# Schichtdickenbestimmung mit Ultraschall bei unbekannten Schallgeschwindigkeiten

Elfgard Kühnicke, Sebastian Kümmritz, Mario Wolf

*TU Dresden, Fakultät Elektrotechnik, 01062 Dresden, E-Mail: elfgard.kuehnicke@tu-dresden.de*

## Einleitung

In der Zerstörungsfreien Prüfung werden Schichtdicken meist aus der Laufzeit des von der Rückwand reflektierten Signals (Impuls-Echo-Verfahren) bestimmt. Dabei wird die Schallgeschwindigkeit als bekannt vorausgesetzt. Sind beide Größen unbekannt, ist deren simultane Bestimmung nur bei bekannten Abständen von Sender und Reflektor bzw. Sender und Empfänger möglich. Bei tomographischen Verfahren [1], [2] wird eine Vielzahl von Ultraschallköpfen um das Messvolumen angeordnet. Aus den Empfangssignalen unterschiedlicher Laufwege lässt sich mit Hilfe der inversen Radon-Transformation die Schallgeschwindigkeitsverteilung im Messvolumen rekonstruieren. Tomographische Verfahren sind mit einem enormen messtechnischen Aufwand verbunden (exakte Positionierung einer Vielzahl von Wandlern, Probleme mit der numerischen Stabilität der Rücktransformation) und aufgrund der notwendigen, allseitigen Zugänglichkeit in ihrer Anwendbarkeit stark eingeschränkt. Bei dem Verfahren in [3] wird zur simultanen Bestimmung von Dicke und Schallgeschwindigkeit einer Platte diese in der Messstrecke zwischen zwei Ultraschallköpfen oder einem Ultraschallkopf und einem Reflektor positioniert. Die Länge der Messstrecke und die Schallgeschwindigkeit des Mediums in der Messstrecke sind bekannt. Aus den Laufzeiten verschiedener reflektierter und transmittierter Signale lassen sich die unbekannten Größen bestimmen. Dieses invasive Verfahren ist nur für kleine, nicht eingebaute Teile anwendbar.

Dieser Beitrag beschreibt ein neues, nicht-invasives Verfahren mit nur einem Ultraschallarray zur Schichtdickenbestimmung von geschichteten Körpern mit unbekannten Schallgeschwindigkeiten. Als Auswertemethode wird die zeitverzögerte Überlagerung der Signale - die „Fokussierungsmethode“ - vorgestellt. Im Ausblick wird auf die Möglichkeit der Bestimmung von Verzögerungszeiten mit Hilfe von Schallfeldberechnungen eingegangen.

## Messidee

In [4] wird ein neuartiges, nicht-invasives Verfahren zur Messung der ortsaufgelösten Schallgeschwindigkeit in Medien mit Streuern vorgestellt. Das Echosignal der Rückwand oder eines eingebrachten Vergleichsreflektors in einem bekannten Abstand wird nicht benötigt. Da das Schallfeld sowohl von den Schallkopfparametern als auch von der Schallgeschwindigkeit des Ausbreitungsmediums abhängt, kann die Fokuslage als zweite Messgröße genutzt werden.

Diese Idee wird auch in [5] zur simultanen Bestimmung von Schichtdicke und Schallgeschwindigkeit von Platten genutzt. Der Autor verwendet ein Ultraschallmikroskop mit einem fokussierenden Schallkopf bei einer Mittenfrequenz von 75 MHz. Der Schallkopf wird im Wasserbad vertikal bzgl. der Probe verschoben, um den Fokus an verschiedenen Stellen zu positionieren (Abb.1). Da die Fokusausdehnung gering ist, kann davon ausgegangen werden, dass das Maximum im Reflexionssignal auftritt, wenn sich der Fokus auf der Reflexionsfläche befindet (Abb.1 rechts). Die notwendige Verschiebung des Schallkopfes bei Fokussierung auf die Vorder- bzw. Rückwand der Platte (Pos. 2 und Pos. 3) wird bestimmt. Aus dem Abstand zwischen den zwei Schallkopfpositionen und der Laufzeit zwischen Vorder- und Rückwand, die von der Schallkopfposition unabhängig ist, stehen zwei Messgrößen zur Verfügung, um Schichtdicke und Schallgeschwindigkeit gleichzeitig zu bestimmen. (Es sei bemerkt, dass die notwendige Verschiebung bei Platten gleicher Dicke, aber anderer Schallgeschwindigkeit, unterschiedlich ist.) Zur Auswertung wurden Kalibriermessungen an Platten bekannter Dicke und bekannter Schallgeschwindigkeit durchgeführt.

