

Modellgestützte Ultraschallmikroskopie zur dimensionellen Erfassung von Fehlstellen in Festkörpern

Michael Wüst, Michael Nierla, Stefan J. Rupitsch

Lehrstuhl für Sensorik, 91052 Erlangen, Deutschland, Email: michael.wuest@fau.de

Einleitung

In diesem Beitrag wird ein modellgestütztes Verfahren zur Ultraschall-Mikroskopie vorgestellt. Es dient der Steigerung des Ortsauflösungsvermögens im Bild. Dazu wird das Abbildungsverhalten des Messsystems durch dessen Punkt-Bild-Funktion berücksichtigt, was zu verbesserten Ergebnissen gegenüber dem Rohdaten-Bild führt. Die aus den Rohdaten der Messung resultierenden B-Mode-Bilder weisen zunächst ein unzureichendes Ortsauflösungsvermögen auf. Die Information zur Generierung einer geschärften Abbildung ist in den Messdaten allerdings prinzipiell vorhanden. Eine Nachauswertung des Datensatzes mittels synthetischer Aperturfokussierungstechnik (SAFT) ermöglicht die Nutzung dieser Information. Anhand simulierter Messdaten wird das Potential des modellgestützten Verfahrens für den einfachen Fall von punktförmigen Reflektoren in Wasser aufgezeigt und dem gängigen Delay-and-Sum-Verfahren gegenübergestellt.

Problemstellung

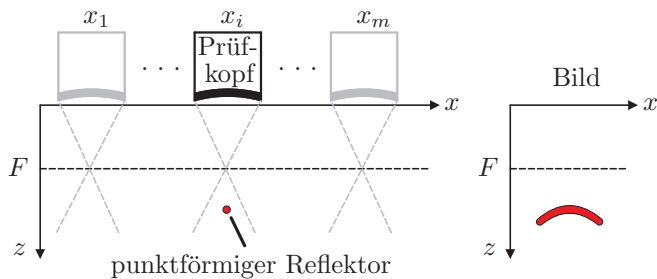


Abbildung 1: Entstehung der Unschärfe im Rohdaten-Bild außerhalb des Fokalbereichs für einen B-Scan an den Positionen $i \in [1, m]$.

Zum Einsatz kommen Ultraschall-Prüfköpfe in Einzelwandlerausführung mit fokussierender Linse. Dadurch wird eine scharfe Abbildung im Fokalbereich um die Brennweite F ermöglicht. Außerhalb des Fokalbereichs ist das Ortsauflösungsvermögen jedoch vermindert. In Abb.1 wird schematisch veranschaulicht, wie ein punktförmiger Reflektor während eines B-Scans vom Prüfkopf überstrichen wird. Der Reflektor befindet sich im Schallfeld nach der Fokalebene. Daher ist nicht nur ein Echo des Reflektors an der Scanposition x_i , sondern auch an den benachbarten Positionen zu erwarten. In der Folge ergibt sich ein hyperbelförmiger Verlauf, der aufgrund der unterschiedlichen Laufzeitdifferenzen vom Reflektor zu den einzelnen Wandlerpositionen entsteht [1].

Fokussierung mit synthetischer Apertur Delay-and-Sum-Verfahren

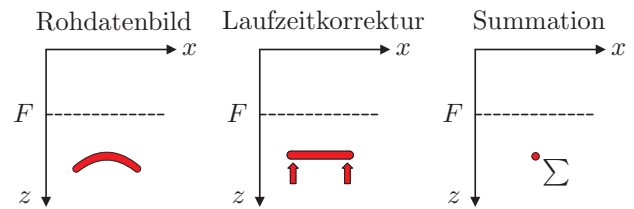


Abbildung 2: Delay-and-Sum-Verfahren in schematischer Darstellung.

