

Robotergestützte Ultraschallprüfung von CFK-Komponenten mit komplexer Geometrie

Klaus SCHLACHTER¹, Christian EITZINGER¹, Kastor FELSNER¹,
Andrey BULAVINOV², Artem BOLDYREV², Roman PINCHUK²

¹ PROFACOR, Steyr-Gleink, Österreich

² ACS-Solutions GmbH, Saarbrücken

Kontakt E-Mail: Klaus.Schlachter@profactor.at

Kurzfassung. Die konstruktions- und fertigungstechnisch optimierten Komponenten aus kohlefaserverstärkten Kompositwerkstoffen weisen in Bezug auf die Prüftechnik eine Tendenz zu immer komplexeren Bauteilen hinsichtlich Geometrie und innerem Aufbau auf. Diese Teile haben in der Regel zahlreiche, oft zweiachsig gekrümmte Oberflächen unterschiedlichster Krümmungsradien und viele verschiedene Materialmischungen. Dennoch ist die Ultraschallprüfung solcher Bauteile in der industriellen Qualitätskontrolle am meisten verbreitet.

In dem aktuellen Beitrag wird eine generalisierte Verarbeitungspipeline für eine vollautomatisierten Ultraschallinspektion von CFRP-Bauteilen für den industriellen Einsatz präsentiert. Am Beispiel realer Komponenten werden die Methoden zur Ultraschallprüfung von komplexen CFK-Bauteilen erläutert, welche auf der Basis der modernen Robotertechnik in Kombination mit der Adaptiven Full-Matrix-Capture Methode in Tauchtechnik entwickelt und für den industriellen Einsatz erfolgreich umgesetzt wurden. Die schnelle Datenerfassung und automatische Auswertung der Ultraschallprüfergebnisse wird durch Echtzeit-Rekonstruktionstechniken realisiert, die insbesondere auf die komplexe Bauteilgeometrie optimiert wurden.

Inspiziert von bemerkenswerten Erfolgen im Bereich „deep learning“, wird ein Domänen Randomisiertes – rein auf Simulationen beruhendes - Training des neuronalen Netzes vorgeschlagen. Erhebliche Vorteile dieses Ansatzes gegenüber Methoden in der aktuellen Literatur im Umfeld der zerstörungsfreien Prüfung ergeben sich durch eine unbegrenzte Verfügbarkeit der Daten inklusive zuverlässigem Ground-Truth und eine einfache Integration seltener Fehlerfälle. Zur Datenerzeugung wird ein Raytracing-Ansatz verfolgt. Dies ermöglicht die Abbildung wichtiger physikalischer Effekte und Artefakte.

Die Evaluierung des Ansatzes erfolgt anhand realer, geometrisch komplexer CFRP Bauteile mit künstlichen und natürlichen Materialfehlern. Die Ergebnisse zeigen eine erfolgreiche Überbrückung der Realitätslücke durch das Domänen-Randomisierte Training. Fehler werden mit einer geringen Falsch-Positiv Rate erkannt und erfolgreich von Wiederholungsartefakten unterschieden.

1. Einleitung

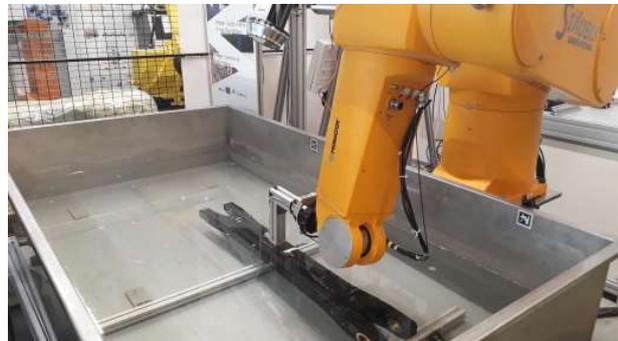
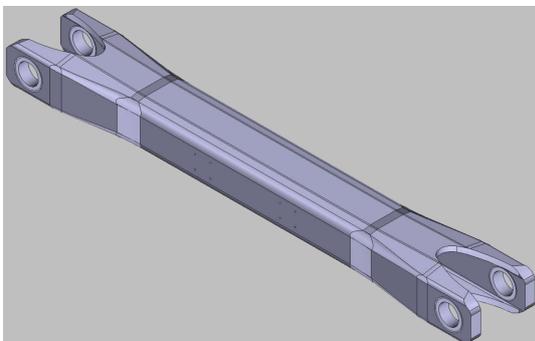
Die zerstörungsfreie Prüfung von Faserverbundwerkstoffen mittels Ultraschall hat seit Jahrzehnten einen festen Platz in der industriellen Fertigung [1]. In den meisten Fällen bietet die Ultraschallprüfung ausreichendes Fehlernachweisvermögen bei schnellen Prüfzeiten, wodurch die Ultraschallprüfung in vielen Fällen ein unschlagbares Kosten-Leistungs-Verhältnis bietet. Dies ist nicht zuletzt durch einen hohen Automatisierungsgrad realisierbar, welcher unter anderem durch den Einsatz von Knickarm-Robotern ermöglicht wird. Vor allem die Herausforderung geometrisch komplexe Teile abzutasten, kann robotergestützt besonders effektiv umgesetzt werden [2].

