

Ortsaufgelöste Reflexionsanalyse mittels Luftultraschall - Einseitige Prüfung von CFK-Wabenstrukturen

Ralf STEINHAUSEN¹, Mario KIEL¹, Christoph PIENTSCHKE¹,
Stefan SCHEUNEMANN¹

¹ Forschungszentrum Ultraschall gmbH, Halle (Saale)
Köthener Straße 33a, 06118 Halle

Kurzfassung. Die Prüfung von Bauteilen mittels Luftultraschall ist seit vielen Jahren etabliert. In den meisten Fällen kommt die Transmissionsmessung zum Einsatz. Dies ist aber nur dann anwendbar, wenn beide Seiten des Bauteils zugänglich sind. In Hinblick auf fertig montierte Bauteile nach der Endmontage oder später auch im laufenden Betrieb ist die Zugänglichkeit der Rückseite in den meisten Fällen nicht gegeben oder nur mit sehr hohem Aufwand, wie der Demontage möglich. Hier ist ein einseitiger Zugang der Prüfmethode nötig.

Im Bereich des luftgekoppelten Ultraschalls ist bedingt durch die starke Reflexion des Ultraschallpulses an der Oberfläche ein einseitiger Impuls-Echo-Betrieb, wie er in der konventionellen angekoppelten Prüftechnik verwendet wird, nicht möglich. Es gibt Ansätze mittels Luftultraschall angeregte Plattenwellen einseitig auszuwerten, um Information über den Probenzustand zu erhalten. Dabei wird beispielsweise die Ausbreitung der Plattenwelle an Defekten gestört, was in einer Reduktion des messbaren Signals der von der Platte reemittierten Ultraschallwelle führt. Diese Information ist aber nicht direkt ortsaufgelöst, da die Signalschwächung irgendwo auf dem Ausbreitungspfad der Plattenwelle geschieht. Die genauen Streuorte, also die Positionen der Defekte muss nachträglich anhand der gesamten Messdaten rekonstruiert werden. Außerdem verhindert die gezielte Anregung von Plattenwellen Informationen aus der Probentiefe, da sich die Ultraschallwelle nur parallel zur Oberflächen ausbreitet. Dies ist insbesondere bei Sandwichstrukturen der Fall, bei denen eine geringere Kopplung zwischen den einzelnen Lagen im Vergleich zum Vollmaterial vorliegt.

In diesem Beitrag präsentieren wir einen neuen Ansatz, bei dem wir ortsaufgelöst die reflektierten Signale von der Probenoberfläche auswerten. Um das Signal der Frontflächenreflexion zu unterdrücken wird der Empfänger durch ein Empfängerpaar ersetzt und die einzelnen Signale voneinander abgezogen. Bei den verwendeten Wandlern handelt es sich um Faserkompositwandler mit einer Arbeitsfrequenz von 430 kHz. Der Aufbau ermöglicht eine sensitive Detektion der Reflexionsunterschiede, welche bedingt durch die Volumeneigenschaften der Probe entstehen. Die Methode wurde am Beispiel von CFK-Wabenstrukturen mit künstlich eingebrachten Defekten getestet und diskutiert.

Einführung

Um eine einseitige Prüfung in der Luftultraschalltechnik im Quasi-Impuls-Echo Betrieb zu ermöglichen, muss ein Weg gefunden werden die Ultraschallsignale aus der Probe von den Signalen des Frontwandechos zu eliminieren. In der Abbildung 1 ist die dabei auftretende



Schwierigkeit illustriert. Zu sehen ist eine Probe mit innenliegendem Defekt. Der blaue Pfeil symbolisiert eine eintreffende Ultraschallwelle auf die Probe. Nimmt man nun an, dass die Impedanzunterschiede zwischen Luft und Probe zu einer 99%-igen Reflexion führen, erhält man ein Echo mit nahezu der gleichen Intensität wie die eintreffende Welle (rot dargestellt). Vernachlässigt man andere Verlustmechanismen, wird ein Prozent der Schallintensität in die Probe eindringen. Trifft diese Ultraschallwelle dann auf einen weiteren Impedanzsprung, wie beispielweise verursacht durch einen Defekt wird der Schall an dieser Stelle gestreut und reflektiert. Die Schallanteile, die sich in Richtung Oberfläche bewegen, erfahren dort wiederum, vergleichbar zum Eintritt der Primärwelle in die Probe, eine Schwächung auf 1%, was in Summe eine Schallintensität von weniger als 0,01% der Primärwelle entspricht. Durch die viel größere Schallgeschwindigkeit innerhalb der Probe verlassen beide Schallpulse, also der direkt an der Oberfläche reflektierte und der im Probeninneren reflektierte Puls, die Probe nahezu zur gleichen Zeit. Eine Separation anhand der Signallaufzeit ist also nicht möglich.