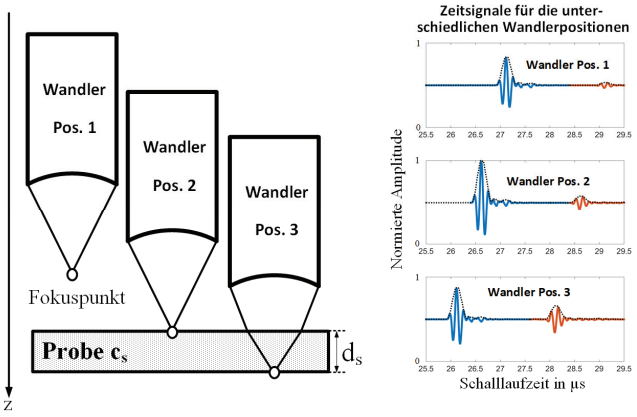



**Abbildung 1:** Messprinzip zur simultanen Dicken und Schallgeschwindigkeitsbestimmung mit einem fokussierenden Schallkopf

Um die Fokusposition zu variieren, ohne den Wandler zu verschieben, wird in diesem Beitrag ein Ultraschall-Annular-Array (Abb. 2) mit 6 ringförmigen Elementen verwendet. Jedes Element wird separat durch Pulse angeregt und die Echosignale werden auf allen Elementen einzeln empfangen. Damit ergeben sich 36 verschiedene Sende-Empfangs-Kombinationen und folglich auch 36 verschiedene Zeitsignale.

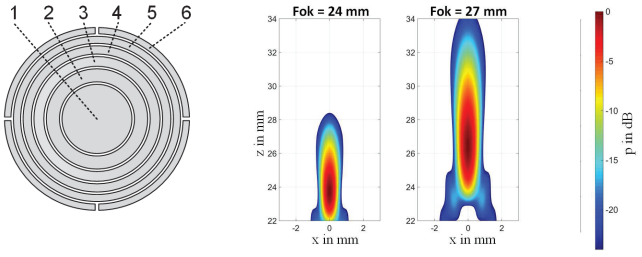



**Abbildung 2:** Fokussierung mit einem Annular-Array

Abb. 3 zeigt Schallfelder, die mit Hilfe von GREEN’schen Funktionen und einer Punktquellensynthese [6] berechnet

wurden, für das verwendete Array bei Einschallung in Platten aus unterschiedlichem Material. Da in allen Fällen über einen Wasservorlauf von 20 mm eingeschallt und die gleiche Fokussierungseinstellung verwendet wird, liegen gleiche Arrayparameter vor. Die Abbildung macht deutlich, dass das Schallfeld und insbesondere die Fokuslage (Lage des Maximums) von der Schallgeschwindigkeit der Probe abhängt.

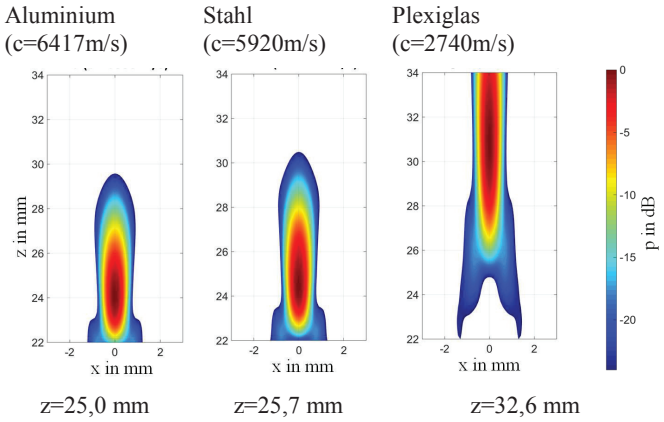



**Abbildung 3:** Berechnete Schallfelder für ein Annular-Array ($f$=6MHz, Punktfokussierung Fok(c=5920m/s) = 26mm) in Stahl, Aluminium und Plexiglas nach einem Wasservorlauf von 20mm runter