Jedoch ist es in der Regel so, dass robotergestützte Ultraschallprüfanlagen für einen konkreten CFK Bauteil oder für ein sehr begrenztes Spektrum an geometrisch ähnlichen Prüflingen ausgelegt werden. Der aktuelle Beitrag veranschaulicht Möglichkeiten, welche die Adaptionsfähigkeit von roboter-gestützten Prüfanlagen verbessern. Die tomografische Ultraschallbildrekonstruktion als auch die Roboter-Pfadplanung weisen einen ausreichenden Grad an Flexibilität auf, um die Anlage mit überschaubarem Aufwand auf die Prüfung von unterschiedlichen Bauteilen anpassen zu können.

Ein weiteres Kernelement in der Ultraschallprüfung ist die Bewertung des Bauteils anhand der rekonstruierten Ultraschallbilder. Dies erfolgt aktuell vorrangig durch geschultes Personal, welches Defekte mittels Erfahrung und physikalischer Interpretation der Daten identifiziert. Automatisierte Auswertungen anhand statistischer Modelle, wie sie in anderen Fachbereichen sehr erfolgreich genutzt werden, benötigen typischerweise große Datenmengen, um erfolgreich trainiert werden zu können. Datensätze in der ZfP sind jedoch knapp, da sie selten veröffentlicht werden und deren Erzeugung aufwendig und teuer ist. Um dieser Limitierung entgegenzuwirken, schlagen wir im Folgenden ein Training mithilfe eines, durch Simulationen erzeugten, Domänen-randomisierten Datensatzes vor.

2. Gesamtsystem-Überblick

Das im Rahmen des europäischen Förderprojektes SONICSCAN entwickelte robotergestützte, auf Tauchtechnik basierende Ultraschallprüfsystem ermöglicht die Prüfung von geometrisch komplexen CFK-Bauteilen. Die Erarbeitung der prüftechnischen Grundlagen sowie der Algorithmen für die flexible Pfadplanung erfolgte anhand eines Bauteils aus der Luftfahrtindustrie. Abb. 1 zeigt den - für die Experimente verwendeten - aus CFK gefertigten Querbalken eines Fahrwerks.



a) Querbalken eines Fahrwerkes aus CFK (Modell) b) Das Bauteil in der Prüfanlage

Abb. 1: Ultraschallprüfung eines Fahrwerksquerbalken aus CFK.

Zur Erarbeitung des Ultraschallprüfkonzeptes wurden zusätzlich Referenzkörper aus demselben Material hergestellt und künstliche Materialfehler in Form von

Flachbodenbohrungen mit Durchmessern von 3 mm und 6 mm eingebracht (siehe Abb. 2). Diese Referenzkörper dienten der Entwicklung der Bildrekonstruktionsalgorithmen und der Verifizierung der automatisierten Fehlerdetektion.