Ein aus der Literatur bekannter Ansatz ist es, den auftretenden Laufzeitunterschied zu den verschiedenen Prüfkopfpositionen zu korrigieren. Das korrigierte Signal wird über den Scanweg aufsummiert. Dies wird sukzessive für alle Punkte des Bildes wiederholt, wodurch eine verbesserte Abbildung resultiert. Das Schema wird in Abb. 2 für einen Punkt des Bildes dargestellt. Der Algorithmus nach dem sog. Delay-and-Sum-Verfahren (DAS) basiert nach [1] auf

$$r_{\text{DAS}}(t) = \sum_i w_i S_i(t - \Delta t_i) \quad (1)$$

mit dem rekonstruierten Signal $r_{\text{DAS}}(t)$ am betrachteten Bildpunkt, der Fensterung w_i zur Gewichtung in x -Richtung und dem Signal S_i , das der Laufzeitkorrektur Δt_i unterzogen wird. Die Gewichtung w_i wird hier für alle i zu 1 gesetzt (Rechteck-Fensterung), da nach [1] so das höchstmögliche Ortsauflösungsvermögen erzielt werden kann.

Die Laufzeitkorrektur wird bei fokussierenden Wandlern in Bezug auf den Fokalbereich durchgeführt. Vereinfachend wird dabei davon ausgegangen, dass der Fokalbereich einem Punkt entspricht, der kugelförmige Schallwellen abstrahlt. Dies ist auch als Prinzip der virtuellen Quelle bekannt [2],[3].

Punkt-Bild-Funktion

Die Abbildungseigenschaften eines bildgebenden Systems können mit dessen Punkt-Bild-Funktion (engl. *point spread function*, PSF) beschrieben werden. Das resultierende Bild $s(x, z)$ entsteht durch die räumliche Faltung der Reflektivitätsverteilung $r(x, z)$ des messtechnisch erfassten Raumes mit der PSF $h(x, z, t)$ nach Gl. (2) [4],[5]. Die PSF $h(x, z, t)$ ist von der x - und y -Position des betrachteten Punktes sowie der Laufzeit t zwischen Wandler und Punkt abhängig. Zur Veranschaulichung wird die

räumliche Faltung für ein exemplarisches Bild in Abb. 3 schematisch dargestellt.

$$s(x, z) = \iint r(x', z') \cdot h(x - x', z', z) dx' dz' \quad (2)$$



Abbildung 3: Räumliche Faltung der Reflektivitätsverteilung $r(x, z)$ mit der Punkt-Bild-Funktion $h(x, z, t)$ liefert das Bild $s(x, z)$.

Modellgestützter Ansatz

Dieses Prinzip dient, invers angewendet, zur Rekonstruktion der Reflektivitätsverteilung. Der Ansatz kann auch als eine Filterung mit einem maßgeschneiderten Filterkern interpretiert werden. Das Verfahren wird im Folgenden als PSF-SAFT bezeichnet. Die rekonstruierte Reflektivitätsverteilung $r^*(x, z)$ wird durch Entfaltung des Bildes $s(x, z)$ aus den aufgezeichneten Messdaten mit der tiefenabhängigen PSF $h^*(x, z, t)$ berechnet. Die PSF stellt den Filterkern dar und wird dabei aus einer Simulation der Messkette gewonnen. $r^*(x, z)$ ergibt sich aus

$$r^*(x, z) = \iint s(x', z') \cdot h^*(x - x', z', z) dx' dz' \quad (3)$$

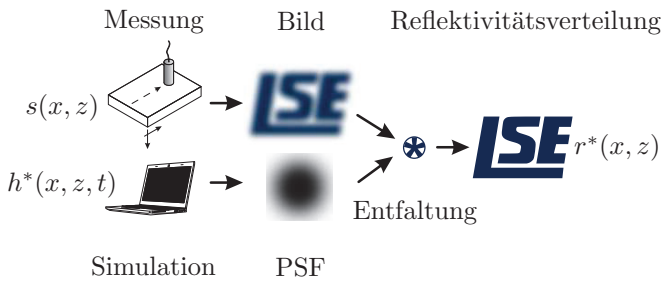


Abbildung 4: Räumliche Entfaltung der Bilddaten $s(x, z)$ mit der Punkt-Bild-Funktion $h^*(x, z, t)$ liefert die rekonstruierte Reflektivitätsverteilung $r^*(x, z)$.