## Methode 1 – „Fokussierungsmethode“

Methode 1 beruht auf einer Überlagerung der 36 aufgenommenen Zeitsignale entsprechend geometrisch berechneter Verzögerungszeiten. Dazu wird der Schalllaufweg mit Hilfe eines Strahlengangs vom Schwerpunkt des Sendeelements (S) über den Reflektor zum Schwerpunkt des Empfangselements (E) bestimmt und eine Verzögerungszeitmatrix aufgestellt:

$$\Delta t_{SE} = \begin{pmatrix} \Delta t_{11} & \Delta t_{12} & \cdots & & \Delta t_{16} \\ \Delta t_{21} & \Delta t_{22} & \cdots & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ \Delta t_{61} & \Delta t_{62} & \cdots & & \Delta t_{66} \end{pmatrix}$$

Zur Fokussierung entlang der akustischen Achse des Arrays (Abb. 4 links) wird die Laufzeit vom Ausgangspunkt des jeweiligen Elementes zum angestrebten Fokuspunkt berechnet („Punktfokussierung“). Wird auf unterschiedlichen Elementen gesendet und empfangen, sind Einfalls- und Ausfallswinkel nicht mehr gleich und der angenommene Laufweg über den Fokuspunkt auf der Achse genügt nicht dem FERMAT’schen Prinzip. Für den kürzesten Laufweg befindet sich der Reflexionsort außerhalb der Achse (Abb. 4 rechts). Entsprechend lassen sich statt der herkömmlichen „Punktfokussierung“ auch Zeiten für eine „Flächenfokussierung“ angeben. Bei der „Flächenfokussierung“ wird für jedes Paar von Sender und Empfänger der Schalllaufweg verwendet, der dem FERMAT’schen Prinzip genügt. Es sei bemerkt, dass diese zeitverzögerte Überlagerung der Signale keine herkömmliche Fokussierung ist und hier nur als Bezeichnung für die Verzögerungszeitmatrix eingeführt wird.

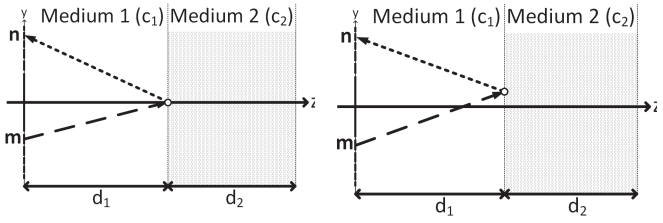



**Abbildung 4:** Punkt- und Flächenfokussierung Prinzip

Bei Fokussierung mit einem Array wird anstelle der Schallkopfverschiebung die Amplitude in Abhängigkeit des verwendeten Verzögerungszeitregimes ausgewertet. Ein Verzögerungszeitregime entspricht dem Satz an Verzögerungszeiten für die Fokussierung in eine bestimmte Tiefe bei der verwendeten Bezugsschallgeschwindigkeit $c_{Fok}$. Die zwei Parameter, angestrebte Fokusposition und Bezugsschallgeschwindigkeit, können frei gewählt werden.

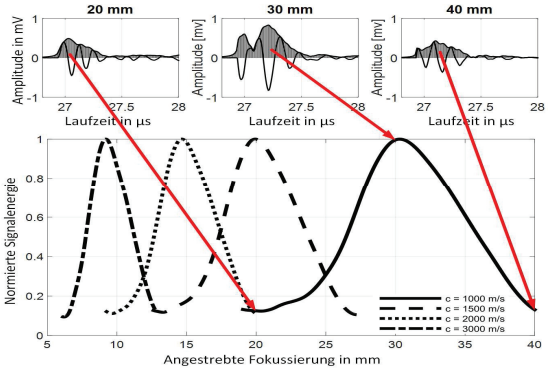



**Abbildung 5:** Fokussierungskurven für unterschiedliche Bezugsschallgeschwindigkeiten $c_{Fok}$ (unten); Ermittlung der Fokussierungskurve für $c_{Fok}$=1000m/s durch Ermittlung der Signalenergie bei unterschiedlichen Fokuspositionen (oben)

Bei der Fokussierungsmethode wird zunächst eine Schallgeschwindigkeit festgelegt und die Fokusposition variiert. Abb. 5 (oben) zeigt die Echosignale für eine Bezugsschallgeschwindigkeit von 1000 m/s bei der Fokussierung auf 20, 30 und 40 mm. Die Signalenergie wird als Funktion der angestrebten Fokusposition aufgetragen (Abb. 5, unten) und liefert die Fokussierungskurve. Für den dargestellten Fall ergibt sich das Maximum in der Fokussierungskurve bei 30,8 mm, d.h., wenn das Medium eine Schallgeschwindigkeit von 1000 m/s hätte, befände sich der Reflektor im Abstand 30,8 mm.

