

Manuelle und automatisierte Ultraschallprüfung von neuen Materialien

Tobias BRUCH¹, Daniel KOERS¹, Sebastian STANDOP¹

¹ GE Sensing & Inspection Technologies GmbH, Hürth

Kontakt E-Mail: Tobias.Bruch@bhge.com, Daniel.Koers@bhge.com, Sebastian.Standop@bhge.com

Kurzfassung. In Zeiten von gestiegenen Materialanforderungen, sowie einem anhaltenden Trend zur Leichtbauweise in unterschiedlichen Sektoren, rücken neue Materialien wie Verbundwerkstoffe immer mehr in den Fokus der Zerstörungsfreien Prüfung. Die zu bewältigenden Prüfaufgaben reichen dabei von der Prüfung von Wabenkernmaterial, Kohlefaser – und Glasfaserverbundwerkstoffen (CFK und GFK) als auch Sandwichmaterialien. GE Sensing & Inspection Technologies wird diesen Herausforderungen durch die Spezialisten in den Applikationslaboren gerecht, welche maßgeschneiderte Lösungen zusammen mit dem Anwender entwickeln.

Bei der manuellen Prüfung von großflächigen Verbundwerkstoff-Prüfstücken haben sich Rollenprüfköpfe in der Luftfahrt, dem Windenergiesektor und dem Bahnsektor etabliert, da sie eine „fast trockene“ und flexible Ankopplung auf der Bauteilgeometrie ermöglichen. Durch den Einsatz von Linear-Arrays wird eine verlässliche Prüfung großer Flächen im Impuls-Echo Verfahren bei gleichzeitiger Aufzeichnung von ortsgetreuen Koordinaten ermöglicht.

In der automatisierten Prüfung von CFK, Wabenkern- und Sandwichmaterialien im Luftfahrtsektor bietet GE Sensing & Inspection Technologies zwei Plattformen an, welche auf die Kundenbedürfnisse abgestimmt werden können. Beide Plattformen ermöglichen die Prüfung von komplexen Bauteilen entweder mittels konventioneller Ein-Schwinger-Prüfköpfe oder Phased-Array-Prüfköpfen sowohl im Impuls-Echo Verfahren als auch in Durchschallungstechnik.

Einführung

Der Einsatz von Rollenprüfköpfe bei der manuellen Prüfung wird an unterschiedlichen Beispielen vorgestellt. Für den Luftfahrtsektor wird die Prüfung von Wabenkernmaterial vorgestellt. Als Anwendungsfall im Bahnsektor wird die Prüfung von GFK-Lagen von Sandwichmaterialien vorgestellt. Im Windenergiesektor wird die Prüfung von dickem GFK-Material vorgestellt, welche durch den steigenden Bedarf an zerstörungsfreien Prüfungen bei der Herstellung und der in Betrieb befindlichen Windkraft Rotorblättern von Bedeutung ist.

Für die automatisierte Prüfung von Verbundmaterialien im Luftfahrtsektor werden die Rokstar und Hydastar Plattformen vorgestellt. Beide Plattformen ermöglichen die Prüfung von komplexen Bauteilen durch konfigurierbare Inspektionstools. Insbesondere bei der Prüfung konkaver oder konvexer ermöglicht das adaptive Ansteuern von Phased-Array Prüfköpfen eine ortsgetreuere Darstellung von Anzeigen. Zudem ermöglicht die Software der Plattformen das Einbinden der Bauteilgeometrie über CAD Dateien und bietet eine Simulationsumgebung zur Überprüfung des Scan-Planes.



1. Manuelle Prüfung von Verbundwerkstoffen

Rollenprüfköpfe zeichnen sich im Allgemeinen durch einen Ultraschallwandler aus, der in einem flexiblen mit Flüssigkeit gefüllten Reifen positioniert ist. Somit wird durch das Reifenvolumen eine flexible Vorlaufstrecke realisiert, die keinen kontinuierlichen Zulauf von Flüssigkeit benötigt. Das im Reifen positionierte Linear-Array ermöglicht eine Prüfung im Impuls-Echo Verfahren mit einer großen Spurbreite. Der flexible Reifen erlaubt eine Ankopplung auf komplexen Geometrien und benötigt nur eine geringe Menge an Koppelmittel. Die große Auflagefläche und das Abrollen auf dem Prüfstück ermöglicht in Verbindung mit einem Wegaufnehmer eine einfache und reproduzierbare Aufnahme der Prüfdaten und deren bildliche Darstellung. Abb. 1 illustriert den Aufbau eines Rollenprüfkopfes für die manuelle Prüfung.