Simulation der PSF

Die Simulation der PSF kann durch die Berechnung der ortsabhängigen Impulsantwort $h_S(x, t)$ erfolgen. Diese resultiert letztlich aus dem Rayleigh-Integral, welches für longitudinale Wellenausbreitung angewendet werden kann. Es werden ferner die Annahmen getroffen, dass jeder Punkt \mathbf{r}_T auf der aktiven Oberfläche S_T des Wandlers eine kugelförmige Welle abstrahlt und das Ausbreitungsmedium homogen ist [6]. Aus dem Rayleigh-Integral folgt für den Schalldruck an Punkt P mit Ortsvektor \mathbf{r}_P

$$p(\mathbf{r}_P, t) = \varrho_0 v(t) * \underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \int_{S_T} \frac{\delta\left(t - \frac{|\mathbf{r}_P - \mathbf{r}_T|}{c_0}\right)}{2\pi |\mathbf{r}_P - \mathbf{r}_T|} dS_T(\mathbf{r}_T)}_{h_S(\mathbf{r}_P, t)} \quad (4)$$

mit der Dichte des umgebenden Mediums ϱ_0 , der Schallausbreitungsgeschwindigkeit c_0 und der Delta-Distribution δ . Das zweimalige Durchlaufen der Strecke zwischen Wandler und Punkt-Reflektor \mathbf{r}_P wird durch zweimalige Anwendung der zeitlichen Faltungsoperation beschrieben. Somit besteht zwischen der vom Wandler initiierten Schallschnelle $v(t)$ und dem resultierenden Ausgangssignal $u_{out}(\mathbf{r}_P, t)$ der Zusammenhang

$$u_{out}(\mathbf{r}_P, t) \sim v(t) * \frac{\partial h_S}{\partial t} * \frac{\partial h_S}{\partial t} \quad (5)$$

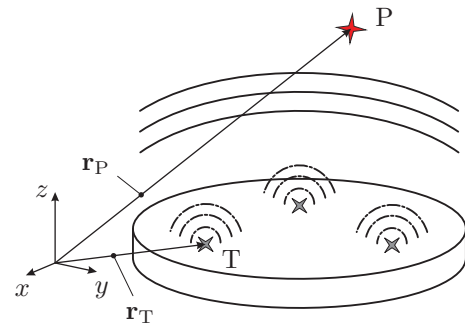


Abbildung 5: Resultierende Schallwelle an Punkt P als Summe der Abstrahlung der Punkte T auf der aktiven Wandleroberfläche.

Anwendung auf simulierte Messungen

Im Folgenden werden die beiden vorgestellten Verfahren zur Nachauswertung von Messdaten aus B-Scans einander gegenüber gestellt. Als Beispiele werden simulierte Messdaten aufgeführt. Hierbei werden punktförmige Reflektoren in axialer und in lateraler Orientierung in Wasser angeordnet. Das Verfahrenkrement in lateraler Richtung entspricht 0,1 mm. Die Wandleroberfläche emittiert einen abklingenden Sinus-Burst mit einer Länge von drei Perioden bei einer Sendefrequenz von 50 MHz. Die Brennweite in Wasser liegt bei 15 mm.

Anordnung der Reflektoren in lateraler Richtung

In Abb. 6 ist die Auswertung einer Anordnung aus fünf in lateraler Richtung angeordneten punktförmigen Reflektoren dargestellt. Der Abstand zwischen den Punkten beträgt 2,5 mm, die Punkte liegen in einer Tiefe von 24 mm und damit 9 mm hinter dem Fokus. Die Darstellung in Abb. 6 oben zeigt das aus den Rohdaten generierte Bild. Erkennbar sind die hyperbelförmigen Verläufe der einzelnen Punkte. Demgegenüber stehen die beiden Bilder aus den Nachauswertungen durch DAS (Mitte) und PSF-SAFT (unten).