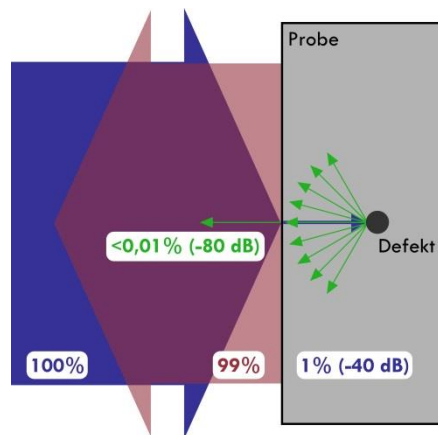


Abb. 1. Veranschaulichung der Signalintensitäten von reflektierten Ultraschallpulsen an der Probenoberfläche (rot) und einem Defekt innerhalb der Probe (grün).

2. Messprinzip und Messaufbau

Für die maximal möglichen Einkopplung des gesendeten Signals in das Probenvolumen unterhalb des Einschallpunktes wird der Sender senkrecht zur Probenoberfläche ausgerichtet. Zur Eliminierung des Frontwandechos werden zwei Empfänger verwendet, die auf den gleichen Ort der Probe gerichtet sind, jedoch aus zueinander versetzten Richtungen. Das Prinzip der Signalaufzeichnung ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Sender (S) befindet sich zwischen den beiden Empfängern (E_1 und E_2). Somit detektieren die Empfänger die jeweils rechten und linken Schallanteile der von der Probe reflektierten Ultraschallwelle.

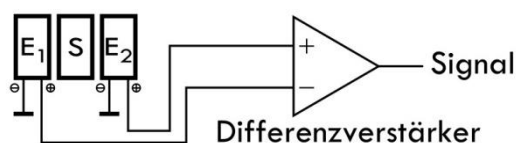


Abb. 2. Prinzipielle Anordnung der Ultraschallwandler (Sender S und Empfänger E_1 und E_2). Die Signale der beiden Empfänger werden in einem Differenzverstärker voneinander subtrahiert.

Aus der gezeigten Messanordnung ergeben sich nun einige grundlegende Überlegungen über das Verhalten des Messsignals am Ausgang des Differenzverstärkers. Die wesentlichen Szenarien sind in Abbildung 3 skizziert. Betrachtet man zunächst den Fall A so wird deutlich, dass bei einer defektfreien Probe mit keinem Signal zu rechnen ist. Bei idealer Schallfeldgeometrie des Senders und bei identischer Empfangscharakteristik der beiden Empfänger löschen sich beide Signale aus, da rechter und linker Schallanteil identisch sind. Im Fall B befindet sich der Defekt direkt unter dem Sender. Zwar unterscheidet sich der Defekt von der übrigen Probe, jedoch führt er in dieser Messkopfposition zu keinem zusätzlichen Signal. Dabei muss man sich vor Augen führen, dass die Anordnung der Ultraschallwandler eine Symmetrieebene definiert, die senkrecht zur hier skizzierten Schnittebene steht. Solange ein Defekt von beiden Wandlern aus identisch „aussieht“ (was bei einem kleinen bzw. symmetrischen Defekt direkt vor dem Sender zweifelsfrei der Fall ist) wird kein Differenzsignal gemessen. Verschiebt man nun den Messkopf etwas zur Seite, wie im Fall C dargestellt, führt dies zu einer Änderung des Signals. Der Fall D zeigt zwei Defekte symmetrisch zum Messkopf ohne Signaländerung, während der unsymmetrische Fall E wiederum eine Änderung im Signal erwarten lässt. Dies gilt ebenfalls für den in F skizzierten Fall, einer sich ändernden Probendicke, einer Delamination oder ähnlichem flächigen Defekt.