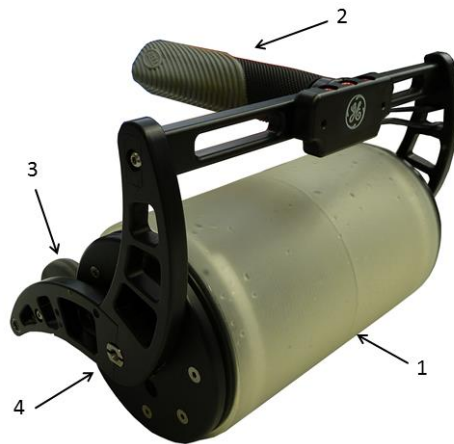


Abb. 1. Ein Linear-Array befindet sich in einem mit Flüssigkeit gefüllten flexiblen Reifen (1). Der Handgriff (2) ermöglicht eine leichte Führung des Prüfkopfes, wobei der Prüfkopf durch Stützrollen (3) stabilisiert wird. Ein Wegaufnehmer befindet sich auf der Achse des Prüfkopfes (4) und nimmt die Positionsdaten ohne Kontakt zum Werkstück auf.

1.1 Luftfahrtsektor

In der Luftfahrt werden Verbundwerkstoffe zur Gewichtsreduktion in großem Maßstab eingesetzt. Die weitverbreitetsten Werkstoffe sind dabei Kohlefaserverbundwerkstoffe (CFK), für deren Prüfung sich Rollenprüfköpfe über Jahre bewährt haben. Ein weiterer Verbundwerkstoff der in der Luftfahrt eingesetzt wird, ist Wabenkernmaterial. Dabei handelt es sich im Allgemeinen um einen Wabenkern aus Aramid- oder Aluminiumsäulen, welcher zur Stabilisierung mit einer Ober- und Unterlage aus CFK verklebt wird (siehe Abb. 2; links). Da die Säulen nur eine sehr geringe Wandstärke haben, besteht dieser Werkstoff hauptsächlich aus mit Luft gefüllten Kammern, so dass eine Prüfung mit Ultraschall auf den ersten Blick nicht möglich erscheint. In Feldversuchen konnte jedoch gezeigt werden, dass bei geeigneter Materialqualität und Prüffrequenz eine Prüfung dieses Werkstoffes mittels eines Rollenprüfkopfes im Impuls-Echo Verfahren möglich ist.

Bei der Prüfung des Wabenkernmaterials wird die Beobachtungsblende auf das Rückwandsignal positioniert und ein C-Bild aufgenommen. Sollte der Wabenkern eine Schädigung aufweisen, bricht das Rückwandsignal merklich ein. In Abb.2 (rechts) ist das C-Bild eines Wabenkernmusters, welches eine Schädigung aufweist, dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die sonst hohe Reflektionsamplitude des Rückwandsignals (rot dargestellt) in einem begrenzten Bereich deutlich einbricht (blau dargestellt). In diesem Bereich liegt die Schädigung des Wabenkernes vor. Da nur der Abfall des Rückwandsignales beobachtet wird, ist keine Aussage über die Lage der Schädigung im Wabenkern, z.B. Ablösung der Ober –

oder Unterlage bzw. Schädigung des Wabenkerns, möglich. Es sei hier noch einmal darauf hingewiesen, dass die Prüfbarkeit stark von der Qualität des Materials abhängig ist, und somit vor jeder Prüfung sichergestellt werden muss, dass ein Rückwandsignal zu beobachten ist.

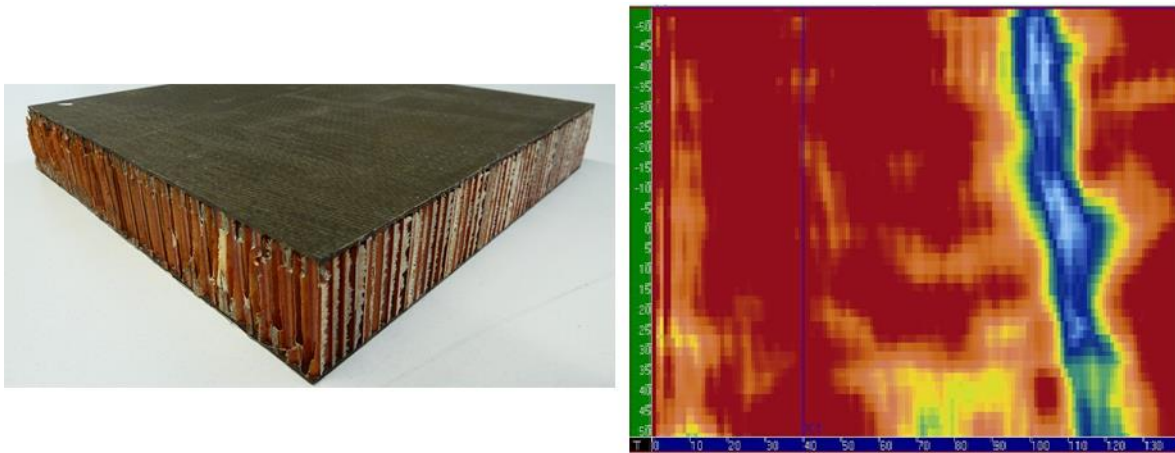


Abb. 2. Rechts ist das untersuchte Wabenkernmuster dargestellt, links daneben das zugehörige C-Bild. Der geschädigte Bereich wird durch eine Abschwächung der Signalamplitude (blau dargestellt) detektiert.