Das Bild aus der Auswertung durch das DAS-Verfahren weist bereits eine Struktur auf, die Rückschlüsse auf die Form der Reflektoren zulässt. Die laterale und axiale Breite der Objekte an der -12 -dB-Schwelle beträgt $0,4$ mm. An der -20 -dB-Schwelle sind die Abbildungen der einzelnen Punkte nicht mehr klar voneinander trennbar. Eine Abschätzung der geometrischen Abmessungen eines Reflektors ist so nicht möglich.

Das PSF-SAFT-Verfahren liefert hingegen eine laterale Breite der Punkte, die der Größe des Verfahrenskrements entspricht. In der Theorie ist also das maximal erzielbare laterale Ortsauflösungsvermögen erreichbar. Das Ortsauflösungsvermögen in Tiefenrichtung ist beim PSF-SAFT-Verfahren von der Länge des gewählten Sendesignals abhängig.

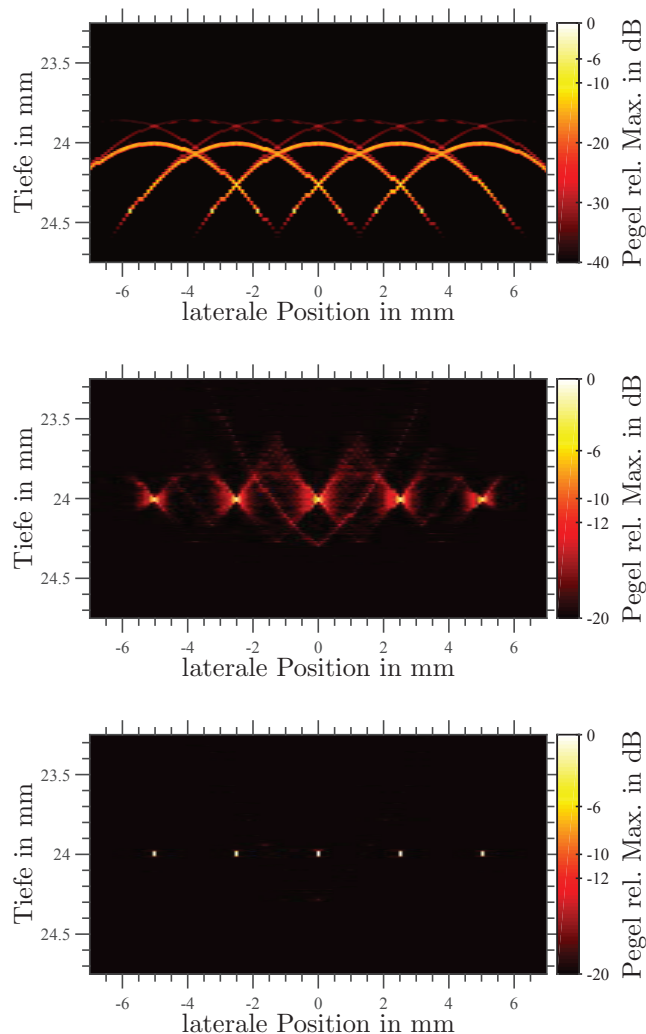


Abbildung 6: Gegenüberstellung von Rohdaten-Bild (oben), Bild nach DAS- (Mitte) und PSF-SAFT-Verfahren (unten). Anordnung von fünf Punktstreuern in lateraler Richtung.

Anordnung der Reflektoren in axialer Richtung

Im Folgenden wird eine Anordnung aus fünf punktförmigen Reflektoren betrachtet, die in axialer Richtung zum Wandler orientiert sind. Die Abstände zwischen den Punkten betragen jeweils 3 mm.

Die Auswertung über das DAS- sowie das PSF-SAFT-Verfahren in Abb. 7 zeigt das Potential beider Nachauswertungen auf. Die vergleichsweise große Brennweite des simulierten Wandlers führt zu kleinen Öffnungswinkeln, was vor allem bei geringer Entfernung zum Fokalbereich am Punkt in 18 mm Tiefe größere Fehler aufgrund der diskreten Abtastung zur Folge hat. In größeren Tiefen ($2,1$ mm bis 3 mm) ist wiederum erkennbar, dass das Bild mit dem PSF-SAFT-Verfahren sowohl in lateraler als auch in axialer Dimension gegenüber dem DAS-Verfahren verbessert werden kann.

