

Neue Auswertekriterien für das Impuls-Echo-Verfahren

Elfgard KÜHNICKE*, Norbert GUST***, Michael LENZ*

* Institut für Festkörperelektronik, TU-Dresden, Helmholtz Straße 18, 01069 Dresden

** Institut für Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik, TU-Dresden
elfgard.kuehnicke@ias.et.tu-dresden.de

Kurzfassung. Werden beim Impuls-Echo-Verfahren neben der Laufzeit und der Amplitude weitere Informationen des reflektierten Schallfeldes ausgenutzt, lassen sich neue Ultraschallmessverfahren realisieren. In diesem Beitrag werden drei verschiedene Verfahren vorgestellt: ein nicht-scannendes Verfahren zur Krümmungsmessung, ein Verfahren zur gleichzeitigen Bestimmung von dem Abstand des Reflektors und der Schallgeschwindigkeit sowie ein Verfahren zur Größenbestimmung von kleinen Reflektoren. Bei dem nicht-scannenden Verfahren zur Krümmungsmessung werten wir Phasendifferenzen auf einem strukturiertem Empfänger aus. Die Bestimmung der Fokuslage ist neben der Laufzeit eine zweite Messgröße, um den Abstand des Reflektors und die Schallgeschwindigkeit gleichzeitig zu bestimmen. Die Richtcharakteristik liefert bei nicht-axialem Schalleinfall Informationen zu Größe und Form von Reflektoren, die kleiner als die Schallbündelbreite sind. Damit lässt sich die laterale Auflösung wesentlich verbessern.

1. Einführung

Bei den konventionellen Ultraschall-Echo-Verfahren wird meistens nur die Signallaufzeit ausgewertet. Die Höhe der Echoamplitude wird teilweise zur Abschätzung der Größe des Reflektors, z.B. beim AVG-Verfahren, oder zu Aussagen über den Impedanzunterschied zwischen zwei aneinandergrenzenden Materialien, z.B. zum Auffinden von Hohlräumen und Delaminationen, genutzt. Die in der Schalldruckverteilung und Phasenlage auf dem Empfänger enthaltenen Informationen über den Reflektor und die durch die vom Ausbreitungsmedium bestimmte Fokuslage werden kaum ausgewertet.

Dieser Beitrag zeigt, wie durch Ausnutzung der Informationen des reflektierten Schallfeldes neue Ultraschallmessverfahren realisierbar werden.

2. Messung des Krümmungsradius eines Reflektors mit einem nichtscannenden Verfahren

Bisher wird die Krümmung einer reflektierenden Grenzfläche durch Abscannen der Fläche und Auswertung der Laufzeit, einem B-Bild, bestimmt. Bei Entfernung vom Scheitelpunkt der gekrümmten Fläche kommt es dazu, dass das Feld so abgelenkt wird, dass es den Empfänger nicht mehr trifft bzw. die am Empfänger ankommende Energie sehr gering ist. Durch die Ausdehnung des Schallbündels kommt es außerdem in den peripheren Teilen der Grenzfläche zu einer Signalverlängerung, was zu fehlerhafter Laufzeitmessung führt. Bei diesem Verfahren handelt es sich also um eine topographische, nicht scharfe Abbildung der

Grenzfläche, und eine Bestimmung des Krümmungsradius aus dieser Abbildung ist nur sehr grob möglich. Im Rahmen der laufenden Forschung wird ein Messverfahren untersucht, das bei fester Positionierung und Normaleinschallung die Krümmung sehr genau aus den Informationen des reflektierten Schallfeldes bestimmt.

2.1 Messprinzip

Im reflektierten Schallfeld spiegelt sich die Form und Größe des Reflektors wider. Bei gleichem einfallenden Schallfeld (gleicher Wandler bei gleicher Fokussierung, gleiches Ausbreitungsmedium, gleicher Reflektorabstand, gleiche Einschallrichtung bzgl. der Reflektoroberfläche) wird das von einem Kugelreflektor reflektierte Schallfeld umso divergenter, je kleiner der Krümmungsradius ist, was sich in unterschiedlichen Schalldruckverteilungen auf dem Empfänger widerspiegelt. Außerdem ändert sich in Abhängigkeit vom Krümmungsradius die Signalform bzw. bei mehreren Wellenzügen die Amplitude und Phase auf den einzelnen Punkten des Empfängers [1, 2].

Zur Bestimmung dieser Schallfeldinformationen wird ein Annular-Array verwendet, das eine grobe Abtastung des reflektierten Signals durch Auswertung der Signale auf den einzelnen Ring-Elementen zulässt.