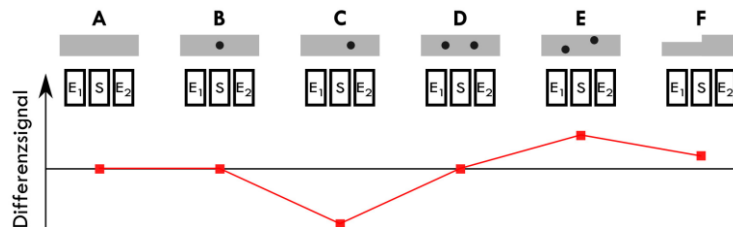


Abb. 3. Messszenarien und die dabei möglichen Messsignale.

Die Messkopfanordnung für die hier gezeigten Ergebnisse ist in Abbildung 4 dargestellt. Durch die Größe der Ultraschallköpfe und der Präzisionshalter wurde eine gewinkelte Anordnung der Empfänger (R1 und R2) relativ zum Sender (T1) gewählt. Bei den Wandlern handelt es sich um Luftultraschallwandler basierend auf piezoelektrischen Faserkompositen mit einem Schwingerdurchmesser von 20 mm und einer Arbeitsfrequenz von 430 kHz, die am Forschungszentrum Ultraschall als Prototypen gefertigt wurden. Für die Messungen wurde das 4-Kanal-Luftultraschallprüfsystem SonoAir der Firma SONOTEC (Halle/Saale) verwendet.

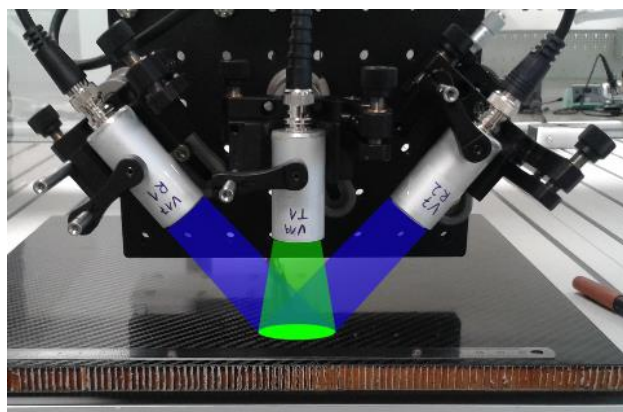


Abb. 4. Messkopfanordnung vor der zu untersuchenden Probe. Der grüne Bereich symbolisiert die Schallkeule des Senders (zur besseren Verdeutlichung nicht maßstabsgetreu dargestellt) und die blauen Bereiche die Empfangscharakteristik der Empfänger.

Die oben erläuterten Messszenarien gehen zunächst davon aus, dass es im defektfreien Bereich der Probe zu einer perfekten Auslöschung der Signale beider Empfänger durch die Differenzverstärkung kommt. Diese perfekte Auslöschung hängt von sehr vielen Parametern ab. Zunächst müssen die Köpfe exakt ausgerichtet sein. Die Abstände und die Orientierung sind dabei entscheidend. Für die Feinjustage wurde der Sender über einen Kugelreflektor mit einem Durchmesser von 3 mm platziert. Die Empfänger wurden daraufhin so justiert, dass das detektierte Reflexionssignal maximiert wurde. Ein weiterer essentieller Parameter ist die Abstimmung der Wandler zueinander. Beide Empfänger sollten nach Möglichkeit die gleichen Resonanzfrequenzen aufweisen. Auch das Ein- und Ausschwingverhalten sollte ähnlich sein. Jedoch zeigt sich, dass genau diese Eigenschaften nur sehr schwer kontrollierbar sind. Daher ist eine reine Burstanregung von wenigen Schwingungsperioden nicht möglich, wie sie in der Luftultraschalltechnik üblicherweise verwendet wird. Als Lösung dieses Problems wurde eine Quasi-cw Anregung gewählt. In Abbildung 5 sind die A-Bilder für die Signale am Empfänger E₁ und E₂ und die zugehörige Differenz beider gezeigt. Der Anregungs-Burst am Sender beträgt 25 Periodenlängen. Im rot hinterlegten Bereich erkennt man relativ starke Abweichungen der Signale E₁ und E₂. Diese äußern sich auch in einem starken Anteil im A-Bild der Differenz. Nach der Einschwingzeit von etwa 12 Perioden sind die Signale an beiden Empfängern etwa konstant. Das heißt nach 12 Anregungsperioden des Senders steigt weder dessen Intensität weiter an, noch wird die gemessene Intensität am Empfänger weiter vergrößert. Demnach spiegelt der grün hinterlegte Bereich B einen stationären und cw-artigen Zustand („Quasi-cw“) wieder. Das Differenzsignal in diesem Messbereich ist nahezu Null. Am Ende der Burst-Anregung ist das Ausschwingverhalten des Gesamtsystems zu beobachten, in dem sich wieder die Signale von Empfänger E₁ und E₂ unterscheiden und damit auch das Differenzsignal.