Im nächsten Schritt wird die Schallgeschwindigkeit variiert und jeweils eine Fokussierungskurve bestimmt (Abb. 5 unten). Jede Kurve liefert ein Wertepaar aus Schallgeschwindigkeit und zugehörigem Abstand. Die aus acht solchen Paaren bestimmte Kurve (Abb. 6, gepunktete Linie) zeigt den Reflektorabstand als Funktion der Bezugsschallgeschwindigkeit. Die Laufzeit innerhalb der Schicht liefert eine zusätzliche Information (durchgezogene Linie), sodass Schallgeschwindigkeit und Dicke aus dem Schnittpunkt beider Kurven simultan bestimmt werden können.

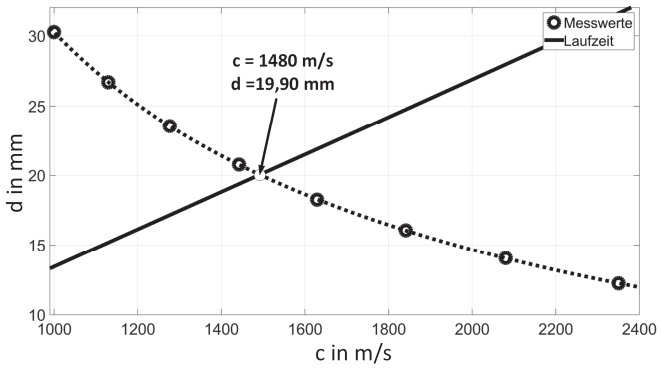



**Abbildung 6:** Simultane Bestimmung von Schallgeschwindigkeit und Schichtdicke.

Das Verfahren wurde an zweischichtigen Systemen, bestehend aus einem Wasservorlauf von 20 mm (erste Schicht) und einer Stahl- bzw. Aluminiumplatte mit Dicken von 6 mm bis 14 mm (zweite Schicht), getestet [7]. Die für die erste Schicht bestimmten Schallgeschwindigkeiten und Schichtdicken weichen bei der „Flächenfokussierung“ um maximal 0,34 % von den tatsächlichen Werten ab. Bei der Punktfokussierung sind die bestimmten Schallgeschwindigkeiten um ca. 5 m/s größer. Die besten Werte für die zweite Schicht wurden bei Verwendung der Verzögerungszeiten auf der Diagonalen erreicht. Zwischen neuem und konventionellem Verfahren wurde eine Differenz von bis zu 3% festgestellt.

Zwar konnten mit den optimierten Ansteuerzeiten für die Stahl- und Aluminiumplatten gute Ergebnisse erzielt werden, jedoch beruhen die Verzögerungszeiten auf rein geometrischen Betrachtungen, da nur mit einem Strahl, der am Element angeheftet ist, gerechnet wird. Je nach Ausgangspunkt des Strahls ergeben sich unterschiedliche Laufzeiten. Schallfeldsimulationen zeigen folgende Probleme auf, die die erzielbare Genauigkeit einschränken und die Vermessung von weiteren Schichten erschweren:

- Der Brechungswinkel hängt von der Elementgröße und der Frequenz ab, wodurch sich mit dem FERMAT’schen Prinzip nicht die richtigen Brechungswinkel ergeben. Entsprechend weicht der bei der Fokussierung angestrebte Fokusort vom tatsächlich erreichten Ort des Schallfeldmaximum ab.
- Bei anderen Materialien kann es zu größeren Fokusausdehnungen kommen (s. Abb. 3, Plexiglas) was zu einer Abnahme der Genauigkeit führt.
- Die Lage des Maximums hängt nicht nur von der Dicke und Schallgeschwindigkeit der einzelnen Schichten ab, sondern auch von ihrer Reihenfolge.