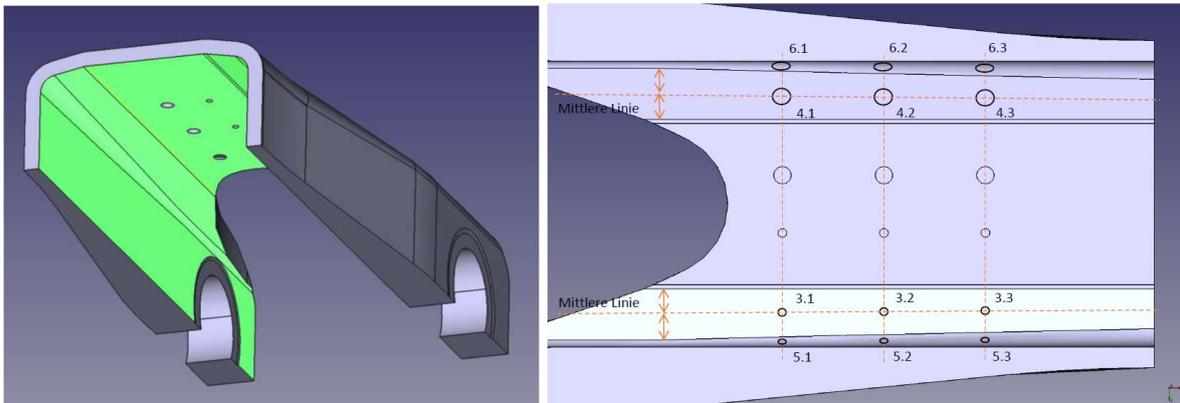


Abb. 2: Referenzkörper mit künstlichen Materialfehlern

Abb. 3 zeigt die robotergestützte Abtastung des Bauteils in Tauchtechnik. Das Prüfsystem setzt einen regulären Gruppenstrahlwandler mit 128 Elementen (Pitch 1 mm, Elevation 10 mm) ein, wobei die Beschallung mit einer Prüffrequenz von 5 MHz erfolgt.

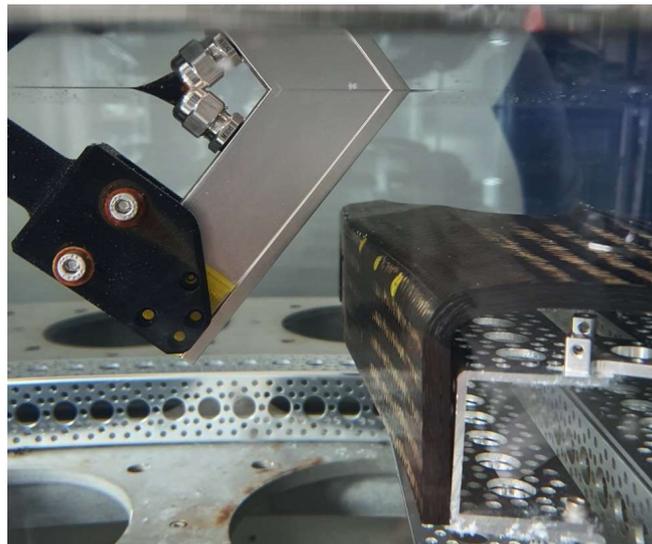


Abb. 3: Tauchtechnik-Gruppenstrahlwandler am Bauteil

Die Pfadplanung erfolgt anhand eines vollständigen Modelles der Roboterzelle und des Bauteils anhand einiger – für die Ultraschallprüfung vorteilhaften – Randbedingungen:

- Die Sensorlängsachse ist zu jedem Zeitpunkt entlang der größten lokalen Krümmung der Bauteiloberfläche ausgerichtet (siehe Abb. 3).
- Der Sensor wird orthogonal zur Sensorlängsachse über das Bauteil geführt. Das virtuelle Modell des Gesamtsystem erlaubt dabei eine kollisionsfreie Pfadeinstellung.
- Ein Raytracing Ansatz wird genutzt, um die Abdeckung zu berechnen. Dabei wird angenommen, dass ein Volumenelement inspiziert werden kann, falls Signalpfade existieren, die das Volumenelement passieren, von der Bauteilrückwand reflektiert werden und erneut auf den Sensor treffen.

Eine Ausführliche Beschreibung der Umsetzung kann [3] entnommen werden.

3. Tomografische Echtzeit-Rekonstruktion des Bauteilvolumens

Im Folgenden werden Methoden für die volumetrische Rekonstruktion und deren Darstellung in Echtzeit während der Bauteilabtastung beschrieben.