2.2 Bestimmung des Kugelradius des Reflektors durch Variation des einfallenden Schallfeldes

Abb. 1 zeigt die Schalldruckverteilung auf dem Empfänger bei verschiedenen Fokussierungen F für zwei Kugeln mit den Radien $r = 10$ mm und $r = 8$ mm als Reflektoren bei einem Abstand von 10 mm vom Array entfernt. In Abhängigkeit vom Krümmungsradius und der Fokussierung ändert sich die Schalldruckverteilung auf dem Empfänger in charakteristischer Weise. Bis zu einem Fokusabstand von etwa $F = 15$ mm hat der Schalldruck sein Maximum im Zentrum des Empfängers. Bei schwächerer Fokussierung (größerer Fokusabstand) wandert das Maximum nach außen.

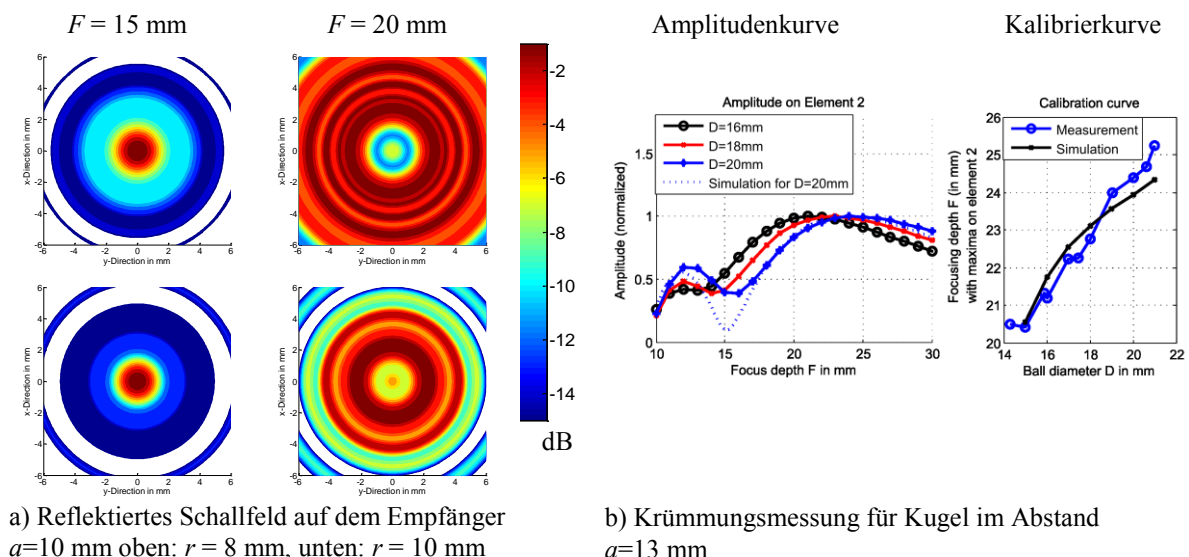


Abb. 1 Bestimmung des Krümmungsradius eines Kugelreflektors mit dem Radius r im Abstand a für unterschiedliche Fokussierungen F

Der Vergleich der Felder für die Reflektoren $r = 10$ mm und $r = 8$ mm zeigt, dass das Schallfeld für den kleineren Reflektor ($r = 8$ mm) divergenter ist als das für den größeren Reflektor. Deshalb tritt das Maximum beim kleineren Reflektor bei einem kleineren

Fokusabstand auf, und der Wechsel des Maximums vom Zentralelement zu den äußeren Elementen erfolgt bei kleineren Fokusabständen (Amplitudenkurve Abb.1b). Somit ist die Fokusslage, bei der ein Maximum auftritt, ein mögliches Kriterium zur Bestimmung des Radius eines Kugelreflektors.

Abb. 1b zeigt Amplitudenkurven - gemessene und berechnete Schalldruckamplituden auf dem 2.Element (Elementnummerierung: siehe Abb. 2a) als Funktion der Fokustiefe - für Reflektoren in einem Abstand von 13 mm vom Array. Wie erwartet tritt für größere Reflektorradien das Maximum auf dem Empfänger bei größeren Fokusabständen auf. Die mithilfe der gemessenen oder simulierten Amplitudenkurven (Abb. 1b links) erstellten Kalibrierkurven (Abb. 1b rechts) ermöglichen es, aus der gemessenen Amplitudenkurve für einen unbekanntem Reflektor den Krümmungsradius zu bestimmen. Da die Amplitudenkurven auch vom Reflektorabstand abhängen, ist es vorher nötig, den Abstand des Reflektors aus einer Laufzeitmessung zu ermitteln.