1.2 Bahnsektor

Im Bahnsektor werden glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) hauptsächlich als Verkleidung von Triebwagen eingesetzt. Jedoch besteht auch in diesem Sektor der Trend zur Gewichtsreduktion, so dass der Anteil an Verbundwerkstoffen im Bahnsektor in den kommenden Jahren durchaus an Bedeutung gewinnen wird. Der GFK wird dabei entweder in Sandwichmaterialien oder als reines Laminat eingesetzt. Bei Sandwichmaterialien wird ein Schaumstoffkern von einem oberen und einem untern GFK Laminat umschlossen. Abb.3 (links) zeigt den Aufbau solch eines Sandwichmaterials. Die Anforderung besteht in der Detektion von Defekten wie z.B. Delaminationen oder Ablösungen des Laminates, welche entweder fertigungsbedingt sind, oder durch einen Kollisionsschaden entstehen können. Die Detektion der Defekte erfolgt dabei über die Auswertung der mit dem Rollenprüfkopf aufgenommenen C- und B-Bilder. In Abb. 3 (rechts) sind die C- und B-Bilder des von der Oberseite aus geprüften Sandwichmaterials dargestellt. Die Delamination in der Mitte des oberen GFK Laminates kann eindeutig identifiziert werden. Eine Prüfung des unteren Laminates von der Oberseite aus ist mit dem Impuls – Echo Verfahren aufgrund des extrem stark absorbierenden Schaumkernes nicht möglich.

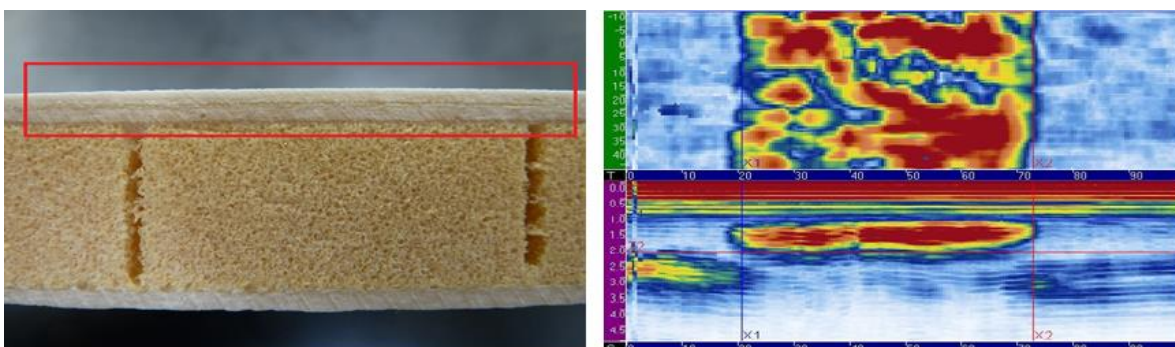


Abb. 3. Rechts ist der Aufbau eines Sandwichmaterials gezeigt, welches eine Delamination im oberen GFK Laminat aufweist (rotes Rechteck), links daneben ist das zugehörige C- und B-Bild dargestellt, in denen die Delamination in ihrer Flächenausdehnung und Tiefenlage eindeutig identifiziert werden kann.

1.3 Windenergiesektor

Der steigende Bedarf an zerstörungsfreien Prüfungen bei der Herstellung und der in Betrieb befindlichen Windkraft Rotorblättern wird aufgrund der steigenden Anzahl dieser Anlagen in Zukunft unabdingbar sein. Rollenprüfköpfe sind für die volumetrische Prüfung der Rotorblätter auf Delaminationen und der Prüfung der Stegverklebungen geeignet. Da bei der volumetrischen Prüfung teilweise mehrere Zentimeter GFK durchdrungen werden müssen, ist eine niedrige Prüffrequenz von 500 kHz nötig. Durch Messungen an Testkörpern konnte gezeigt werden, dass Delaminationen mit einem Durchmesser von 12 mm bis in eine Materialtiefe von 65mm detektiert werden können. Sowohl die Vorlaufstrecke des Rollenprüfkopfes, als auch die Ultraschalleistungsfähigkeit, würde theoretisch auch Prüfungen von Materialstärken von 80 mm und mehr erlauben, jedoch konnte von keinem Hersteller ein Testkörper mit Referenzfehlern in diesen Tiefen zur Verfügung gestellt werden um dies experimentell nachzuweisen.