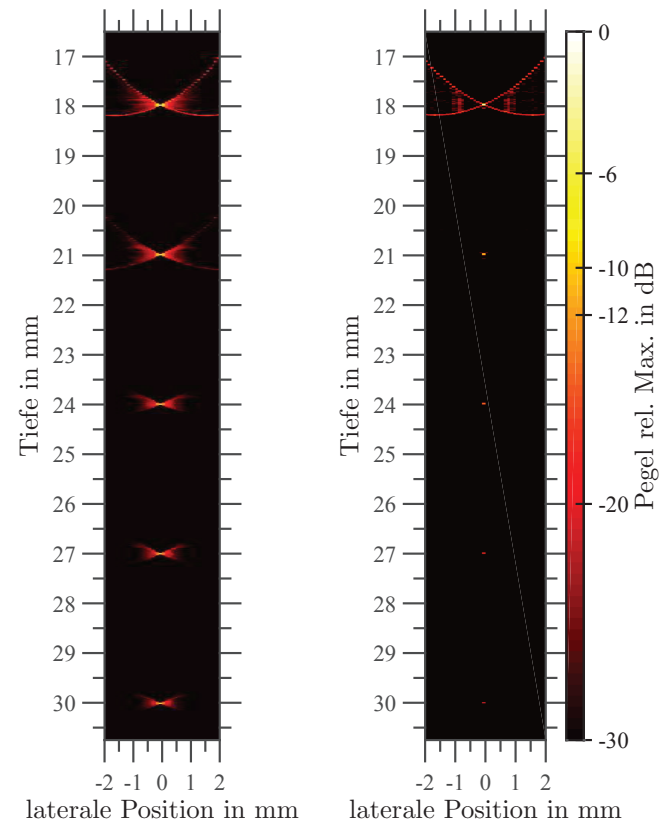


Abbildung 7: Gegenüberstellung der Bilder nach DAS- (links) und PSF-SAFT-Verfahren (rechts).

Zusammenfassung und Ausblick

Das modellgestützte PSF-SAFT-Verfahren zur Fokussierung mit synthetischer Apertur wurde vorgestellt. Es konnte gezeigt werden, dass das PSF-SAFT-Verfahren gegenüber dem bekannten DAS-Verfahren zu erheblichen Verbesserungen des Ortsauflösungsvermögens im Bild führt. Grund hierfür ist die Anwendung eines maßgeschneiderten Filterkerns, der aus einer Simulation der Messstrecke gewonnen wird.

Das PSF-SAFT-Verfahren kann auf punktförmige Reflektoren in Wasser angewendet werden. In einem nächsten Schritt wird das Auswerteverfahren für die Untersuchung von Werkstückproben erweitert. Der Filterkern wird dabei über eine FE-Simulation generiert.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung dieser Forschungsarbeit durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB/TR 39 PT-PIESA (Teilprojekt C09).

Literatur

- [1] Frazier CH, O'Brien WD: Synthetic Aperture Techniques with a Virtual Source Element. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 45 (1998), 196-207
- [2] Passmann C, Ermert H: A 100 MHz ultrasound imaging system for dermatologic and ophthalmologic diagnostics. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 43 (1996), 545-552
- [3] Rupitsch SJ, Maier F, Zagar BG: Synthetic Aperture Focusing Technique in High-Frequency Ultrasound Imaging to Locate Layer Delamination. *IEEE IMTC 2006*, 1953-1958
- [4] Soumekh M: *Synthetic Aperture Radar Signal Processing*. John Wiley & Sons, New York, 1999
- [5] Opretzka J, Vogt M, Ermert H: A Model-Based Synthetic Aperture Image Reconstruction Technique for High-Frequency Ultrasound. *2009 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings 2009*, 377-380
- [6] Rupitsch SJ, Nierla M: Efficient Numerical Simulation of Transducer Outputs for Acoustic Microscopy. *IEEE Sensors*, 2014, 1656-1659