3.1 Adaptive Total-Focusing-Methode (TFM)

Die TFM implementiert das Laufzeit-Tomografieprinzip. Dies ist auch als Synthetische-Apertur-Fokus-Technik, bezogen auf Gruppenstrahlwandler mit multiplen Sender-Empfänger Kombinationen innerhalb der aktiven Arrayapertur, bekannt [4]. Die adaptive Rekonstruktionsmethode erfordert in diesem Fall die Berücksichtigung der Brechung von Ultraschallwellen, welche bei der Einschallung in das Bauteil über ein Immersionsmedium auftritt. Um die Berücksichtigung der Brechung zu ermöglichen, erfolgt die Synthese des Ultraschall-B-Bildes separat für jede Messposition des Ultraschallwandlers in zwei aufeinanderfolgenden Teilschritten. Im ersten Rekonstruktionsschritt wird das Außenprofil des Bauteils rekonstruiert, indem die Laufzeitberechnung und die Bildsynthese anhand der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit im Immersionsmedium „Wasser“ durchgeführt wird. Das im ersten Schritt räumlich lokalisierte Bauteilprofil dient als Eingangsgröße für den zweiten Rekonstruktionsschritt. Dabei erfolgt die abschließende Bildsynthese für das Medium „Kohlefaser“ unter Berücksichtigung des Snellius'schen Brechungsgesetzes.

Die beiden oberen Bilder in Abb. 4 demonstrieren die Erfassung des Oberflächenprofils, die beiden unteren Bilder zeigen die Bauteil-Volumenrekonstruktion in einer Prüfposition. Der Referenzkörper besitzt an dieser Stelle vier künstlich eingebrachte Defekte in mittlerer Tiefenlage. Zwei Flachbodenbohrungen besitzen einen Durchmesser von 3 mm und weitere zwei einen Durchmesser von 6 mm. Durch eine für die Grafikkarte optimierte Implementierung der Rekonstruktionsschritte [5], kann eine Bildwiederholrate von ca. 25-30 Hz erzielt werden. Dies erlaubt eine Vorschubgeschwindigkeit von mindestens 25 mm / s während der Bauteilabtastung.

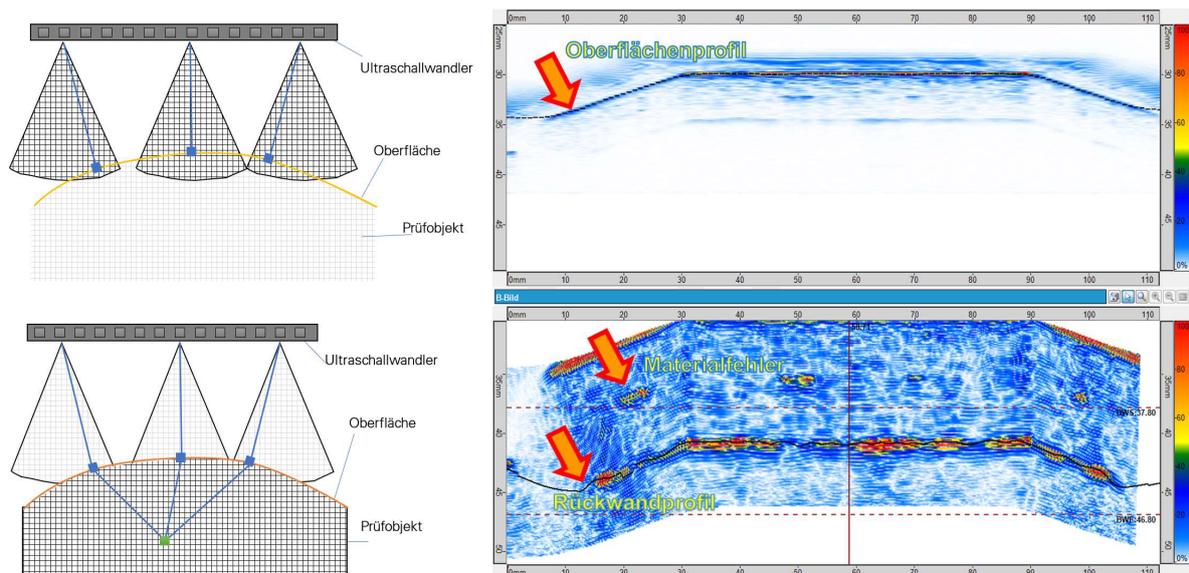


Abb. 4: Das Prinzip der adaptiven TFM-Rekonstruktion in einer Prüfposition des Ultraschallwandlers

