

Einseitige Luftultraschallprüfung von Blechverbindungen - Eine Sache der Geometrie

Mario KIEL¹, Ralf STEINHAUSEN¹, Andreas BODI²

¹ Forschungszentrum Ultraschall gGmbH, Halle (Saale)

² SONOTEC Ultraschallsensorik Halle GmbH, Halle (Saale)

Kontakt E-Mail: mario.kiel@fz-u.de

Kurzfassung. In der Produktion von Halbzeugen für Massengüter ist das Fügen von Metallwerkstoffen häufig vollautomatisiert und robotergeführt. Zwar ist gewünscht, dass der Prozess durch die Automatisierung stets gleich abläuft, die Gewissheit darüber kann aber immer nur eine anschließende Prüfung der Werkstücke liefern.

In der hier vorgestellten Prüfsituation handelt es sich um die Untersuchung einer laserunterstützten Stoßschweißnaht von Stahlblechen. Bei diesem Prozess wird ein hochenergetischer Laser verwendet, um Stahlbleche unterschiedlicher Dicke von 0,8 bis 1,6 mm miteinander zu verbinden. Derartige Verbindungen werden z.B. im Automobilbereich verwendet, um einen Übergang zwischen dickeren stabilen Konstruktionsteilen zu weniger beanspruchten Teilen geringerer Wandstärke zu schaffen. Die Qualität der Schweißnaht hängt von sehr vielen Parametern ab. Eine mögliche Fehlerquelle ist u.a. der kurzzeitige Verlust der Laserleistung, was zu einer Unterbrechung der Schweißnaht führt.

Die einseitige Messanordnung besteht aus zwei Luftultraschallwandlern auf jeweils einer Seite der Schweißnaht. Die sich innerhalb der Bleche und über die Schweißnaht hinweg ausbreitende Lambwelle wird gemessen und analysiert. Die Anordnung der Wandler kann bedingt durch die einfache Geometrie zweier auf Stoß aneinander geschweißter Bleche so gewählt werden, dass keinerlei zusätzliche Abschattung der sich in Luft ausbreitenden Ultraschallwelle nötig ist. Das Verfahren ist demzufolge vollständig berührungslos. Die Ultraschallmessung kann direkt am Schweißroboter erfolgen, da nicht erst die Abkühlung der Bleche abgewartet werden muss.

In unserem Beitrag stellen wir die Möglichkeiten aber auch die Grenzen der Methode dar. Wir betrachten die Ergebnislage als Vergleich von Amplituden- und Laufzeitbewertung der Ultraschalldaten. Dabei werden sowohl das Auflösungsvermögen und die Empfindlichkeit der Messung als auch die Einflüsse der Wandlerjustage und die Anforderungen an die Roboterführung betrachtet. Die Einflüsse der unterschiedlichen Phasengeschwindigkeiten der Lambwelle beim Verschweißen von zwei unterschiedlich dicken Blechen sowie der Abweichung von der optimalen Prüfkopfführung werden in Hinblick auf die Robustheit der Bestimmung der Fehlergröße diskutiert.

1. Einführung

Die Qualitätskontrolle von Bauteilen ist immer dann besonders anspruchsvoll, wenn bei großen Stückzahlen eine 100%ige Prüfung angestrebt wird. Dies ist gerade bei sicherheitsrelevanten Bauteilen erforderlich. Als einer der wichtigsten Vertreter solcher Ansprüche kann sicher die Automobilindustrie genannt werden. Nahezu jeder Produktionsschritt muss sehr hohen Qualitätsansprüchen genügen um die Haltbarkeit des Gesamtproduktes über die gesamte Nutzungsdauer bei gleichzeitig sehr großen Stückzahlen gewährleisten zu können.

Um die Anforderungen zu erfüllen, müssen in der Regel vollautomatisierbare Prüfmethoden entwickelt werden um die Inline-Fähigkeit der Prüfung in die Produktionsabläufe erreichen zu können. Erstrebenswert sind dabei die Prüfmethode, die ohne weitere Hilfsmittel und ohne Vor- bzw. Nachbereitungsschritte auskommen. Ein Beispiel für eine derartige Prüfung ist der luftgekoppelte Ultraschall, bei dem das Prüfstück berührungslos untersucht werden kann. Bei günstiger Geometrie der Prüfstücke lässt sich Luftultraschall direkt in die Produktionslinie integrieren. Bei komplizierteren Anordnungen ist auch die Unterstützung mit entsprechenden Robotern möglich.