Deshalb sind Schallfeldberechnungen unbedingt erforderlich, um bei der Auswertung die Welleneigenschaften zu berücksichtigen. Durch das oben beschriebene Vorgehen bei der simultanen Bestimmung von Schallgeschwindigkeit und Schichtdicke lassen sich aber keine einfachen Korrekturfunktionen erstellen. Deshalb wird eine zweite Auswertungsmethode untersucht.

## Methode 2 – Signalauswertung

Um die Möglichkeiten einer anderen Signalauswertung aufzuzeigen, werden die einzelnen, nicht überlagerten Empfangssignale betrachtet.

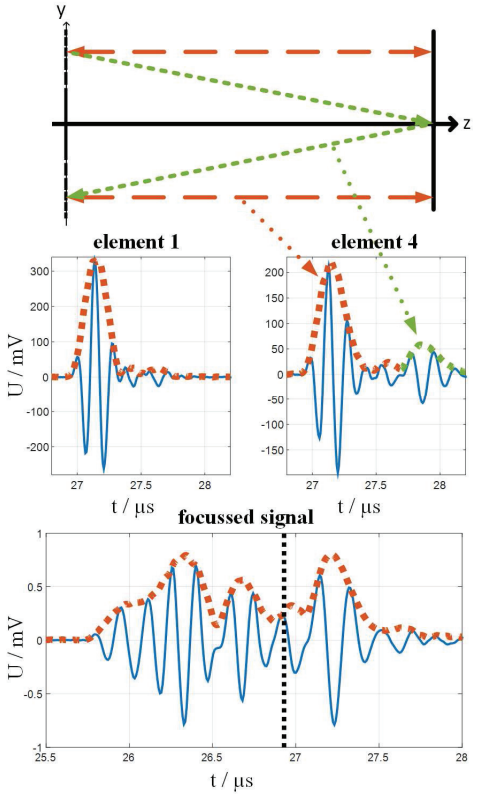



**Abbildung 7:** Signale für unterschiedliche Ausbreitungswege (Mitte) und zeitverzögert überlagertes Signal

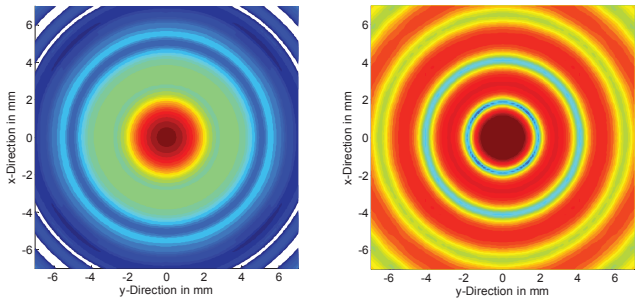
Abb. 7 (Mitte) zeigt die Echosignale $S_{11}$ (Element E1 sendet und empfängt) und $S_{44}$ (Element E4 sendet und empfängt) von einem 20 mm entfernten Reflektor. Das Echosignal des Mittelelements hat nur einen Signalanteil, während das Echosignal von Element 4 aus zwei Anteilen besteht. Den Signalanteilen können verschiedene Laufwege zugeordnet werden. Beim Mittelelement tritt nur der direkte, kurze Laufweg mit Senkrechteinfall auf. Für Element E4 gibt es den direkten Laufweg und einen schrägen Laufweg mit spiegelnder Reflexion von einer Ringseite zur gegenüberliegenden Ringseite (siehe Abb. 7 oben). Der direkte Laufweg tritt immer auf, wenn Sender und Empfänger das gleiche Element sind. Er ist bei allen Elementen gleich lang, sodass die Signalanteile für den direkten Laufweg bei allen Elementen zeitgleich ankommen. Wenn das Mittenelement sendet und die anderen Elemente empfangen treten nur die schrägen Laufwege auf. Bei einer Fokussierung werden die Signalanteile der schrägen Laufwege überlagert (Abb.7c, Signalanteil rechts neben der senkrechten Linie). Die früher ankommenden Signalanteile vom direkten Weg (links neben der gepunkteten Linie) stören die Auswertung.

Die Überlagerung der zweiten Signalanteile bei Punkt- bzw. Flächenfokussierung legt nahe, die Laufzeit zwischen erstem und zweitem Signalanteil zu bestimmen und daraus gleich

Verzögerungszeiten zu gewinnen. Dieser Ansatz wird in [8] vorgestellt.

