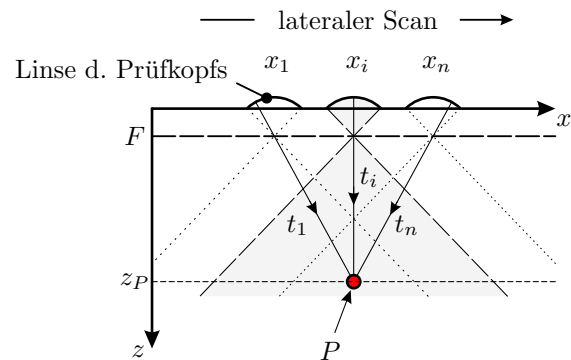


Abbildung 1: Grundlegende Problematik bei Bildgebung im B-Mode mit fest fokussierten Prüfköpfen. Der Prüfkopf wird über die Scanpositionen x_i hinweg verfahren. Dabei ergeben sich unterschiedliche Signallaufzeiten t_i zum Punktreflektor in P .

Ein einfaches und effizientes Prinzip zur Fokussierung mit synthetischer Apertur sind Algorithmen nach dem Delay-and-Sum-Prinzip (DAS), das aus einer Korrektur der Laufzeitdifferenzen für die verschiedenen Prüfkopfpositionen und einer kohärenten Summation in lateraler Richtung besteht:

$$r_{\text{DAS}}^* = \sum_i w_i s(x_i, t_P(z_P) + \Delta t_i(z_P)), \quad (1)$$

wobei r_{DAS}^* die rekonstruierte Reflektivitätsverteilung nach dem DAS-Verfahren bezeichnet und $s(x_i, t_P(z_P) + \Delta t_i(z_P))$ das mit Laufzeitdifferenzen behaftete Signal an der Position x_i und w_i einen ggf. eingesetzten Wichtungsfaktor, der zur Nebenkeulenunterdrückung genutzt werden kann. P entspricht der Position des Punktstreuers, z_P seiner Tiefenposition, t_P der kürzesten Signallaufzeit und Δt_i den Laufzeitdifferenzen an den Prüfkopfpositionen i . Das maximale laterale Ortsauflösungsvermögen ergibt sich für den Wichtungsfaktor $w_i = 1$ [1], der im Folgenden genutzt wird. Dies liefert den Signalwert für den aktuell fokussierten Bildpunkt. Diese Operation wird für das gesamte Bild wiederholt, was zu einer vollständig fokussierten Darstellung führen soll. Für fokussierte Prüfköpfe ist das Prinzip der virtuellen Quelle nutzbar, das den theoretischen Fokuspunkt als Referenz der Laufzeitkorrektur ansetzt [1], [2]. Dies kann auch im Festkörper für die Anwendung in der Ul-

traschallmikroskopie bei Berücksichtigung der Brechung angewendet werden [2].

Simulationsgestützte synthetische Aperturfokussierungstechnik

Die Rekonstruktion nach DAS ist lediglich ein strahlenakustischer Ansatz, bei dem der ausgesendete Ultraschallpuls vereinfachend als Dirac-artig angenommen wird. Die präzise Schallausbreitung im zu untersuchenden Prüfling wird nicht hinreichend abgebildet, um gerade bei komplexeren Reflektivitätsverteilungen im Bild noch optimale Ergebnisse zu erzielen. Der hier vorgestellte simulationsbasierte Ansatz verfolgt das Ziel, mit allen bekannten Informationen ein erheblich besseres rekonstruiertes Bild zu berechnen. Die Aufnahme des Rohdatenbildes kann prinzipiell als eine räumliche Faltung in den beiden Richtungen x und z betrachtet werden. Nach [4] und [5] kann dieser Sachverhalt folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$s(x, z) = \iint r(x', z') h_{\text{PSF}}(x - x', z, z') dx' dz' \quad (2)$$

mit den gemessenen Signalen $s(x, z)$, der tatsächlich vorliegenden Reflektivitätsverteilung $r(x', z')$ und der für das bildgebende Messsystem charakteristischen Punkt-Bild-Funktion (engl. *point spread function* – PSF).