Bei einigen Prüfaufgaben ist die Anwendung von luftgekoppeltem Ultraschall zwar prinzipiell denkbar, jedoch scheitert die erfolgreiche Applikation an technisch bedingten Schwankungen. Die Schwankungen führen dann dazu, dass die Messergebnisse nicht mehr eindeutig interpretiert werden können und einerseits die gewünschten Fehleranzeigen verhindern oder im Extremfall zu häufigen Fehlalarmen führen. Die Schwankungen können einerseits bei den Prüfständen selbst auftreten, andererseits aber auch durch die Prüfanordnung bedingt sein.

In diesem Betrag zeigen wir die Möglichkeiten aber auch die Grenzen für eine Prüfung von Laserschweißnähten mittels einseitig zugänglichem Luftultraschall und einer potentiellen Kombination von Schweiß- und Prüfroboter.

2. Prüfaufgabe

In Abb. 1 ist die zu untersuchende Schweißverbindung von zwei Metallblechen gezeigt. Die Verbindung der Bleche erfolgt auf Stoß unter Verwendung eines Lasers. Im unteren Teil der Abbildung sind typische Fehler in Form von Löchern dargestellt, die hier beispielhaft durch kurzzeitiges Ausschalten des Lasers präpariert wurden. In der Praxis können diese Fehler durch Schwankungen der Laserleistung oder anderen Störeinflüssen entstehen. Auch eine Verjüngung der Schweißnaht ist denkbar, welche ebenfalls zu einer Schwächung der Verbindung führt.

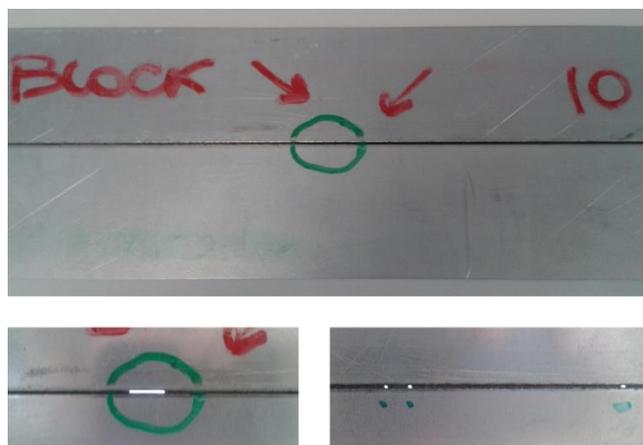


Abb. 1. Blechverbindung mit künstlichen Defekten innerhalb der Schweißverbindung.

In der Produktion werden derartige Schweißverbindungen mittels Schweißroboter durchgeführt. In den meisten Fällen werden Bleche unterschiedlicher Dicke auf Stoß miteinander verbunden. Dies ermöglicht den Übergang zwischen tragenden und nicht tragenden Bauteilen mit nahezu glattem Übergang zwischen den Blechteilen.

3. Prüfmethode

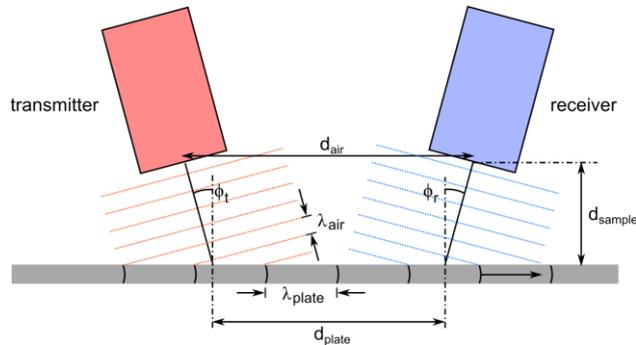


Abb. 2. Anregung und Detektion von Lambwellen in einer dünnen Platte.