2.3 Auswertung der Phase

Die Phase auf dem Empfangselement wird durch die Länge des Schallweges und die Interferenz der Wellenanteile, die das Empfangselement treffen, bestimmt. Strahlengeometrisch wird das mithilfe von Abb. 2a veranschaulicht. So vergrößert sich der Schallweg für die von der Kugelperipherie reflektierten Signale bei gleichem Abstand zwischen Kugel und Ultraschallwandler mit abnehmendem Krümmungsradius. In Abhängigkeit vom Krümmungsradius des Reflektors kommen auch Wellenanteile mit anderen Winkeln auf dem Empfangselement an.

Die Abbildungen 2b und 2c zeigen die ermittelten Phasendifferenzen zwischen den Empfangselementen 1 und 4, wobei jeweils mit dem inneren Element 1 gesendet wird.

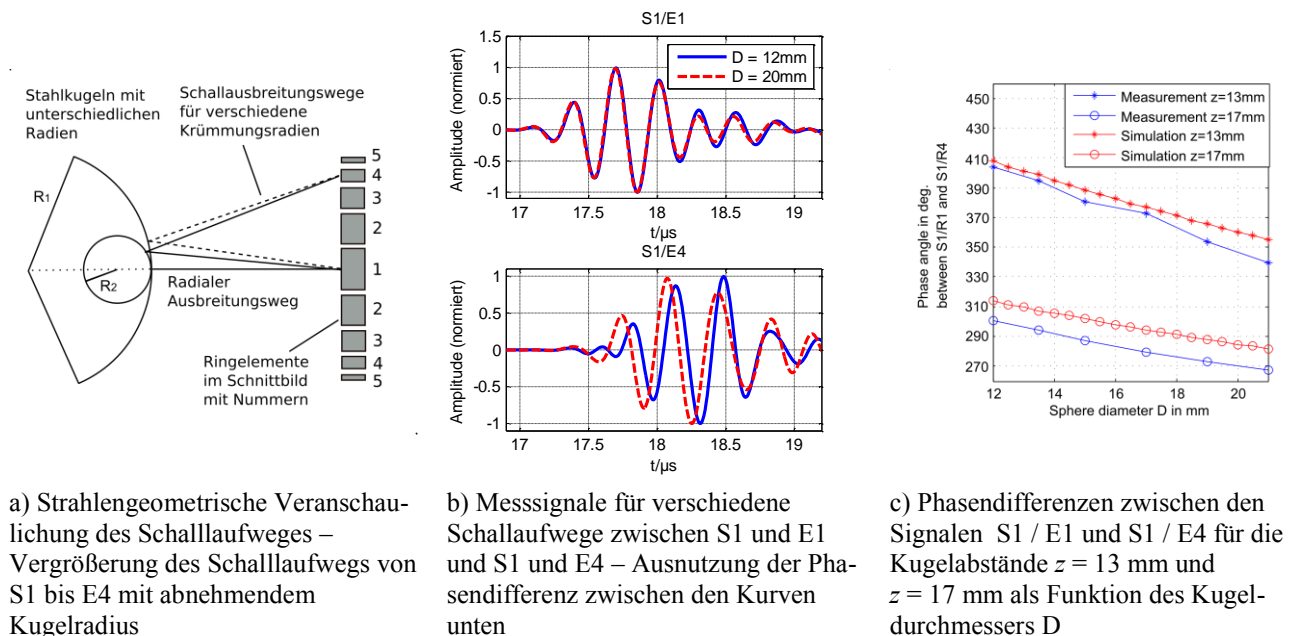


Abb.2: Bestimmung des Reflektordurchmessers mit dem Phasendifferenzverfahren bei der Reflexion an Kugeln mit den Durchmessern D für Sendeelement 1 (S1) und Empfängerelemente 1 und 4 (E1, E4)