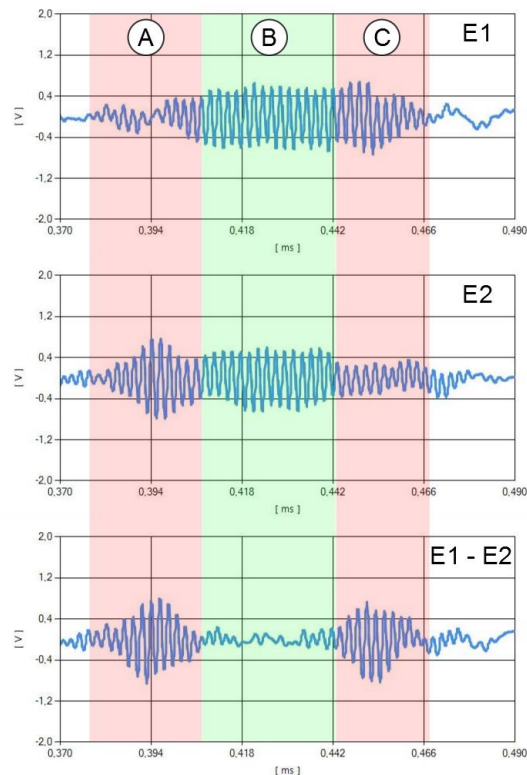


Abb. 5. A-Bilder der beiden Empfänger bei einer Anregung des Senders mit 25 Pulsen (obere Bilder); Differenzsignal beider Empfänger (unteres Bild).

3. Ergebnisse

Die Messanordnung wurde anhand einer CFK-Sandwichstruktur getestet. Die Probe besteht aus zwei CFK-Decklagen und einem Aramidwabenkern. Als künstlicher Defekt wurde auf der Rückseite die CFK-Decklage und der Wabenkern kreisförmig mit einem Durchmesser von 25 mm entfernt, wie in Abbildung 6 gezeigt. Von der Frontseite aus betrachtet ähnelt dieser Defekt einer kreisrunden Delamination zwischen Decklage und Kernmaterial.

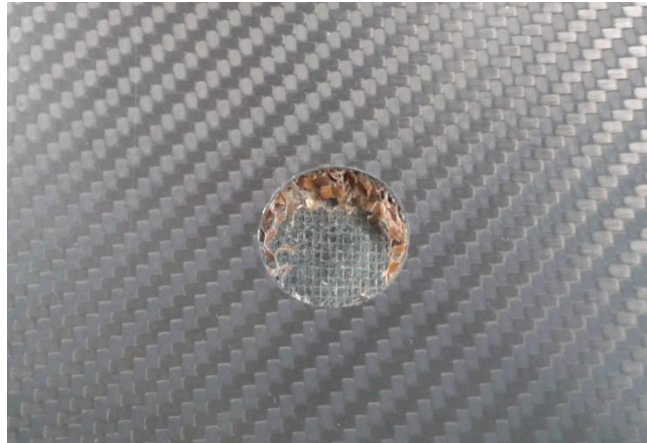


Abb. 6. Rückseite der CFK-Wabenstruktur mit künstlich eingebrachtem Defekt, der eine Delamination zwischen der Decklage und dem Kernmaterial simulieren soll. Der Durchmesser beträgt 25 mm.