Das angestrebte Messprinzip beruht auf der Anregung von Lambwellen. In Abb. 2 ist dies schematisch dargestellt. Die Sende- und Empfangswandler sind relativ zur Normalen um die Winkel ϕ_t und ϕ_r gekippt. Der Sender emittiert eine Schallwelle, wie durch die roten gepunkteten Linien angedeutet. Die regelmäßige Luftdruckänderung mit der Wellenlänge λ_{air} erzeugt eine Ultraschallwelle in der Platte mit der Wellenlänge λ_{plate} , die wiederum zur Emission einer Ultraschallwelle in die Luft (blaue Linien) führt, welche vom Empfänger detektiert wird. Dabei sind beide Wellenlängen über folgende Relation miteinander verknüpft:

$$\sin \phi = \frac{\lambda_{air}}{\lambda_{plate}} = \frac{c_{air}}{c_{plate}} \quad (1).$$

Um nun den optimalen Winkel für die Prüfköpfe einstellen zu können muss die Schallgeschwindigkeit der Plattenwelle bekannt sein. Diese kann einfach bestimmt werden, indem der Empfänger relativ vom Sender bewegt wird und der Abstand d_{air} vergrößert wird. Als Ergebnis erhält man ein B-Bild der Messung wie in Abb. 3 dargestellt, welches dann wie folgt ausgewertet und interpretiert werden kann.

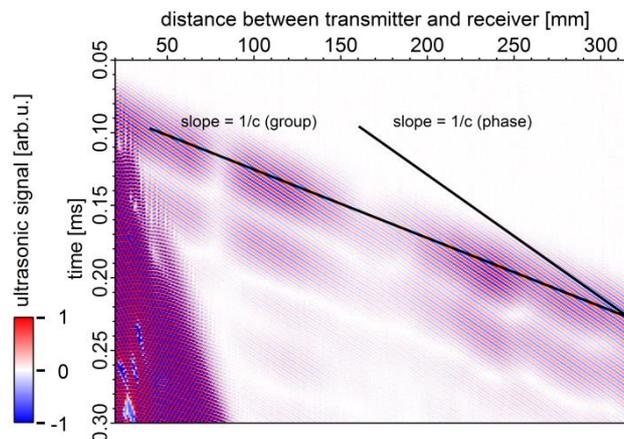


Abb. 3. B-Bild der Lambwellenanregung mit variablem Abstand von Sender und Empfänger auf 0,8 mm dickem Stahlblech.

Die Farbkodierung im B-Bild ist so gewählt, dass die positive Halbwelle rot und die negative Halbwelle blau erscheint. Die Schallgeschwindigkeit ergibt sich aus dem inversen Anstieg der resultierenden Linien (Wechsel zwischen roten und blauen Bereichen, gekennzeichnet mit *slope (phase)*). Für die dünne Platte erhält man 1230 m/s und für die dicke Platte 1583 m/s. Dieses Verhalten entspricht dem erwarteten Verhalten von Lambwellen in unterschiedlich dicken Platten [1].

Ein weiterer interessanter Aspekt ist der Verlauf des Wellenpakets bei größer werdendem Abstand der Ultraschallwandler, wie mit der zweiten Linie gekennzeichnet (Bezeichnung *slope (group)*). Der Anstieg ist kleiner als der Anstieg der Wellenphase in dieser Darstellung. Daraus lässt sich für das 0,8 mm Blech eine Gruppengeschwindigkeiten von 2097 m/s ablesen. Diese ist größer als die gemessene Phasengeschwindigkeit. Dies begründet sich in der Dispersionsrelation für die antisymmetrische Mode der 0. Ordnung, wie in Abb. 4 skizziert (blauer Kurvenverlauf). Der positive Anstieg in der Dispersionsbeziehung bewirkt eine größere Gruppengeschwindigkeit wie durch die gestrichelte Linie angedeutet.