3. Gleichzeitige Messung von Schallgeschwindigkeit und Dicke einer Schicht

Beim Impuls-Echo-Verfahren dient die gemessene Schalllaufzeit entweder zur Bestimmung des Reflektorabstandes oder zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit, wobei eine der beiden Größen als bekannt vorausgesetzt wird. Typische Anwendungsbeispiele, bei denen die Schallgeschwindigkeit als bekannt vorausgesetzt wird, sind die Wanddickenmessung und die Bestimmung der Fehlstellenlage in der Zerstörungsfreien Prüfung. Zur Materialcharakterisierung wird bei bekannter Schichtdicke aus der Laufzeit die Schallgeschwindigkeit von Longitudinal- und Transversalwellen bestimmt. Aus den beiden Schallgeschwindigkeiten lassen sich verschiedene Materialparameter bestimmen. Auch bei den scannenden Bildverfahren dient die Laufzeit zur Bestimmung des Reflektorabstandes, der an den verschiedenen Positionen die Kontur von verdeckten Strukturen liefert. Eine gleichzeitige Bestimmung der Schallgeschwindigkeit und des Abstandes wäre wünschenswert, da damit bei unbekannter Schichtdicke eine Materialcharakterisierung, bei unbekannter Schallgeschwindigkeit eine genauere Abstandsbestimmung und eine Rekonstruktion von mehrschichtigen Proben möglich wird.

Die bekannten technischen Messverfahren benötigen zur gleichzeitigen Messung von Schallgeschwindigkeit und Reflektorabstand entweder einen externen Referenzreflektor oder einen Empfangswandler an einer bekannten Position.

3.1 Messprinzip

Hier soll ein Verfahren vorgestellt werden, dass neben der Laufzeitmessung als zweite Messgröße die Fokusposition verwendet und damit die gleichzeitige Messung von Schallgeschwindigkeit und Reflektorabstand ermöglicht. Fokuspositionen Fok in unterschiedlichen Medien lassen sich entsprechend ihrer Schallgeschwindigkeiten c

$$\frac{Fok_{Med1}}{Fok_{Med2}} \approx \frac{c_{Med2}}{c_{Med1}} \quad (1)$$

ineinander umrechnen. Das Messprinzip soll anhand der gleichzeitigen Bestimmung der Dicke einer Platte und der Schallgeschwindigkeit in ihr erläutert werden. Dabei arbeitet man in Tauchtechnik mit einem fokussierenden Schallkopf und verschiebt diesen vertikal zur Oberfläche der Platte bis man den Fokus auf ihrer oberen bzw. unteren Grenzfläche platziert hat, was durch das Maximum in der Echoamplitude erkennbar ist. Die Differenz der zwei Fokusposition ergibt eine Schichtdicke des Kalibriermediums Wasser, die mit der Schichtdicke d_{Med} und der Schallgeschwindigkeit der Probe entsprechend Formel (1) zusammenhängt.

$$\frac{d_{Med}}{d_{Wasser}} \approx \frac{c_{Wasser}}{c_{Med}} \quad (2)$$

Die Laufzeit t innerhalb der Platte liefert die zweite unabhängige Messgröße,

$$t = \frac{d_{Med}}{c_{Med}} \quad (3)$$

so dass mit Hilfe von Formel (2) und (3) die Schallgeschwindigkeit in der Probe

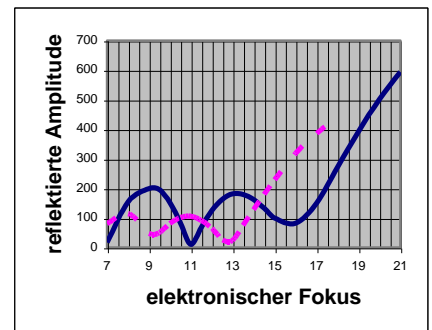
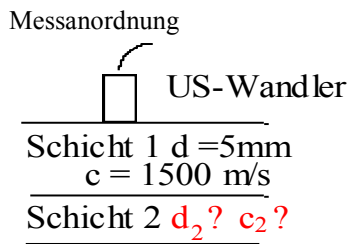
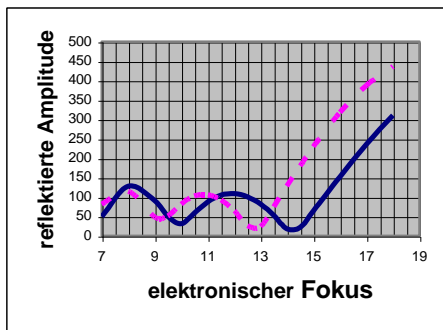
$$c_{Med} = \sqrt{\frac{d_{Wasser}}{t} c_{Wasser}} \quad (4)$$

und danach die Schichtdicke der Probe bestimmt werden kann. Es ist zu beachten, dass Formel (1) nur für das Schallfeld eines kreisrunden Schwingers im Halbraum gilt und somit eine Näherung ist. Außerdem tritt bei einer ausgedehnten Grenzfläche das Maximum im reflektierten Signal erst auf, wenn der Fokus hinter der Grenzfläche platziert wird. Deshalb funktioniert dieses Verfahren nur mit speziell angepassten Wandlern im Zusammenspiel

mit Simulationsrechnungen [5] und einer guten Kalibrierung. Die Genauigkeit wird durch die Verwendung von Kalibriermedien mit nicht stark abweichenden Schallgeschwindigkeiten erhöht. Für einen stark fokussierenden, hochfrequenten Schallkopf wird die experimentelle Funktionstüchtigkeit des Verfahrens der gleichzeitigen Bestimmung der Schallgeschwindigkeit und der Plattendicke in [5] demonstriert.