Die Rekonstruktion entspräche also der Entfaltung (engl. *deconvolution*, vgl. Abb. 2) der Ausgangssignale und der PSF. Die Entfaltungsoperation ist jedoch ein inverses Problem, das schlecht konditioniert ist [3]. Die Rekonstruktion wird daher über eine zweidimensionale Optimalfilterung, auch oft als Korrelationsfilter bezeichnet, realisiert [4], [5], [6]:

$$r_{\text{PSF}}^*(x, z) = \iint s(x', z') h_{\text{PSF}}(x' - x, z', z) dx' dz' \quad (3)$$

mit der berechneten rekonstruierten Reflektivitätsverteilung $r_{\text{PSF}}^*(x, z)$. Die hierfür erforderliche

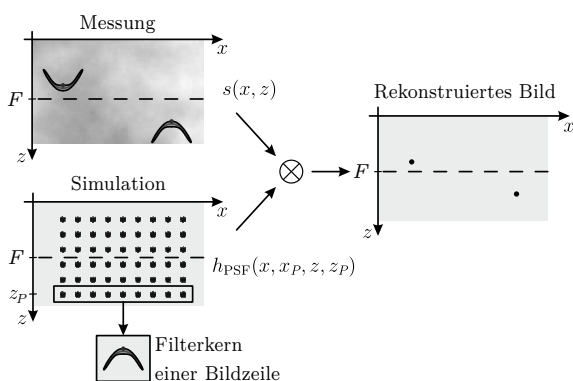


Abbildung 2: Inverser Abbildungsprozess bei der Rekonstruktion der ursprünglichen Reflektivitätsverteilung. Der Operator \otimes symbolisiert hierbei die Entfaltungsoperation.

Simulation basiert auf einem semi-numerischen Berechnungsansatz [7], [8]. Ziel ist es, die Ausgangssignale des Ultraschallmikroskops bei idealer Geometrie zu erhalten. Aus den Simulationsdaten kann die tiefenabhängige

PSF berechnet und im Anschluss als Filterkern genutzt werden. Da der Filterkern lediglich für eine B-Mode-Aufnahme genutzt werden soll, ist es möglich, die Simulation ebenfalls nur im zweidimensionalen Fall zu implementieren, um so massiv Rechenzeit einzusparen. Die Simulation besteht aus zwei Schritten. Zunächst erfolgt eine analytische Berechnung der Schallausbreitung im Koppelmedium zwischen Prüfkopf und Prüfling mit Hilfe der ortsabhängigen Impulsantwort durch SIRM. Im zweidimensionalen Fall wird für die Impulsantwort des Prüfkopfs eine gekrümmte Linie angenommen, die von einem messtechnisch ermittelten Sendepuls angeregt wird. Für diese existiert eine analytische Lösung für den Schalldruck an einer beliebigen Position im Raum [7]. Das Berechnungsmodell ist durch die Vereinfachung außerordentlich effizient. Die gewonnenen Signale dienen zur Anregung an der Koppelgrenze zwischen analytischem und numerischem Gebiet. Im numerischen Teil ist eine kurze Wasservorlaufstrecke diskretisiert, um die Reflexion an der Vorderkante des Bauteils abbilden zu können. Die Schallwelle wandert durch die implementierten Materialsichten und wird auf der Rückseite durch entsprechende Randbedingungen absorbiert. Bei Auftreten mehrerer verschiedener Schichten im Festkörper treten somit auch Mehrfachreflexionen auf, die im resultierenden Filterkern berücksichtigt werden können. Von Interesse für die Erzeugung des Filterkerns sind die transienten Verschiebungen an den Knoten des FE-Gitters [9]. Aus den Verschiebungen wird durch eine Faltung über die Impulsantwort des Systems schließlich das Ausgangssignal für den jeweiligen Gitterpunkt erzeugt. Aufgrund des Huygens'schen Prinzips ist der Filterkern nicht nur für punkrtartige, sondern auch für flächige Defekte praktikabel nutzbar.