Bei der Überprüfung von Stegverklebungen wird die Beobachtungsblende des Ultraschallgerätes auf das Rückwandsignal des Gurtes, von dessen Oberfläche aus geprüft wird, gesetzt. Verklebte Bereiche werden über eine Abschwächung des Rückwandsignales detektiert, da der Schalldruck teilweise oder komplett in die Verklebung transmittiert wird. Somit wird das reflektierte Signal abgeschwächt. Fehlerhafte Bereiche, in denen keine Verklebung vorliegt, erscheinen mit hoher Signalamplitude in der Auswertebende. Abb. 4 zeigt das C-Bild einer Stegverklebung eines Teststückes. Der Steg war auf ca. 60mm dicken GFK aufgeklebt. Auf dem C-Bild sind eindeutig die nicht verklebten Flächen durch eine hohe Signalamplitude (rote Bereiche) zu erkennen. Im Bereich des Steges fällt die Signalamplitude ab (gelbe und blaue Bereiche), welches auf eine vorhandene Verklebung schließen lässt. Im Bereich der Verklebung sind zudem drei Anzeigen mit einer hohen Signalamplitude zu identifizieren. Diese erhöhten Signalamplituden stammen von in die Verklebung eingebrachten Kanälen. Diese Kanäle veranschaulichen die Identifikation von Fehlstellen in der Verklebung.

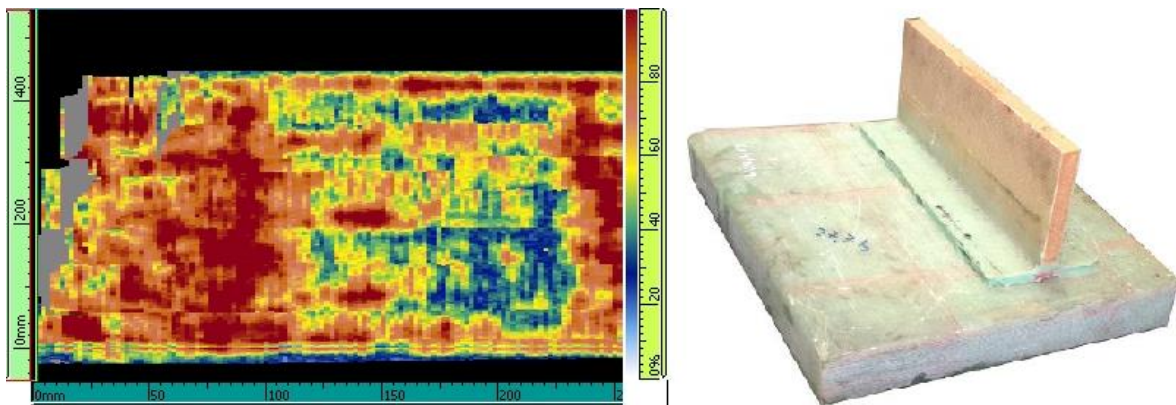


Abb. 4. Rechts ist das Prüfstück mit dem auf 60 mm dicken GFK aufgeklebten Steg dargestellt, links daneben ist das zugehörige C-Bild dargestellt. Die verklebten Bereiche werden durch eine Abschwächung der Signalamplitude im Beobachtungsbereich detektiert.

2. Automatisierte Prüfung von Verbundwerkstoffen

Die automatisierte Prüfung von Kohlefaserverbundwerkstoffen, Wabenkernmaterialien oder Sandwichstrukturen spielt insbesondere im Luftfahrtsektor eine große Rolle, da die Hersteller sicherstellen müssen, dass ihre Komponenten der im Luftfahrtsektor geforderten

hohen Qualität entsprechen. Mit dem wachsenden Trend zur Leichtbauweise ist es jedoch nicht auszuschließen, dass Verbundwerkstoffe in andere Sektoren wie den Automobil- oder Bahnsektor einziehen, und auch in diesen Segmenten bei hohen Stückzahlen eine automatisierte Prüfung etabliert wird.

2.1 Rokstar und Hydrastar Plattform

Für die automatisierte Prüfung von Verbundwerkstoffen bietet GE Sensing & Inspection Technologies zwei Plattformen an. Beide Plattformen bieten die Möglichkeit unterschiedliche Inspektionstools einzusetzen und ermöglichen eine Zustellung auf die Bauteilgeometrie in 6 Dimensionen. Bei der Rokstar-Plattform handelt es sich um eine Portallösung in der zwei Prüfarme das Bauteil prüfen. Über eine Linearführung des gesamten Portals wird eine vollständige Abdeckung des Bauteils gewährleistet. Durch den Portal-Ansatz zeichnet sich die Rokstar-Plattform durch eine ausgezeichnete Ausrichtung der Prüfköpfe zueinander aus, die bei der Durchschallungstechnik zu einer Prüfhomogenität von $\pm 1\text{dB}$ über das gesamte Bauteil resultiert.