3.2 Messung von Schallgeschwindigkeiten und Schichtdicken in mehrschichtigen Festkörpersystemen mit einem Annular-Array

Durch Verwendung eines Annular-Arrays lässt sich bei festgehaltener Position des Wandlers der Fokus verschieben. Für jedes Fokusregime wird im Kalibriermedium die äquivalente Schichtdicke bestimmt, so dass auch bei Verwendung eines Arrays das Verfahren funktioniert, wobei zu beachten ist, dass sich mit zunehmendem Fokusabstand die Fokusfläche vergrößert und damit die Genauigkeit abnimmt. Da bei einer ausgedehnten Grenzfläche das Maximum im Signal erst auftritt, wenn der Fokus hinter der Grenzfläche platziert wird, lässt sich mit den üblich großen Elementen des Arrays die Fokuslage nicht bestimmen. Deshalb wird mit einem kleinen Empfänger (Zentralelement) gemessen [3]. Bei Darstellung der empfangenen Schalldruckamplitude als Funktion des Fokusabstandes treten bei Fokuslagen in der Nähe der reflektierenden Grenzfläche lokale Maxima und Minima auf, die zur Bestimmung der Schichtdicke verwendbar sind.



a) Kalibrierungskurven: Schalldruck auf dem Zentralelement bei unterschiedlichen Wasserschichtdicken a vor einer festen Wand; durchgezogene Linie: Abstand $a = 13\text{ mm}$; gestrichelte Linie: $a = 10\text{ mm}$

b) Amplitudenkurven: Reflexion von der hinteren Grenzfläche eines zweischichtigen Materials
1. Schicht: 5 mm Wasser
2. Schicht: gestrichelte Linie: 5 mm Gewebe, durchgezogene Linie: 5 mm Plexiglas

Abb. 3 Amplitudenkurven: Schalldruck auf dem Zentralelement
(Sender $d = 12\text{ mm}$, $f = 3\text{ MHz}$, Empfänger (Zentralelement) $d = 0.8\text{ mm}$)

Für die Simulationsrechnungen in Abb. 3 wurde ein Ringarray verwendet, das den Schall vor, auf und hinter der reflektierenden Grenzfläche fokussieren kann. Abb. 3a zeigt die Lage der lokalen Maxima und Minima in Abhängigkeit von der Fokussierung für das Ausbreitungsmedium Wasser bei einer Grenzfläche im Abstand 10 mm und 13 mm von dem Array entfernt. Aus diesen Kalibrierkurven lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Wasserschichtdicke vor der reflektierenden Wand und der elektronischen Fokussierung für die auftretenden lokalen Minima und Maxima feststellen. Beispielsweise befindet sich bei einer Wasserschichtdicke von 10 mm das letzte lokale Maximum bei einer elektronischen Fokussierung auf 10.5 mm und bei einer Wasserschichtdicke von 13 mm bei einer Fokussierung auf 12 mm. Die Tab. 1 zeigt den aus weiteren Kalibrierkurven gewonnenen Zusammenhang zwischen elektronischer Fokussierung und der Wasserschichtdicke.

Bei einer Schicht mit unbekannter Dicke und unbekannter Schallgeschwindigkeit wird schrittweise fokussiert und eine Amplitudenkurve als Funktion der elektronischen

Fokussierung aufgenommen (Abb. 3b). Dabei ergibt sich eine ähnliche Kurve wie in Wasser. Auch hier treten lokale Maxima und Minima auf. Abb. 3b zeigt die berechneten Kurven für zweischichtige Medien mit der hinteren Grenzfläche der 2. Schicht im Abstand 10 mm. Durch die von Wasser abweichenden Ausbreitungsgeschwindigkeiten verschieben sich die Lagen der Maxima und Minima. Für das zweischichtige Medium: 5mm Wasserschicht + 5mm Gewebe entnimmt man aus Abb. 3b die Lage des lokalen Maximums für $Fok = 10.9$ mm. Für das zweischichtige Medium: 5 mm Wasserschicht + 5 mm Plexiglasschicht ergibt sich das lokale Maximum bei $Fok = 12.7$ mm.