Die eigentliche Berechnung des simulationsbasierten SAFT-Algorithmus (kurz: PSF-SAFT) erfordert zum einen die Zeitrohdaten aus der Messung, zum anderen eine Look-up Tabelle, die die Simulationsergebnisse beinhaltet. Der Ablauf der SAFT-Berechnung wird in Abb. 3 wiedergegeben. Zur Berechnung des SAFT-Signals wird das analytische Signal genutzt, das aus den Messdaten durch Hilbert-Transformation gewonnen wird.

Die komplexwertigen Signalwerte bieten zusätzlich eine Phaseninformation, die bewertet werden kann. Dies kann optional bei Gewichtung mit dem sog. Kohärenzfaktor [10] genutzt werden. Der Kohärenzfaktor (engl. *coherence factor*, CF) liefert ein Maß für die Phasenverzerrung, indem das Verhältnis zwischen kohärenter und inkohärenter Summe der Signale gebildet wird. Für den PSF-SAFT Algorithmus kann der Kohärenzfaktor durch

$$w_{\text{PSF}}^{\text{CF}}(x, z) = \frac{\left| \sum_{x'} \sum_{z'} s_a(x', z') h_{\text{PSF}}(x' - x, z, z') \right|^2}{\sum_{x'} \sum_{z'} |s_a(x', z') h_{\text{PSF}}(x' - x, z, z')|^2} \quad (4)$$

mit den analytischen Messdaten $s_a(x', z')$ angegeben werden. Der Kohärenzfaktor bietet die Möglichkeit der besseren Quantifizierung der Größe auftretender Defekte im Prüfling, weil er die durch Fehler in der Rekonstruktion auftretenden Nebenkeulen reduziert. Analog zu Gl. 4

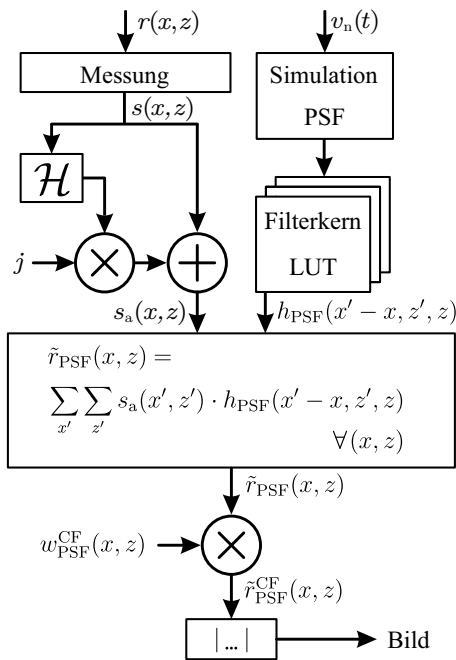


Abbildung 3: Schematischer Ablauf der Berechnung der simulationsbasierten synthetischen Aperturfokussierung.

kann ein Kohärenzfaktor für DAS gebildet werden. Die CF-Gewichtung arbeitet allerdings durch die prinzipbedingt bessere Rekonstruktion bei PSF-SAFT erheblich effizienter. Zur Beurteilung regelmäßiger Strukturen ist die CF-Gewichtung allerdings weniger geeignet. Sie ist eher ein hilfreiches Werkzeug zur quantitativen Beurteilung von deutlichen Defekten.