Bei der Hydrastar-Plattform handelt es sich um eine robotergestützte Lösung. Die Hydrastar-Plattform bietet somit einen auf das Prüfproblem zugeschnittenen Aufbau, in dem entweder zwei synchronisierte Roboter die Prüfung durchführen, oder auch nur ein einzelner Roboter zur Prüfung eingesetzt werden kann. Abb. 5 illustriert diese beiden Plattformen.

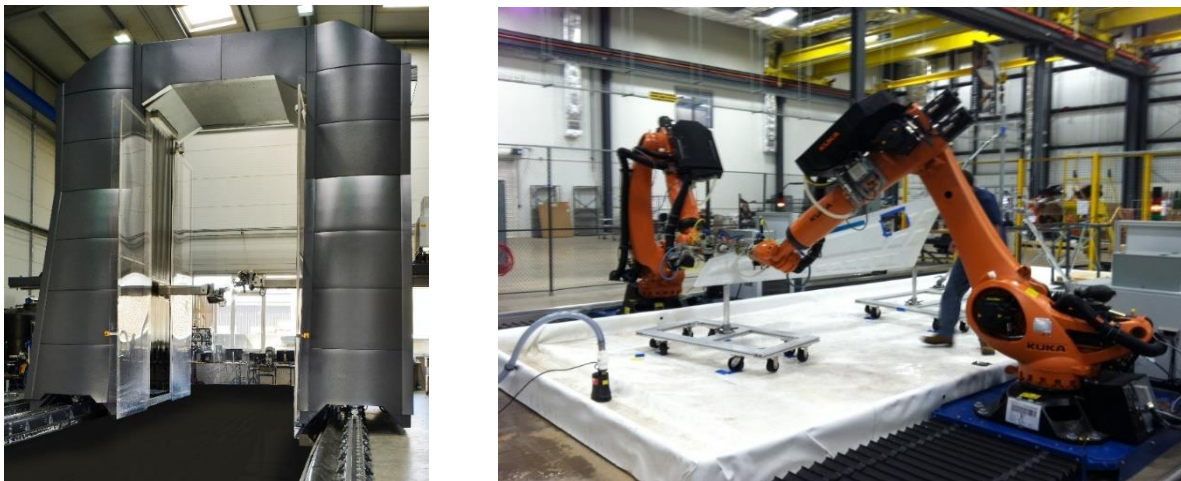


Abb. 5. Links: Rokstar Portal Plattform. Rechts: Hydrastar Robotik Plattform.

Beide Plattformen ermöglichen die Definition der Bauteilgeometrie in der Software über mechanische Teach-Pin, Laser gestützte Teach-Pin oder Weißlicht Metrologie. Zudem ist es möglich die Bauteilgeometrie über eine CAD Datei in die Software einzubinden. Nach der Definition der Bauteilgeometrie kann in der Software ein Scan Plan definiert und simuliert werden, um sicherzustellen das alle relevanten Bereiche mit der geforderten Abdeckung geprüft werden, und es zu keinen Kollisionen zwischen Bauteil und Prüfmechanik kommt. Bei der Erstellung des Scan-Planes wird zudem die Bauteildicke berücksichtigt um eine optimale Prüfkopfposition zu gewährleisten.

Die Prüfung der Bauteile erfolgt entweder in der Durchschallungstechnik, welche insbesondere bei Wabenkernmaterialien eingesetzt wird, oder im Impuls-Echo-Verfahren. Dabei können sowohl konventionelle Ein-Schwinger als auch Array-Prüfköpfe verwendet werden. Array-Prüfköpfe können entweder als Linear-Arrays zur Vergrößerung der Spurbreite und somit zur Reduzierung der Prüfzeit, oder bei komplexen Geometrien als

Phased-Array Prüfköpfe zur Adaption der virtuellen Prüfköpfe auf die Bauteilgeometrie eingesetzt werden.

Abb. 6 zeigt einen Vergleich eines mit konventionellen Ein-Schwinger-Technik in Durchschallung aufgenommenen C-Bildes mit dem eines mittels eines Linear-Array in Durchschallung aufgezeichneten C-Bildes. Auf der linken Hälfte der Durchschallungsbilder lassen sich einzelne in das Prüfstück laminierte künstliche Fehlstellen (rote Quadrate) identifizieren. Die rechte Hälfte zeigt einen Bereich in Sandwichbauweise, dessen Kontur durch einen starken Abfall der Durchschallungsamplitude (in Blau dargestellt) identifiziert werden kann. Innerhalb der Sandwichstruktur lassen sich einzelne künstlich eingebrachte Fehlstellen durch eine sehr geringe Signalamplitude (in Blau dargestellt) identifizieren. Die Anzeigen im Linear-Array-Bild sind vergleichbar mit den Anzeigen des mittels konventionellen Ein-Schwinger-Prüfköpfes aufgenommenen C-Bildes. Der Vorteil der Linear-Array Prüfung liegt in der reduzierten Prüfzeit, da in diesem konkreten Beispiel nur 19 Prüfspuren erfasst wurden, während mit konventioneller Ein-Schwinger-Technik 280 Prüfspuren nötig waren. Somit konnte in diesem konkreten Beispiel die Prüfzeit um einen Faktor von ca. 15 reduziert werden.