Während der Messung wird der Messkopf über die Probe gerastert und an jedem Rasterpunkt das A-Bild des Differenzsignals aufgezeichnet. Im Bereich B der Abbildung 5 wird die Intensität bestimmt und anhand eines farbcodierten C-Bildes dargestellt. In der Abbildung 7 ist dies für drei verschiedene Probenorientierungen, wie im oberen Teil skizziert, gezeigt. In allen drei Messungen sieht man zwei Intensitätsüberhöhungen auf der rechten und linken Seite, welche von einem Steg niedriger Intensität getrennt sind. Im rechten C-Bild ist der Defekt anhand der gelben gestrichelten Linie angedeutet um die Position und die Größe des Defektes zu veranschaulichen.

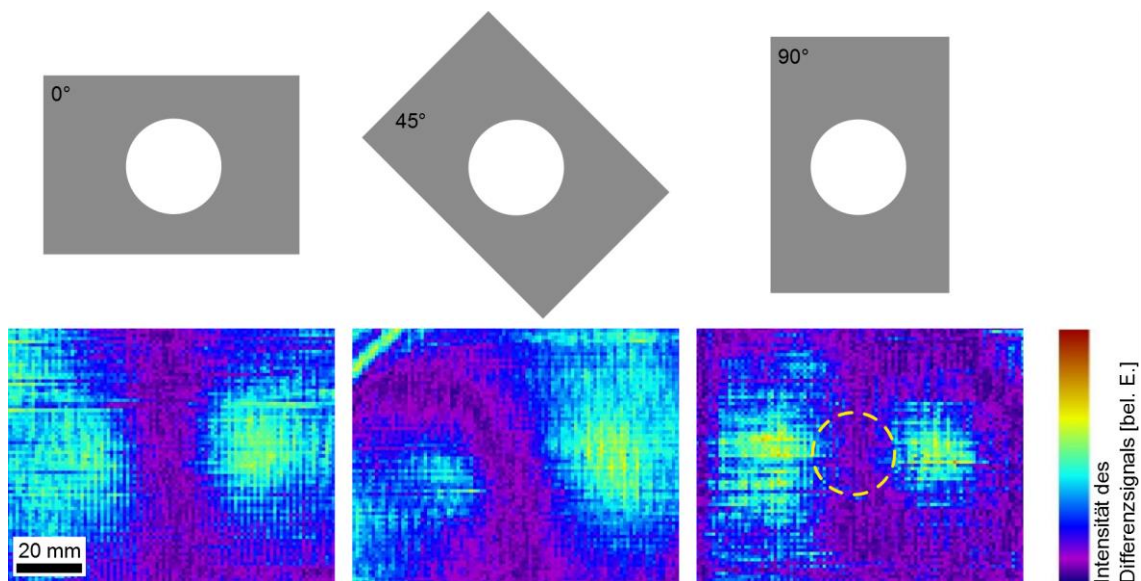


Abb. 7. C-Bild des Differenzsignals bei unterschiedlichen Probenorientierungen. Im rechten Bild ist beispielhaft die Position und Größe der rückseitigen Aussparung gekennzeichnet.

4. Interpretation

Die Ergebnisse aus Abbildung 7 können wie folgt interpretiert werden. Wie bereits in Abschnitt 2 dargestellt, ist die Messmethode empfindlich auf Asymmetrien in der Probe und deren Defekte in der Ebene der Wandlervanordnung. In Abbildung 8 sind die drei wesentlichen Positionen bei der Überquerung des Defektbereiches skizziert. Befindet sich der Sender am linken bzw. rechten Rand des Defektes (oberes und unteres Bild) wird im A-Bild eine erhöhte Intensität des Differenzsignals beobachtet, während in zentrierter Position (Mitte) nahezu kein Signal messbar ist. Demnach stimmt die Beobachtung mit dem im Abschnitt 2 diskutierten Fällen überein und die Messung ermöglicht die Detektion der senkrecht zur Wandlerebene orientierten Kanten. Dabei unterscheiden sich die beobachteten Intensitäten kaum. Nur die Phase des Signals dreht sich um 180° , wie anhand des Pfeils verdeutlicht wird.

Mit einem genaueren Blick auf die mittlere Messung von Abbildung 7 erkennt man einen Unterschied sowohl im Betrag der Intensität als auch in der Größe der Ausdehnung des kanteninduzierten Intensitätsanstieges auf der rechten und linken Seite. Dies begründet sich in einer leichten Fehljustage der Phasenlage beider Empfangssignale zueinander, bevor diese voneinander abgezogen werden.