Ergebnisse an exemplarischen Prüflingen

In Abb. 4 sind zwei exemplarische Prüflinge dargestellt, die mit beiden SAFT-Verfahren untersucht wurden. Bei Prüfling A handelt es sich um einen einlagigen Festkörper, der aus dem Polyurethan-Gießharz Crystal-Clear200 des Herstellers KauPo hergestellt wurde. Hierbei wurden auf engst möglichem Raum Drahtreflektoren aus Wolfram mit einem Durchmesser von 25 µm eingebracht und vergossen. Prüfling B hingegen besteht aus einem zweilagigen Aufbau aus Plexiglas und einer darunter befindlichen Lage aus Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS), das additiv durch Filamentdruck mit einem 3D-Drucker gefertigt wurde. Die beiden Kunststoffe wurden zuvor poliert und anschließend miteinander verklebt. Die ABS-Schicht beinhaltet zudem kleinste Bohrungen, um definierte Defekte zur besseren Beurteilung vorliegen zu haben. Beide Messungen wurden mit dem Prüfkopf Olympus V372 mit einer Mittenfrequenz von 20 MHz durchgeführt.

Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse für Prüfling A. Das Rohdatenbild gibt bei defokussierter Messung wenig Aufschluss über die vorliegende Reflektivitätsverteilung. In der linken Spalte sind die SAFT-Ergebnisse ohne CF-Gewichtung gegenübergestellt. In der rechten Spalte sind die Ergebnisse mit anschließender CF-Gewichtung abgebildet. PSF-SAFT zeigt eine erheblich bessere Abbildungstreue, d. h. die Drahtreflektoren mit unterschiedli-

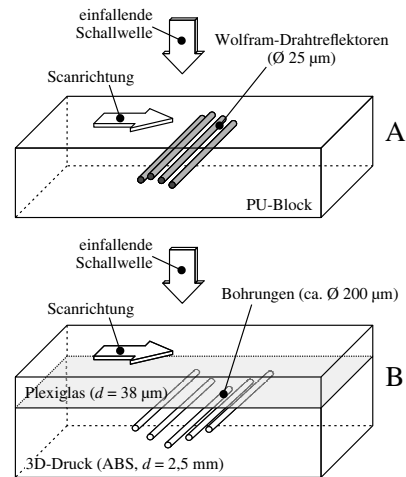


Abbildung 4: Untersuchte exemplarische Prüflinge mit einschichtigem und zweischichtigem Aufbau.

cher Tiefenposition zeigen identische Bilder, vor allem in Abb. 5 (e) ist dies gut zu erkennen. Dies ist Voraussetzung dafür, dass eine Bewertung der Lage und Größe von Defekten möglich wird. Die Pegel der Nebenkeulen fallen zudem bei PSF-SAFT deutlich geringer aus als bei DAS. Durch die sehr geringe Rückstreuläche der Drahtreflektoren kann das maximal erreichbare Ortsauflösungsvermögen im Bild beurteilt werden. PSF-SAFT mit CF-Gewichtung liefert eine laterale Auflösung von 0,15 mm (laterale Halbwertsbreite), wohingegen eine Messung im Fokus eine Auflösung von 0,33 mm erreichen würde.