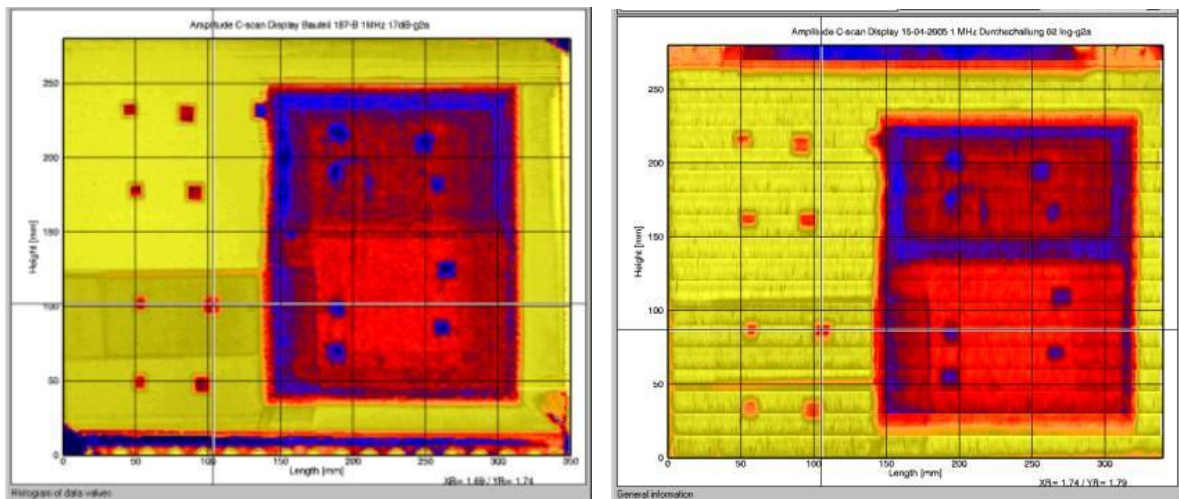


Abb. 6. Links: Mittels Ein-Schwinger Prüfkopf aufgenommenes C-Bild, 280 Prüfspuren. Rechts: Mittels Linear-Array aufgenommenes C-Bild, 19 Prüfspuren.

In beiden Plattformen wird die leistungsfähige UTxx-Hardware und Nuscan-Software verwendet. Diese ermöglichen eine freie Konfiguration der einzelnen Prüfungen basierend auf den eingesetzten Inspektionstools und Scan-Plänen. Zudem verfügt die Hardware über einen High-Power-Pulser welcher bei der Prüfung von Wabenkernmaterialien oder anderen Sandwichbauweisen eingesetzt werden kann, um ein gutes Signal-zu-Rausch-Verhältnis in der Durchschallungstechnik zu erreichen. Im Allgemeinen liegt das Signal-zu-Rausch-Verhältnis bei der Durchschallungstechnik bei 90dB. Neben den direkten über Blenden definierten Amplituden- und Laufzeit-Bildern können auch die vollständigen A-Bilder der kompletten Prüfung gespeichert werden, so dass eine weiterführende Analyse und Auswertung der Daten am PC möglich ist. Zudem kann auch eine ALOK-Funktionen gewählt werden, bei der es sich um eine Datenreduktion der A-Bilder handelt. Mit Hilfe dieser Funktion lässt sich die Größe des Datensatzes reduzieren, wobei die relevanten Informationen aus den A-Bildern erhalten bleiben. Nach einer vorhergehenden Konfiguration der Analysesoftware kann eine automatische Defekterkennung mit Größenangaben erfolgen und automatisierte Berichte können erstellt werden.

2.2 Reverse Phasing Contour Adaptation

Die Reverse Phasing Contour Adaptation (RCPA) Methode ermöglicht eine auf die Bauteilgeometrie angepasste Ansteuerung eines Phased-Array-Prüfkopfes, der im Impuls-Echo-Verfahren betrieben wird. Diese Methode stellt sicher, dass das Schallfeld senkrecht auf der zu prüfenden Fläche steht. In einer ersten Schusssequenz wird die Laufzeit des Ultraschall-Signals der einzelnen virtuellen Prüfköpfe zur Bauteiloberfläche gemessen. Diese Information wird in einer zweiten Schusssequenz dazu genutzt die virtuellen Prüfköpfe so anzusteuern, dass eine senkrechte Einschallung auf die Oberfläche gewährleistet werden kann. Dieses Adaptieren der virtuellen Prüfköpfe auf die Bauteilgeometrie ermöglicht eine höhere Fehler-Auffinde-Wahrscheinlichkeit und eine getreuere Abbildung insbesondere in Hinsicht auf die Ausdehnung der sich im Bauteil befindlichen Anzeigen. Abb. 7 veranschaulicht die Prüfergebnisse eines konvex geformten Bauteils mit und ohne RCPA.