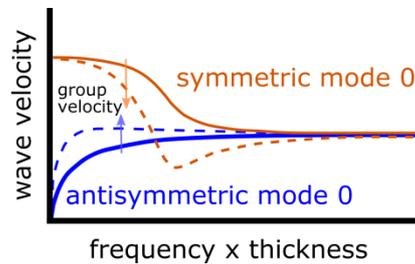


Abb. 4. Dispersionsbeziehung der 0. Ordnung der Lambwellenmoden in dünnen Platten.

Anhand der bestimmten Phasengeschwindigkeiten für die unterschiedlichen Blechdicken ergeben sich Winkel von $9,3^\circ$ und $12,3^\circ$ für die Einstellung der Ultraschallwandler. In der Praxis kann dieser Winkel im Bereich von $\pm 3^\circ$ variieren.

4. Ergebnisse

4.1 Nachweis einer Schweißfehlerstelle

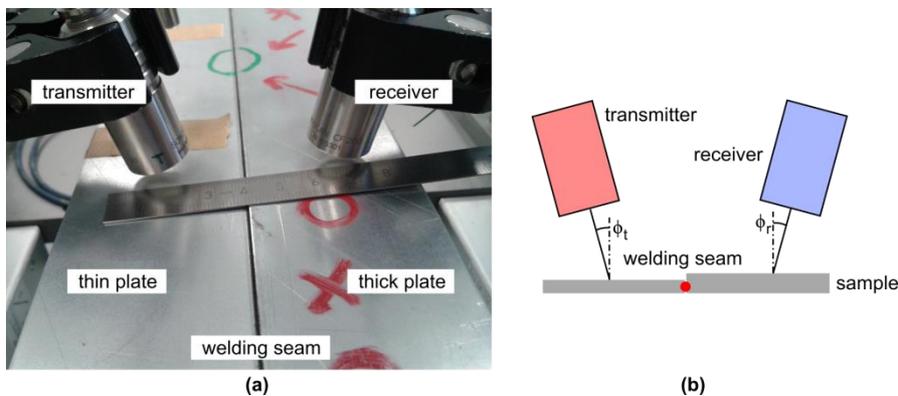


Abb. 5. Prüfanordnung im Testaufbau (a) und als Schemazeichnung (b).

In Abb. 5 ist der Messaufbau gezeigt wie er bei den hier gezeigten Ergebnissen verwendet wurde. Die Messungen selbst wurden mit dem Mehrkanal-Luftultraschallsystem SONOAIR (SONOTEC, Halle (Saale)) durchgeführt. Das System erlaubt die Verwendung

von einer beliebigen Abfolge von digitalen Anregungspulsen (Rechteck-Impulse) bis zu 800 V im typischen Frequenzbereich zwischen 50 kHz und 3 MHz. Auf der Empfangsseite kommen sehr rauscharme Vor- und Nachverstärker zum Einsatz bei einer, in 0,5 dB Schritten einstellbaren Gesamtverstärkung von 0 – 120 dB. Im Testaufbau wurde ein x-y Scannersystem verwendet, aber auch die Kombination mit einem Roboter ist möglich.

Die verwendeten Ultraschallwandler besitzen eine Frequenz von 200 kHz. Entgegen der sonst üblichen Anordnung, für die Anregung von Lambwellen wurde in diesem Aufbau keine explizite Abschattung der Wandler zueinander verwendet. Dies gelingt durch eine geeignete Wahl der Abstände zueinander und zur Probe. Es gelten folgende Zusammenhänge in Verbindung mit Abb. 2

$$t_{air} = \frac{d_{air}}{c_{air}} \quad (2)$$

$$t_{sample} = 2 \frac{d_{sample}}{c_{air}} + \frac{d_{plate}}{c_{plate}} \quad (3)$$

für die Laufzeiten der vom Sender zum Empfänger laufenden Ultraschallwellen. Die geforderte Prüfsituation erlaubt es den Abstand d_{air} so weit zu vergrößern, dass die Beziehung