Tab. 1 Aus Kalibrierkurven ermittelter Zusammenhang zwischen Wasserschichtdicke z_w und elektronischer Fokussierung Fok für das letzte lokale Maximum

Abstand der Platte in Wasser z_w	9.0 mm	10.0 mm	11.0 mm	12.0 mm	13.0 mm	14.0 mm
Elektronische Fokussierung Fok bei lokalem Maximum	9.7 mm	10.5 mm	11.0 mm	11.5 mm	12.0 mm	12.8 mm

Mit Hilfe von Tab. 1 lässt sich der unbekanntem Schicht eine Wasserschichtdicke zuordnen und mit Formel (4) die Schallgeschwindigkeit ermitteln. Nachdem die Schallgeschwindigkeit ermittelt wurde, ergibt sich die Schichtdicke des Mediums aus Formel (2) oder (3). Tab. 2 zeigt die aus den berechneten Amplituden-Kurven für zweischichtige Medien ermittelten Schallgeschwindigkeiten und Schichtdicken.

Tab. 2 Aus Amplitudenkurven und Laufzeit berechnete Schichtdicke und Schallgeschwindigkeit für eine verdeckte Schicht

Tatsächliche Werte	Schicht 2 Gewebeschicht $d = 5\text{ mm}, c = 1620\text{ m/s}$	Schicht 2 Plexiglasschicht $d = 5\text{ mm}, c = 2730\text{ m/s}$
Messgrößen: Fokuslage für letztes lokales Maximum Fok + Laufzeit ↓	$Fok = 10.8\text{ mm}$ $t_{Med} = 3.09\text{ }\mu\text{s}$ ↓	$Fok = 12.7\text{ mm}$ $t_{Med} = 1.83\text{ }\mu\text{s}$ ↓
Ermittelte Werte	$d_2 = 5.1\text{ mm}, c_2 = 1649\text{ m/s}$	$d_2 = 4.94\text{ mm}, c_2 = 2697\text{ m/s}$

4. Ausnutzung der Richtcharakteristik zur Unterscheidung verschiedener Fehlerformen und zur Größenbestimmung bei Fehlern kleiner als die Schallbündelbreite

Wird wie bei der konventionellen Ultraschalltechnik lediglich die Laufzeit zur Bilderstellung genutzt und der Reflektor laufzeitproportional zur Anzeige gebracht, so bestimmt die Schallbündelbreite die Auflösung. Fehler kleiner als die Schallbündelbreite werden lateral gedehnt und im B-Bild gleich groß dargestellt. Die Größe solcher Fehler kann aus dem B-Bild nicht bestimmt werden.

Die grundlegende Idee für das neue Verfahren beruht auf dem Informationsgewinn aus dem Aussehen des rückgestreuten Schallfeldes. Dazu werden die Richtcharakteristik sowie die Form des empfangenen Signals als Funktion der Schallkopfposition ausgewertet. Die Variation des Sende-Schallfeldes z.B. durch Änderung der Senderposition in vertikaler und horizontaler Richtung und die Abtastung des reflektierten Schallfeldes, liefern Informationen über den Reflektor. Solche Ansätze setzen die genaue Kenntnis des reflektierten Schallfeldes, das von den Wandlerparametern, der konkreten Messsituation (Abstand des Reflektors, Material und Strukturierung des Messobjektes) und der Größe und Form der Einschlüsse abhängt, voraus. Simulationsrechnungen liefern das Schallfeld auf

dem Empfänger und ermöglichen somit eine optimale Strukturierung des Empfängers zur Abtastung des Schallfeldes und erlauben damit gezielte experimentelle Untersuchungen.

Als Beispiel werden hier erste Modellierungen für eine Prüfung in Tauchtechnik vorgestellt. Abb. 4 zeigt den Längsschnitt des Schallfeldes und den Querschnitt des SE-Feldes in 20mm Abstand von der Oberfläche im Festkörper. Wird ein Linienscan über verschieden große Kugelreflektoren in einer Tiefe $z = 20$ mm durchgeführt, so erscheinen Reflektoren bis zu einer Größe von etwa $r = 0.4$ mm ($\lambda = 0.3$ mm) im B-Bild gleich groß, als Linie von etwa 2mm (Abb. 4c). Sie wirken wie Punktreflektoren, und mit ihnen wird das Schallfeld lediglich abgetastet. Erst bei einem Kugelreflektorradius von ca. $r = 2$ mm zeigt sich eine merkliche Abweichung von der SE-Kurve.