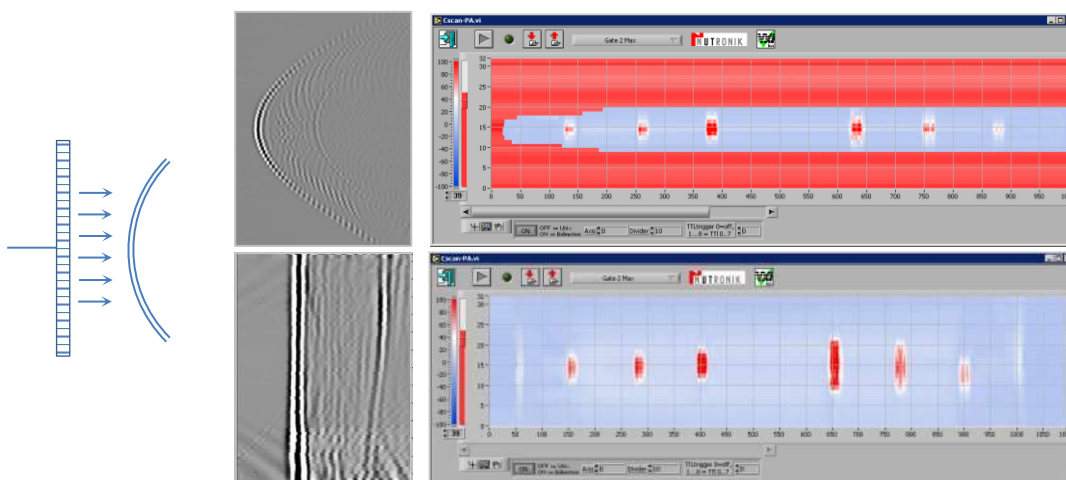


Abb. 7. Oben: B-Bild einer konvexen Oberfläche, welches die unterschiedlichen Laufzeiten der virtuellen Prüfköpfe bis zum Bauteil offenlegt. Rechts daneben ein C-Bild, aufgenommen entlang der Krümmungskontur. Unten: B-Bild der selben Oberfläche mit aktivierter RCPA, sowie resultierendes C-Bild. Die Ergebnisse verdeutlichen die getreuere Abbildung der Anzeigen mittels der RCPA-Methode

Durch den Vergleich der beiden B-Bilder wird ersichtlich, dass durch die RCPA-Methode die Geometrie des Bauteiles berücksichtigt wird, sodass die Prüfung quasi der an einem ebenen Bauteil entspricht. Die somit optimalen Prüfbedingungen zur Detektion von Ungängen führen zu einer ortsgetreueren Darstellung von Anzeigen. Diese ortsgetreuere Darstellung wird durch den Vergleich der beiden C-Bilder in Abb. 7 deutlich. Im oberen C-Bild welches ohne RCPA aufgenommen wurde, erscheinen die Anzeigen (in Rot dargestellt) in ihrer Ausdehnung geringer als im unteren C-Bild. Somit würden die Anzeigen ohne die Verwendung der RCPA in ihrer Ausdehnung unterbewertet.

2.3 Inspektionstools für die Rokstar und Hydrastar Plattform

Um den unterschiedlichen Prüfungsherausforderung komplex geformter Bauteile gerecht zu werden, verfügen sowohl die Rokstar- als auch die Hydrastar-Plattform über mehrere Inspektionstools, welche an die Roboterarme angeflanscht werden können. Abb. 8 illustriert die verfügbaren Tools und zeigt deren typische Anwendung auf. Die einzelnen Tools können in beiden Plattform schnell gewechselt werden, so dass die Prüfungen eines Bauteils auch mit mehreren Tools durchgeführt werden kann, sollte dies die Bauteilgeometrie erfordern.