$$t_{air} > t_{sample} + t_{pulse} \quad (4)$$

erfüllt ist. Des Weiteren wird außerdem der Abstand der Wandler zur Probenoberfläche d_{sample} möglichst klein gewählt. Dies führt zu einer Separation der Ultraschallsignale in der Weise, dass die Welle, durch die Platte den Empfänger vor der direkten Welle durch die Luft erreicht. Beispielhaft ist dies in Abb. 6 anhand zweier Messungen im normalen und defektbehafteten Schweißnahtbereich zu erkennen, bei der die Plattenwelle bei etwa 0,10 ms wohingegen die Welle durch Luft bei etwa 0,18 ms detektiert wird. An dieser Stelle sei erwähnt, dass die direkte Luftwelle um Größenordnungen größer ist, da sie nicht die auftretenden Impedanzunterschiede Luft/Blech und Blech/Luft überwinden muss und daher sehr viel weniger stark geschwächt wird. Würden beide Signale gleichzeitig den Empfänger erreichen, würde das Signal der Plattenwelle untergehen und nicht mehr analysierbar sein. Durch die nicht nötige Abschattung ergibt sich bei diesen Bedingungen eine 100% berührungsfreie Prüfung der Schweißnaht.

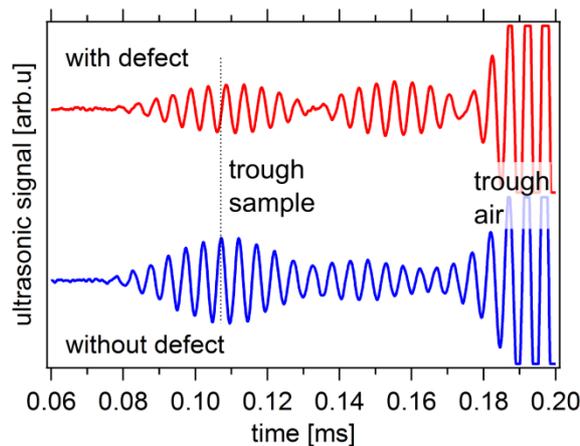


Abb. 6. Vergleich der A-Bilder bei normaler und defektbehafteter Schweißnaht.

Beim Scan der Wandlerkonfiguration entlang der Schweißnaht werden die A-Bilder nach unterschiedlichen Methoden analysiert. Einerseits wird die Intensitätsveränderungen betrachtet, andererseits die Signallaufzeit. Beide Ergebnisse werden in Hinblick auf die Eigenschaften der Schweißnaht analysiert und bewertet. In Abb. 7 sind die beiden Ergebnisse der Intensität und der Laufzeit zusammengefasst. Auf der linken Seite jeweils die

Übersichtsdiagramme über eine Scanlänge von über 100 mm und auf der rechten Seite Detailausschnitte im Bereich einer 10 mm langen Schweißnahtfehlerstelle.