Aus den Daten können noch weitere Rückschlüsse gezogen werden. Da die Messanordnung nur auf senkrechte Asymmetrien empfindlich ist, muss für die Bestimmung der Defektausbreitung die Wandlerebene bzw. die Probe gedreht werden. Damit ändert man die relative Orientierung der Kanten. Bei einem kreisrunden Defekt verändert die Drehung nicht das C-Bild, da sich der Abstand der Kanten zueinander nicht verändert. Dies führt dazu, dass die Bereiche hoher Intensität in der Abbildung 7 unabhängig von der Probenrotation sind (Vergleiche auch Abb. 9).

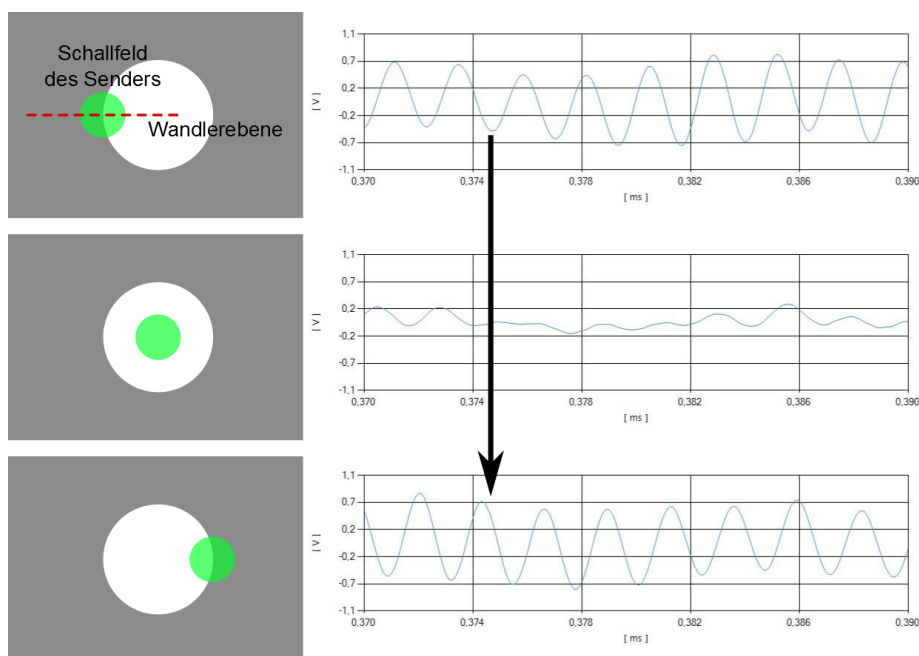


Abb. 8. A-Bilder und die skizzierte Position des Senderschallfeldes beim Überqueren des Defektes.

Des Weiteren lassen die Messergebnisse Rückschlüsse auf die Größe und Empfindlichkeit des Messbereichs zu. In der rechten Messung der Abbildung 7 erkennt man, dass innerhalb des gelb umrandeten Bereichs die Intensität nahezu gleich ist. Das bedeutet, dass der Messbereich (grün gefüllter Kreis in Abb. 8) kleiner als der Durchmesser

des Defektes sein muss. Nur in diesem Fall sind die Ergebnisse in der Form möglich. Wäre der Messbereich größer würde beim Überfahren des Defektes der Einfluss der Kante zu einer Verkleinerung des Bereiches führen, in dem das Differenzsignal nahezu Null ist.