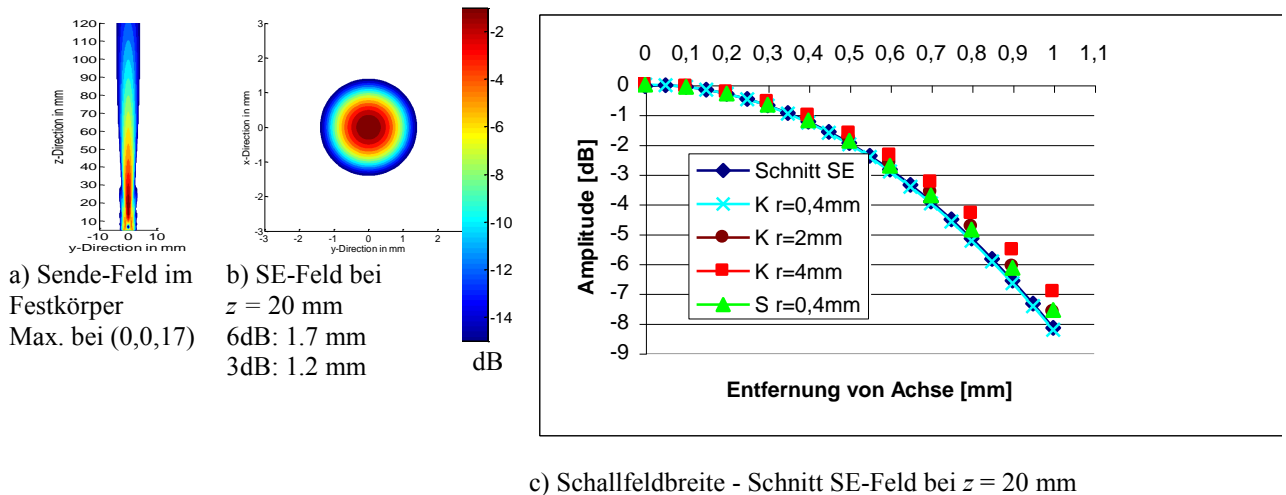
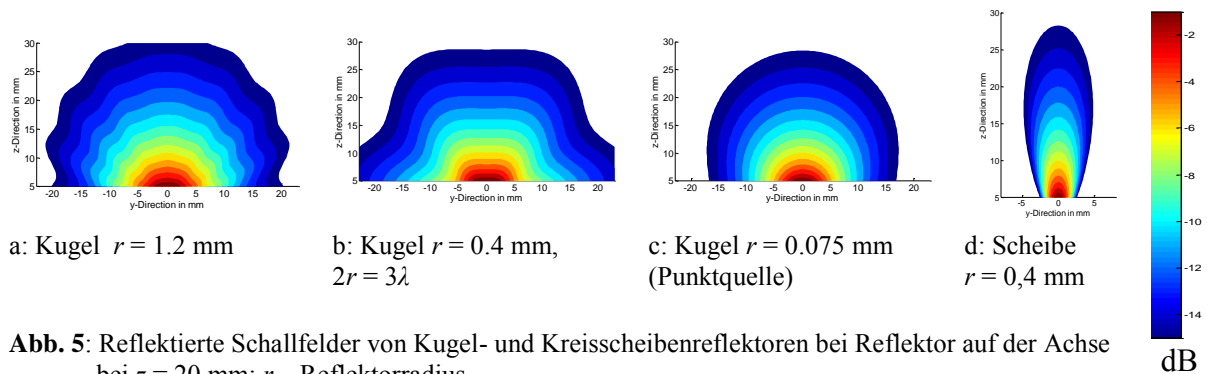


Abb.4: Längs- und Querschnitt des Schallfeldes im Festkörper für unfokussierten Schallkopf ($f = 20$ MHz, $d = 4.8$ mm) nach 20mm Wasservorlauf

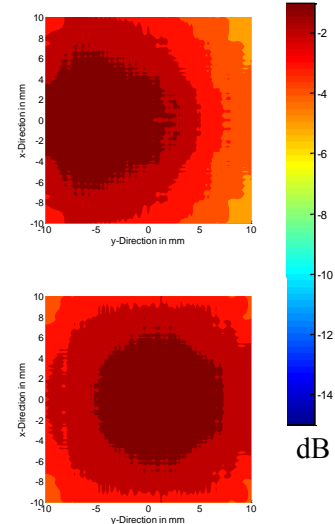
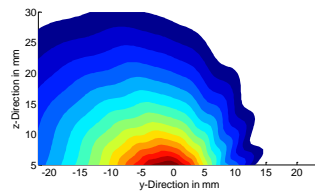
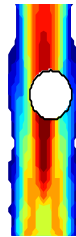


Da für die Kugelreflektoren (Abb. 5a–5c) auch bei Reflektorgrößen von mehreren Wellenlängen λ die Schallfelder dem Feld für Punktstreuer sehr ähnlich sind, ergeben sich bei Normaleinfall auf einem Empfänger nur geringe Schalldruckunterschiede, und deshalb lassen sich allein durch Ermittlung der Schalldruckverteilung auf einem ringförmig strukturierten Empfänger nur bedingt Informationen über die Richtcharakteristik gewinnen.