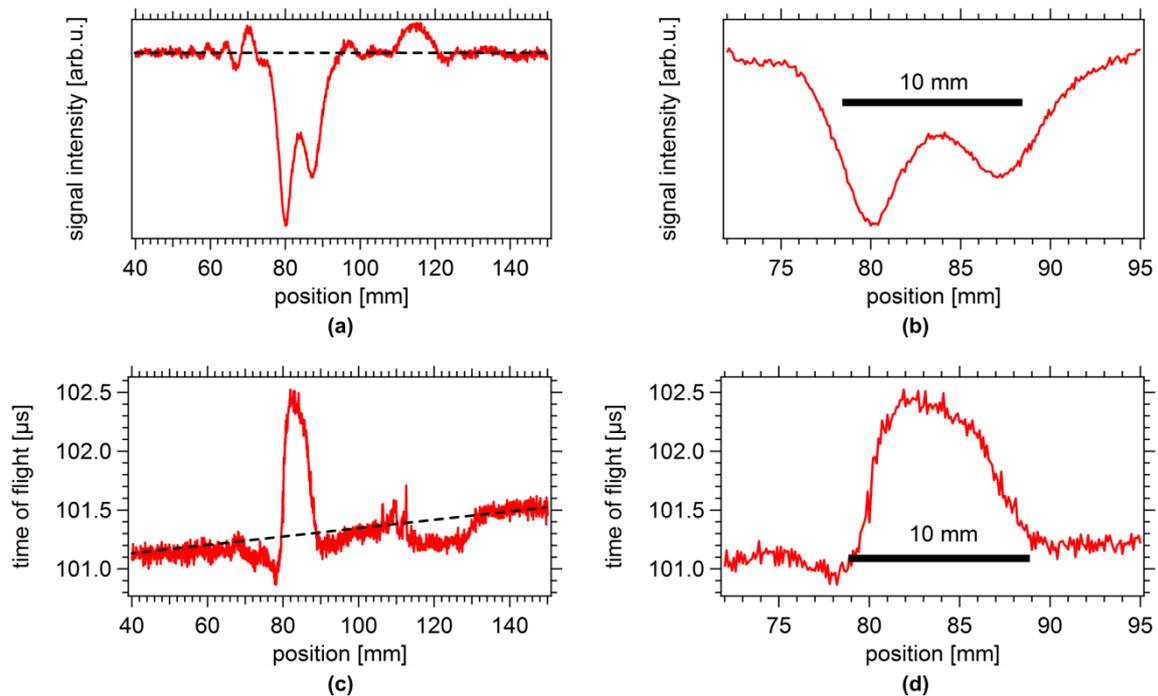


Abb. 7. Signalverlauf der Intensität und der Laufzeit beim Scan entlang der Schweißnaht mit einer eingebrachten Fehlerstelle von 10 mm.

Zunächst wird der Verlauf der Intensität diskutiert. An den beiden Rändern des dargestellten Messausschnittes ist die Schweißnaht defektfrei. Die Intensität in diesem Bereich kann also dem Normalzustand zugeordnet werden, wie es durch die gestrichelte Linie angedeutet ist. Die Fehlerstelle ist im Bereich zwischen 79 und 89 mm lokalisiert. Diese zeichnet sich durch einen starken Einbruch der Intensität in diesem Bereich aus. Das Signal-Rausch-Verhältnis erlaubt eine eindeutige Identifikation. Zusätzlich sind aber auch Fluktuationen erkennbar, welche zu einem Anstieg der Intensität sowohl außerhalb des Defektes selbst als auch innerhalb der Signatur der Fehlerstelle. In der Detailbetrachtung in Abb. 7(b) zeigt sich dieser zusätzliche Intensitätsanstieg im mittleren Bereich des Defektes sehr deutlich. Die Ursache hierfür sind Interferenzerscheinungen durch die Superposition von unterschiedlichen Schallwegen zwischen Sender- und Empfängerwandler aufgrund von Beugungseffekten an den Defekträndern. Durch diese Interferenzen ist jedoch eine eindeutige Bestimmung der Defektgröße nicht möglich, da eine objektive Beurteilung anhand eines Schwellwertes ausgeschlossen ist.

Die Ergebnisse der Analyse der Signallaufzeit sind im Diagramm in Abb. 7(c) dargestellt. Vergleicht man auch hier die Daten am linken und rechten Rand so erkennt man, dass die Werte abweichen, obwohl in beiden Fällen die Probe defektfrei ist. Dies begründet sich in einer leichten Änderung der Messgeometrie während des Scanvorgangs, wie es im nächsten Abschnitt näher diskutiert wird. Die gestrichelte Linie verdeutlicht demnach den Wertebereichsverlauf der intakten Schweißnaht, wenn man eine proportionale Änderung der Laufzeit mit der Verfahrstrecke annimmt. Im Bereich des Schweißdefektes ist ein starker Anstieg der Signallaufzeit um bis zu $1,5 \mu\text{s}$ zu verzeichnen. Im Detailausschnitt in Abb. 7(d) ist zu erkennen, dass diese Signalerhöhung über nahezu der gesamten Defektlänge anhält und abgesehen vom Rauschen keine größeren Fluktuationen aufweist. Eine einfache Schwellwertanalyse könnte hier den Defekt sicher bestimmen und auch dessen Abmessung

wäre zuverlässig abschätzbar. Der Zeitversatz des Signals im Vergleich zum defektfreien Bereich lässt sich über den längeren Schallweg erklären, der für die gestreute Welle nötig ist um an dem Defekt vorbei den Empfänger zu erreichen, da der direkte Schallweg aufgrund der Fehlstelle nicht passiert werden kann. Ein weiterer Augenmerk sei auf die Änderung der Signallaufzeit im Bereich zwischen 110 und 130 mm gelenkt, wo eine signifikante Abweichung der Laufzeit von der des Normalbereichs (gestrichelte Linie) zu erkennen ist. Diese Verkleinerung der Laufzeit lässt sich auf eine „Verdickung“ der Schweißnaht in diesem Bereich zurückführen, da dies zu einer effektiv größeren Schallgeschwindigkeit in diesem Bereich führt (vgl. Abschnitt 3). Die Methode ist also nicht nur sensitiv auf reine Fehlstellen sondern auch auf Änderungen der Schweißdicke.