## Ausblick - Auswertung der Laufzeitdifferenzen mit Schallfeldsimulationen

Schallfeldsimulationen sollen genutzt werden, um die Verzögerungszeiten unter Berücksichtigung des Wellencharakters zu berechnen. Dazu wird das harmonische Schallfeld für die jeweilige Prüfsituation auf dem Empfänger berechnet und die Phasen ausgewertet. Abb. 8 zeigt typische Amplitudenverteilungen des Rückwandechos von einer 10 mm dicken Stahlplatte bei einem Wasservorlauf von 20 mm für die Elemente E1 bzw. E6 als Sender.




Sender: E1, Reflexion an Vorderwand

Sender: E6, Reflexion an Rückwand der 10mm Stahlplatte

**Abbildung 8:** Typische Amplitudenverteilungen auf dem gesamten Empfänger für das Echo von einer Stahlplatte bei einem Wasservorlauf von 20mm

Abb. 9 zeigt, dass sich die Plattendicke deutlich in der Phase widerspiegelt. Aktuelle Arbeiten beschäftigen sich damit, aus der Phasenlage Laufzeiten zu bestimmen, die z.B. direkt zur Auswertung mit Methode 2 zu nutzen sind.

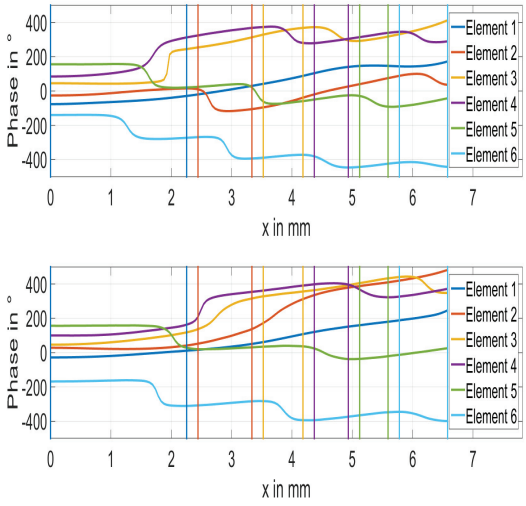



**Abbildung 9:** Phasenlage auf dem gesamten Empfänger für das Rückwandecho von einer Stahlplatte bei einem 20mm Wasservorlauf bei unterschiedlichen Elementen als Sender für eine 6mm (oben) und eine 10mm (unten) dicke Platte

## Literatur

[1] T. M. Deck, T. O. Müller, R. Stotzka, and H. Gemmeke. Rekonstruktion von Geschwindigkeits- und Absorptionsbildern eines Ultraschall-Computertomographen. In Bildverarbeitung für die Medizin 2003, 2003.

[2] S.-H. Huang and P.-C. Li. Computed Tomography Sound Velocity Reconstruction Using Incomplete Data. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 51(3):329–342, 2004.

[3] D. K. Hsu and M. S. Hughes. Simultaneous ultrasonic velocity and sample thickness measurement and application in composites. Journal of the Acoustical Society of America, 92(2):669–675, 1992.

[4] M. Lenz, M. Bock, E. Kühnicke, J. Pal, and A. Cramer, Measurement of the sound velocity in fluids using the echo signals from scattering particles, Ultrasonics (2011); DOI: 10.1016/j.ultras.2011.07.003

[5] N. Gust. Verbesserung der Signalauswertung für die Ultraschallmikroskopie. PhD thesis, TU Dresden, 2011.

[6] Kühnicke, E. Elastische Wellen in geschichteten Festkörpersystemen: Modellierungen mit Hilfe von Integraltransformationsmethoden; Simulationsrechnungen für Ultraschallanwendungen, Schriftenreihe der TIMUG Technologie in Medizin und Gesundheitswesen e.V., Bonn 2001, ISBN 3-934244-01-7.

[7] S. Kümmritz, M. Wolf, E. Kühnicke, Simultane Bestimmung von Dicken und Schallgeschwindigkeiten geschichteter Strukturen, tm – Technisches Messen 82/3, (2015).

[8] M. Wolf, S. Kümmritz, E. Kühnicke Verbesserung der Signalauswertung bei der Untersuchung mehrschichtiger Strukturen mit Annular-Arrays, DAGA 2015

**Acknowledgement:** Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung des Projektes KU1075/14-1.