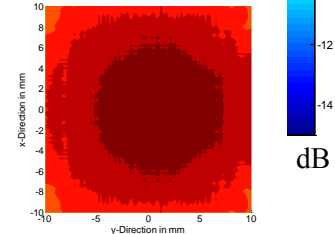
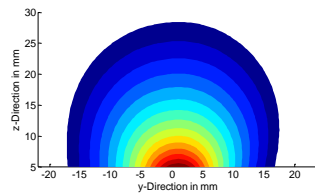
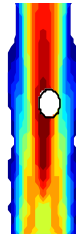
Anders verhält es sich bei nicht-normalem Schalleinfall. Abb. 6 zeigt, dass bei Kugelreflektoren am gleichen Ort in Abhängigkeit von der Reflektorgröße unterschiedliche Richtcharakteristiken bei der Rückstreuung entstehen. Bei einer Verschiebung der Kugelreflektoren um 1 mm auf der y-Achse, d.h. etwa auf die 6dB Isolinie des Schallfeldes, wird der große Kugelreflektor (obere Reihe von Abb. 6) unterschiedlich „ausgeleuchtet“ (linker

Rand mit 0dB, Mitte mit -6dB, rechter Rand -14 dB). Dadurch wird der Schall hauptsächlich von der linken Halbkugel reflektiert, während die rechte Hälfte nur einen geringen Beitrag zum Gesamtfeld liefert. Die Schalldruckverteilung auf dem Empfänger ist stark asymmetrisch. Der kleine Reflektor (2. Reihe von Abb. 6) befindet sich voll in der -6dB-Zone und wird damit fast gleichmäßig ausgeleuchtet. Auf dem Empfänger kommt es nur zu einer kleinen Verschiebung gegenüber dem symmetrischen Schalleinfall. Bei Verwendung eines nicht-symmetrisch segmentierten Empfängers lassen sich die beiden Reflektorgrößen unterscheiden. Damit sollte es mit Hilfe von strukturierten Empfängern bei einem Scan möglich sein, die Reflektorgröße von Reflektoren kleiner als die Schallbündelbreite zu bestimmen.

Kugelreflektor
 $r = 1.2 \text{ mm}$



Kugelreflektor
 $r = 0.075 \text{ mm}$



Prinzipische Skizze:
 Schallfeld am
 Reflektor

von Kugel reflektiertes Schall-
 feld – yz – Schnitt

Schallfeld auf dem
 Empfänger

Abb. 6: Ausnutzung der Richtcharakteristik zur Größenbestimmung des Reflektors - Schallfelder im Festkörper für je um 1 mm außerhalb der Symmetrieachse verschobene Kugelreflektoren mit Radius r bei $z = 20 \text{ mm}$

Referenzen

- [1] E. Kühnicke, M. Lenz, J. Sorber, G. Gerlach, H. G. Trier: Method for Curvature Measurements with Ultrasound, 2008 IEEE International Ultrasonics Symposium, Peking, November 2.-5., 2008
- [2] E. Kühnicke, H.-G. Trier: Anordnung und Verfahren zur Bestimmung der Kombination von Krümmungsradien und Abständen an akustischen Grenzflächen in Messobjekten mittels Ultraschall, TU PAT 020208
- [3] E. Kühnicke, M. Lenz: Anordnung und Verfahren zur Bestimmung von Schichtdicken und Schallgeschwindigkeiten in Medien mit Hilfe von Ultraschall. TU PAT 040609 2009.
- [4] E. Kühnicke: Elastische Wellen in geschichteten Festkörpersystemen: Modellierungen mit Hilfe von Integraltransformationmethoden; Simulationsrechnungen für Ultraschallanwendungen, Schriftenreihe der TIMUG Technologie in Medizin und Gesundheitswesen e.V., Bonn 2001
- [5] N. Gust, E. Kühnicke, K. Wolter, „Materialparameterbestimmung mit dem Ultraschallmikroskop“, DGZfP Jahrestagung Erfurt 2010