4.2 Einfluss von Geometrieschwankungen

Weiterhin soll die Robustheit der Methode in Hinblick auf Variationen des Messaufbaus untersucht werden. Dies ist vor allem für die technische Umsetzung, beispielsweise an einem Schweißroboter nötig. Dieser bewegt sich mit seinem Schweißkopf entlang der Sollschweißnaht. Soll diese quasi-gleichzeitig mit leichtem Versatz (zeitlich gesehen nach der Schweißung aber mit dem gleichen Roboter) untersucht werden, kann nicht sichergestellt werden, dass die Messgeometrie immer exakt gleich bleibt, zum Beispiel bei der Erstellung einer gekurvten Schweißnaht. Bei angenommen gleichem Abstand der Wandler zur Probe d_{sample} kann eine Variation der relativen Lage der Wandler zur Schweißnaht auftreten. Dies ist in Abb. 8(a)-(c) verdeutlicht. Die Lage der Schweißnaht wurde um ca. ± 10 mm variiert. In den unterschiedlichen Szenarien ändert sich die relative Verteilung der unterschiedlichen Blechdicken in Bezug auf den zurückzulegenden Schallweg innerhalb der Probe. In Abb. 8(d) der Verlauf der unterschiedlichen Signalintensitäten dargestellt. Zu erkennen sind deutliche Änderungen sowohl in der Stärke der defektbezogenen Intensitätsabnahme als auch in deren Form. Demnach ist bei der Analyse der Signalintensität die Reproduzierbarkeit des Signalverlaufs bei leichter Geometrieänderung nicht gewährleistet.

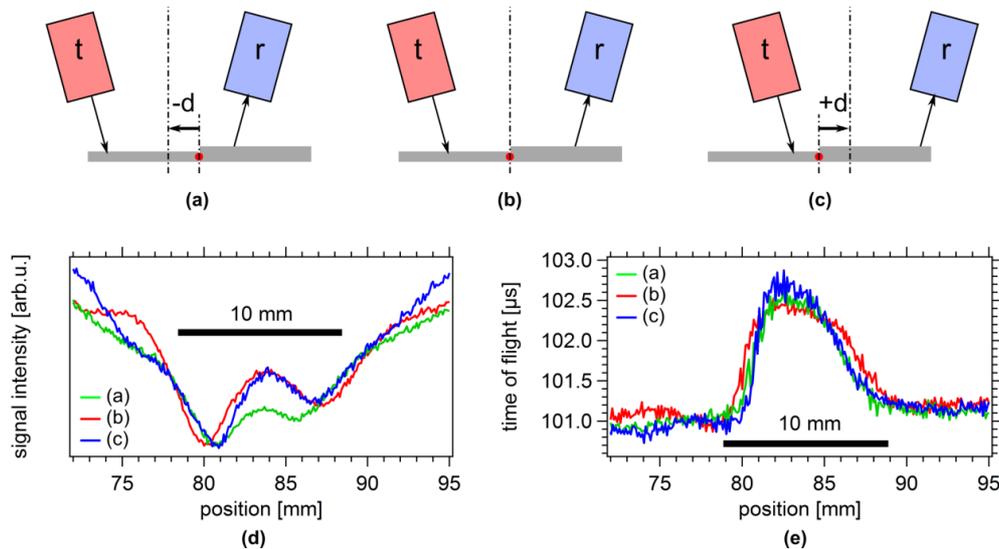


Abb. 8. Änderung der Wandlergeometrie (a)-(c) und der Einfluss auf die Messergebnisse des Intensitäts- (d) und des Laufzeitverlaufs (e).