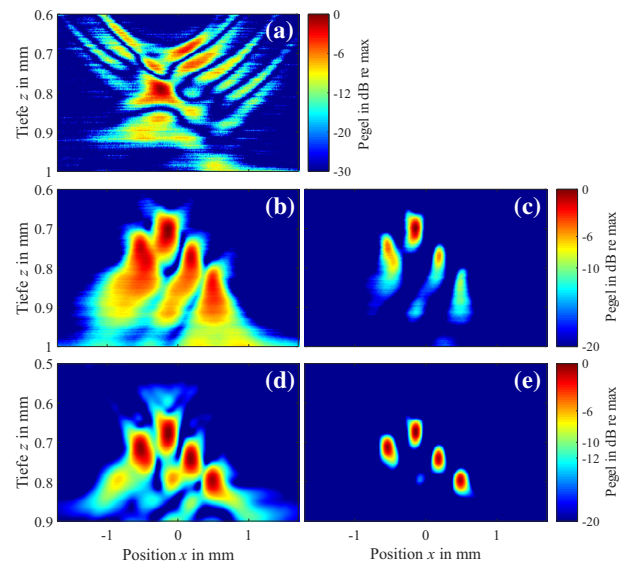


Abbildung 5: Ergebnisse anhand von Messungen an Prüfling A. Betragsbild der Rohdatenaufnahme (a), DAS-Bild (b), DAS-Bild mit CF-Gewichtung (c), PSF-SAFT-Bild (d) und PSF-SAFT-Bild mit CF-Gewichtung (e).

Prüfling B bietet durch den zweilagigen Aufbau zusätzliche Herausforderungen. Die Ergebnisse von DAS und PSF-SAFT sind Abb. 6 im Vergleich aufgeführt. Zunächst fällt auf, dass das Bild des PSF-SAFT einen höheren Dynamikbereich bietet als das DAS-Bild. Details wie die einzelnen Faserquerschnitte sind in PSF-SAFT

noch sehr gut erkennbar, wo die Rekonstruktion durch den DAS-Algorithmus keine ausreichend hohe Qualität bietet und ein Bildrauschen auftritt. Bei der Untersuchung der eingebrachten Defekte sowie der Fehler beim Druck fällt auf, dass die Breite der Hauptkeulen im PSF-SAFT-Bild erheblich schmäler und definierter sind als im DAS-Bild. Beide Bilder sind in diesem Fall ohne CF-Gewichtung erzeugt worden. Um deutliche Defekte quantifizieren zu können, kann die CF-Gewichtung für PSF-SAFT empfohlen werden. Für die Darstellung der feinen Filamentstruktur ist die CF-Gewichtung allerdings nicht geeignet.

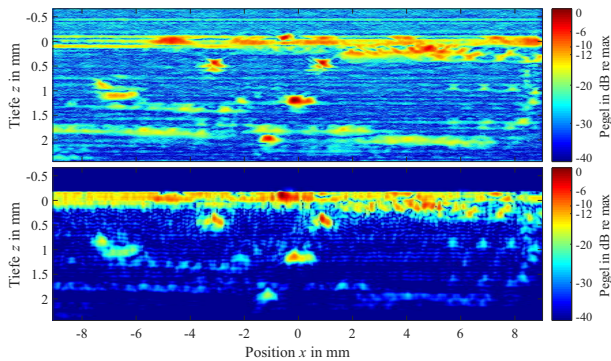


Abbildung 6: Ergebnisse anhand von Messungen an Prüfling B. DAS-Bild (oben) und PSF-SAFT-Bild (unten), jeweils ohne CF-Gewichtung. Gut erkennbar ist die Filament-Struktur des 3D-Drucks im PSF-SAFT-Bild.

Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass der vorgestellte simulationsbasierte Ansatz zur synthetischen Aperturfokussierung sehr gute Ergebnisse liefert. Durch a priori-Wissen über die zu untersuchende Geometrie und die Form des Sendepulses kann eine signifikant bessere Rekonstruktion als bei einem erweiterten DAS-Algorithmus mit virtueller Quelle und CF-Gewichtung erzielt werden. Dies äußert sich zum einen durch ein besseres laterales sowie axiales Ortsauflösungsvermögen im resultierenden Bild, aber auch in der Qualität der Rekonstruktion. Es konnte gezeigt werden, dass gleichartige Reflektivitäten an verschiedenen Positionen zu selben rekonstruierten Bildern des auftretenden Defekts führen, was eine einfachere Beurteilung von Defekten im Bauteil bietet. Es konnte ferner gezeigt werden, dass der präsentierte Ansatz sich insbesondere für mehrlagige Prüflinge besser eignet als DAS.