Die Orientierung der Kante eines Defektes zur Wandlerebene ist demzufolge ausschlaggebend für die Form des entstehenden – nicht rekonstruierten – Bildes. In der Abbildung 9 ist dieses beispielhaft für einen kreisförmigen und rechteckigen Defekt skizziert. Die Veränderung des Winkels zwischen Probenausrichtung und der Wandleranordnung wurde jetzt durch Drehung der Wandler um 90° realisiert. Die jeweils mittleren und rechten Bilder zeigen den erwarteten Intensitätsverlauf bei horizontal und vertikal ausgerichteten Ultraschallwandlern. Die Farbcodierung wurde entsprechend der Messungen in Abbildung 7 gewählt. Entsprechend dieser einfachen Beispiele ist es möglich jeder Defektform einen spezifischen Fingerabdruck in den C-Bildern zuzuordnen. An dieser Stelle sei noch bemerkt, dass die simulierten Messbilder in Abbildung 9 rein qualitative Erwartungen widerspiegeln. So kann man beispielsweise davon ausgehen, dass die Asymmetrie der Kreiskante im oberen Teil für die Messung abnimmt. Dem ist in der Simulation durch den sichelförmig abnehmenden Intensitätsverlauf Rechnung getragen. Interessant ist auch, dass diese Sichelform in den tatsächlichen Messdaten nicht zu beobachten. Die genaue Ursache dafür ist im momentanen Stand der Untersuchung noch nicht geklärt, aber es ist denkbar, dass die Justage der Ultraschallköpfe einen Einfluss darauf haben könnte. Des Weiteren würde eine Simulation der Schallwellenausbreitung Aufschluss über die genauen Mechanismen in dieser Messanordnung geben.

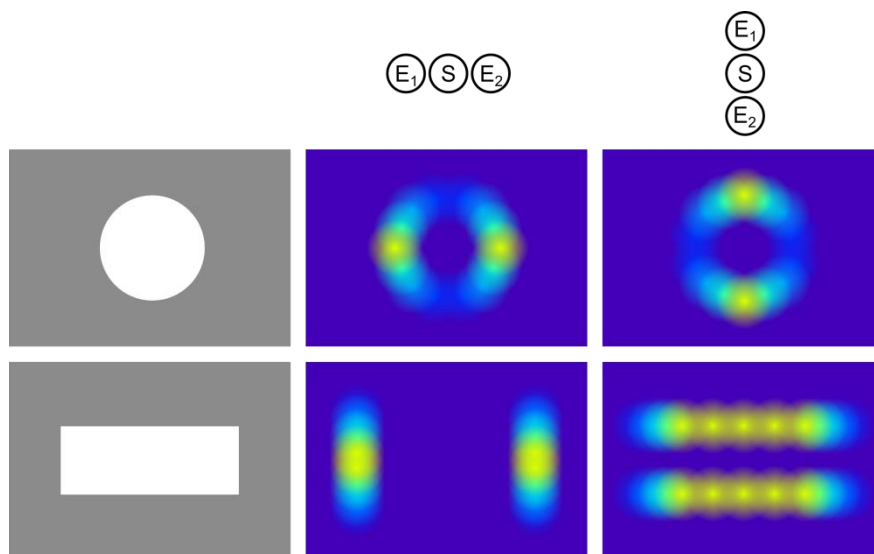


Abb. 9. Erwartete C-Bilder des Differenzsignals bei unterschiedlichen Defektformen am Beispiel von horizontaler und vertikaler Wandleranordnung.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die hier vorgestellten Ergebnisse der einseitigen Reflexionsanalyse mit der Verwendung eines Empfängerpaars ermöglicht die Detektion von Defektkanten in einer CFK-Wabenstruktur. Die Einschallung der Ultraschallwelle erfolgt senkrecht, womit auch Volumeninformationen der Proben zugänglich sind. Die Eliminierung des Frontwandechos durch die Differenzbildung der beiden Empfängersignale und die somit mögliche Detektion Defekten unterhalb der Probeneroberfläche konnte nachgewiesen werden. Dabei ist die Messgeometrie nur auf symmetriebrechende Kanten sensitiv. Mit rotiertem Messkopf sind aber auch die anderen Richtungen zugänglich.

Die verwendete Luftultraschallanlage SonoAir ermöglicht die simultane Aufzeichnung von vier Messkanälen. Daher kann man auch die Verwendung von drei zusätzlichen Empfängerpaaren in Betracht ziehen, um unabhängig von der explizit vorliegenden Orientierung der Kanten zu sein. Die kombinierte Auswertung der Daten ließe dann Rückschlüsse auf die Geometrie der Defekte zu, wie es schon in Abbildung 9 beispielhaft illustriert wurde.

5. Danksagung

Die hier vorgestellten Ergebnisse entstanden in einem Projekt im Rahmen des Förderprogramms Innokom-Ost der BMWI.