Bei der Betrachtung der Signallaufzeit ist zu erkennen, dass der Defekt unabhängig von der Geometrie zu annähernd gleichen Ergebnissen im Kurvenverlauf führt. Sowohl die Stärke der absoluten Änderung als auch der prinzipielle Verlauf ändern sich kaum. Einzig die scheinbare Breite der Signatur ist für die symmetrische Wandleranordnung (b) etwas

größer, während die asymmetrischen Anordnungen (a) und (c) zu identischen Ergebnissen führen. Daraus lässt sich ablesen, dass es zwar einen Einfluss des Schallweges auf die bestimmte Pulslaufzeit bei asymmetrischer Anordnung gibt, dieser aber unabhängig von der Position von Sender und Empfänger ist.

Es sei noch bemerkt, dass die Laufzeitdaten in Abb. 8(e) zur besseren Vergleichbarkeit in der horizontalen Achse um einen Offset korrigiert sind. Die Rohdaten sind nochmals in Abb. 9 dargestellt. Man erkennt, dass die absoluten Abweichungen der Kurvenverläufe durchaus größer sind, als die Änderung die durch den untersuchten Defekt hervorgerufen wird. Als Ursache seien hier die unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten innerhalb der unterschiedlich dicken Bleche genannt. Im Fall (a) erreicht der Puls den Detektor später als im Fall (c), da eine längere Strecke innerhalb des dünnen Bleches mit kleinerer Schallgeschwindigkeit zurückgelegt werden muss.

Dies erlaubt also nicht die Durchführung einer reinen Schwellwertbetrachtung, die beispielsweise beim Erreichen eines bestimmten Laufzeitwertes einen Fehler anzeigt. Dennoch könnte die Methode mithilfe einer gleitenden Offsetkorrektur verwendet werden um Defekte zu finden. Die Änderungen in der Laufzeit gemessen an der zurückgelegten Verfahrstrecke treten an den Defekten schneller auf als die Änderungen, die durch Variation die Messgeometrie bedingt sind. Letztere erfolgen langsamer im Gegensatz zu den räumlich stark lokalisierten Defekten selbst, die zu abrupten Änderungen führen. Für eine potentielle Applikation der Methode an einem Roboter hat das zur Folge, dass die exakte seitliche Positionierung relativ zur Schweißnaht eine eher untergeordnete Rolle spielt was die schon oben angesprochene direkte Kombination von Prüfung und Schweißung mittels eines Roboters ermöglicht.

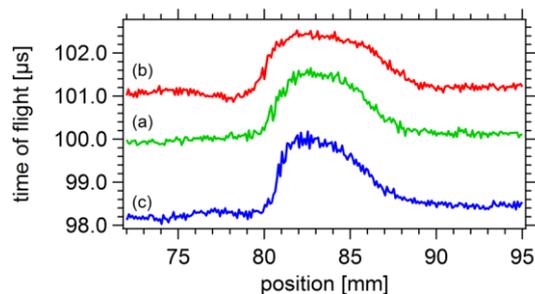


Abb. 9. Rohdaten der Laufzeitmessungen aus Abb. 8.

5. Zusammenfassung

Die Prüfung von laserunterstützten Stoßschweißnähten dünner Metallbleche konnte mittels einseitig zugänglichem Luftultraschall durchgeführt werden. Die einfache Geometrie der Schweißverbindung erlaubt es die Prüfköpfe so zu positionieren, dass eine Anregung und Detektion von Lambwellen ohne spezielle Abschattung möglich ist, was die Methode 100% berührungsfrei macht. Die Analyse der Daten zeigt, dass nur die Signallaufzeit objektive exakte Aussagen über die Beschaffenheit der Schweißnaht erlaubt. Diese sind auch robust gegenüber möglicher Schwankungen im Messaufbau, was eine Applikation in Kombination mit einem Schweißroboter ermöglichen würde.

Referenzen

[1] Liu, Z., "Lamb Wave Analysis of Acousto-Ultrasonic Signals in Plate", Proceedings of the 15th WCNDT, Roma, 2000.