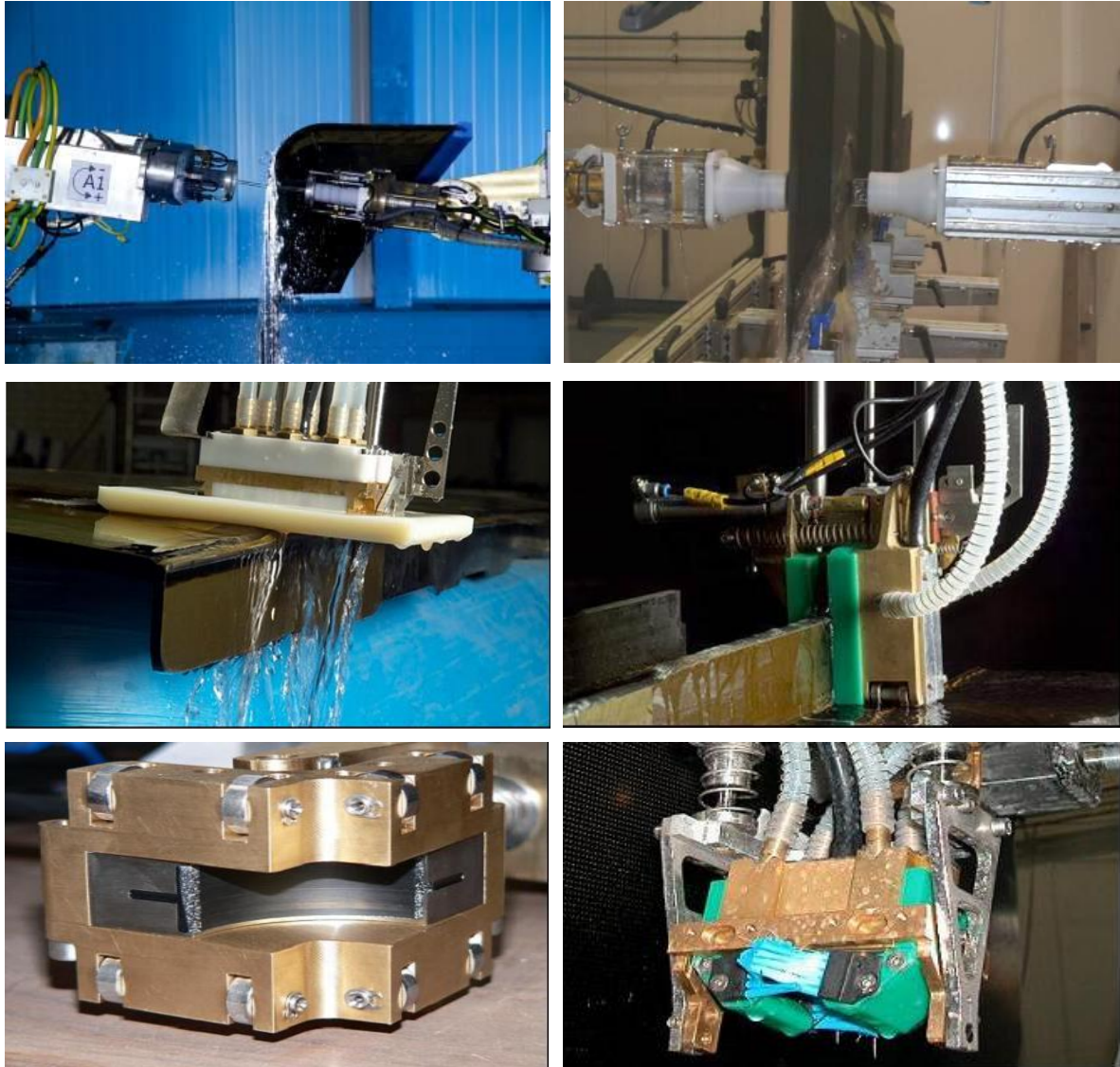


Abb. 8. Übersicht über die Inspektionstools für die Rokstar- und Hydrastar-Plattform. Oben links: Ein-Schwinger Sqrifter Prüfung in Durchschallung. Oben rechts: Großflächige Linear-Array Prüfung in Durchschallung. Mitte links: Linear-Array Prüfung auf relativ ebenen Flächen im Impuls-Echo Verfahren. Mitte rechts: Linear-Array Prüfung der Verstärkerrippen von T-Stringer im Impuls-Echo Verfahren. Unten links: Phased-Array Prüfung von konkaven Radien mittels RPCA im Impuls-Echo Verfahren. Unten rechts: Phased-Array Prüfung von konvexen Radien mittels RPCA im Impuls-Echo Verfahren.

3. Zusammenfassung

Es wurden unterschiedliche maßgeschneiderte Lösungen für komplexe Prüfaufgaben in der manuellen und automatisierten Prüfung von Verbundwerkstoffen vorgestellt, welche von den Spezialisten in den Applikationslaboren zusammen mit den Anwendern entwickelt wurden. Bei der manuellen Prüfung haben sich Linear-Array Rollenprüfköpfe etabliert, da sie eine „fast trockene“ und flexible Ankopplung auf der Bauteilgeometrie ermöglichen. Für die automatisierte Prüfung wurden zwei Plattformen vorgestellt, welche kundenspezifisch auf die Prüfaufgabe ausgelegt werden können. Beide Plattformen ermöglichen das Einbinden komplexer Bauteil Geometrien in die Software über CAD Dateien zur Erstellung eines Scan-Planes sowie der anschließenden Simulation der Prüfbahnen am Rechner.