Es ist allerdings unbedingt erforderlich, den zu untersuchenden Tiefenbereich des Prüflings im Defokus des Prüfkopfs zu vermessen, um genügend Informationen für die SAFT-Berechnung zur Verfügung zu haben. Dies ist aber nicht immer gegeben. Gerade bei mehrlagigen Prüflingen mit starker Brechung aufgrund hoher Sprünge der akustischen Impedanz (beispielsweise zwischen einem Metall und einem Polymer) kann es zu einer erheblichen Verkürzung der Brennweite kommen, was den Informationsgehalt in den Rohdaten für die Rekonstruktion einschränkt. Eine weitere Einschränkung, die speziell den simulationsbasierten PSF-SAFT betrifft, ergibt sich

bei variierenden Schichtdicken im Prüfling. Bei kleinen Abweichungen ist die Rekonstruktion mit einem idealisierten Simulationsmodell nicht mehr möglich, da die reale Schallwelle sich anders in den Festkörper ausbreitet als in der idealisierten Simulation. Der Filterkern ist dadurch fehlangepasst und wird keine ausreichend guten Ergebnisse liefern. Dies kann im Vorfeld aber anhand des Rohdatenbilds des gemessenen B-Mode-Scans beurteilt werden. Im Direktvergleich ist der hochangepasste PSF-SAFT-Algorithmus deutlich langsamer berechenbar als DAS und daher aller Voraussicht auch bei hardwarenaher Programmierung nicht echtzeitfähig, liefert im Gegenzug allerdings signifikant bessere Ergebnisse.

In Zukunft wird der diskutierte Ansatz für höherfrequente Prüfköpfe realisiert, um das theoretisch erreichbare Auflösungsvermögen von Ultraschallmikroskopen vollständig auszuschöpfen. Für eine bessere Rekonstruierbarkeit der Reflektivitätsverteilung wäre auch ein Einsatz von Arraysystemen denkbar, mithilfe derer die erforderliche Defokussierung erfolgt.

Literatur

- [1] Frazier, C.H., O'Brien, W.: Synthetic aperture techniques with a virtual source element. *IEEE Transactions on UFFC*, vol. 45 issue 1, pp. 196-207, 1998.
- [2] Rupitsch, S.J., Zagar, B.: Acoustic microscopy technique to precisely locate layer delamination. *IEEE Transactions on Instrum. Meas.*, vol. 56, no. 4, pp. 1429-1434.
- [3] Achilles, D.: Die Fourier-Transformation in der Signalverarbeitung – Kontinuierliche und diskrete Verfahren der Praxis. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2. Auflage, 1985.
- [4] Soumekh, M.: Synthetic Aperture Radar Signal Processing. J. Wiley, New York, 1999.
- [5] Opretzka, J., Vogt, M., Ermert, H.: A High-Frequency Ultrasound Imaging System Combining Limited-Angle Spatial Compounding and Model-Based Synthetic Aperture Focusing. *IEEE Transactions on UFFC*, vol. 58 no. 7, pp. 1355-1365, 2011.
- [6] Turin, G.L.: An Introduction to Matched Filters. *IRE Transactions on Inform. Techn.*, pp. 311-329, 1960.
- [7] Nierla, M., Rupitsch, S.J.: Hybrid Semi-numerical Simulation Scheme to Predict Transducer Outputs of Acoustic Microscopes. *IEEE Transactions on UFFC*, vol. 63, no. 2, pp. 275-289, 2016.
- [8] Rupitsch, S.J., Nierla, M.: Efficient numerical simulation of transducer outputs for acoustic microscopes. *IEEE Sensors 2014*, pp. 1656-1659, 2014.
- [9] Wüst, M., Nierla, M., Rupitsch, S.J.: A model-based synthetic aperture focusing technique for acoustic microscopy. *IEEE IUS 2016*, 2016.
- [10] Hollman, K.W., Rigby, K.W., O'Donnell, M.: Coherence Factor of Speckle from a Multi-row Probe. *IEEE IUS 1999*, pp. 1257-1260, 1999.