3.2 Adaptive Volumenblende

Das rekonstruierte Bauteilvolumen kann bereits während der Datenaufnahme in Echtzeit mit ausgeblendeter Vorder- und Rückwand dargestellt werden. An die oben beschriebene adaptive TFM-Rekonstruktion eines unebenen/nicht-planparallelen Bauteils anschließend, erfolgt dazu eine adaptive Parametrierung einer Fehlerblende, innerhalb derer Fehleranzeigen erfolgen. Das Vorderwandprofil wird während der TFM Rekonstruktion ermittelt, die Rückwandlagenerkennung erfolgt anhand der rekonstruierten Volumendaten innerhalb einer eingestellten Rückwandblende (rot strichlierte Linien in Abb. 4 unten rechts) Da im Allgemeinen das Rückwandsignal infolge von Abschattung regelmäßig geschwächt ist, wird mit entsprechenden Interpolationstechniken eine lückenlos verlaufende Rückwandanzeige sichergestellt (siehe Abb. 4). Anhand der identifizierten Vorder- und Rückwandprofile erfolgt eine dynamische Nachführung der Fehlerblende.

Eine große Herausforderung für die Umsetzung der oben beschriebenen Blendennachführung stellt die Unterscheidung der Geometrie (Oberfläche und Rückwand) von Signalen nahe an der Oberfläche liegender Fehler dar. Als besonders effektive Technik mit niedriger Fehlalarmrate hat sich hierbei die gleitende Mittelung des Amplitudenwertes in der entsprechenden Oberflächenblende erwiesen.

3.3 Überlagerung der CAD-Modeldaten und der rekonstruierten Ultraschall-Voxeldaten

Abschließend werden, zur Darstellung der Ultraschalldaten in Echtzeit, die volumetrisch rekonstruierten Ultraschalldaten mit den CAD-Daten des Bauteils zusammengeführt. Die beiden Datensätze verfolgen grundlegend verschiedene Repräsentationsparadigmen. Die rekonstruierten Ultraschalldaten beschreiben das Bauteilvolumen, indem jedem Volumenelement des Raums ein Wert zugewiesen wird, während CAD-Daten die Bauteiloberfläche mithilfe von beliebig großen Polygonen beschreiben. Die gleichzeitige Visualisierung beider Datensätze erfordert daher - neben einer entsprechenden Registrierung (Ermittlung der relativen Lage) beider Datensätze - die Anwendung unterschiedlicher Rendering-Mechanismen. Die im Rahmen des Projektes entwickelte Applikationssoftware ermöglicht eine Echtzeit-Abbildung der 3D-Daten unmittelbar während der Ultraschalldatenaufnahme (Abb. 5).

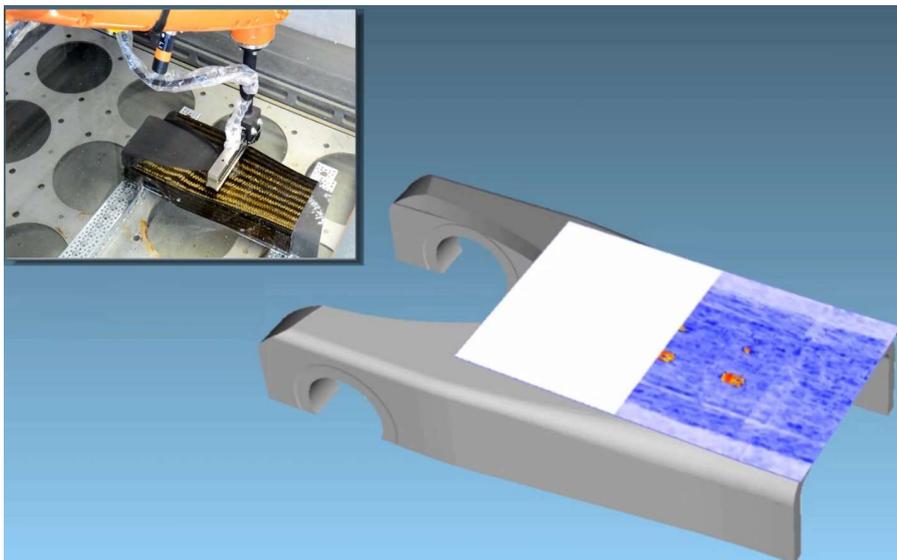


Abb. 5: Darstellung der Ultraschallprüfergebnisse in Echtzeit.

Trotz der sehr anschaulichen Darstellungsmöglichkeiten bereits während der Bauteilabtastung, ist eine manuelle Auswertung der Ultraschallprüfergebnisse und die Lokalisierung und Vermessung der Ultraschallanzeigen in einer spezialisierten Off-Line 3D-Datenauswertesoftware vorgesehen (Abb. 6).

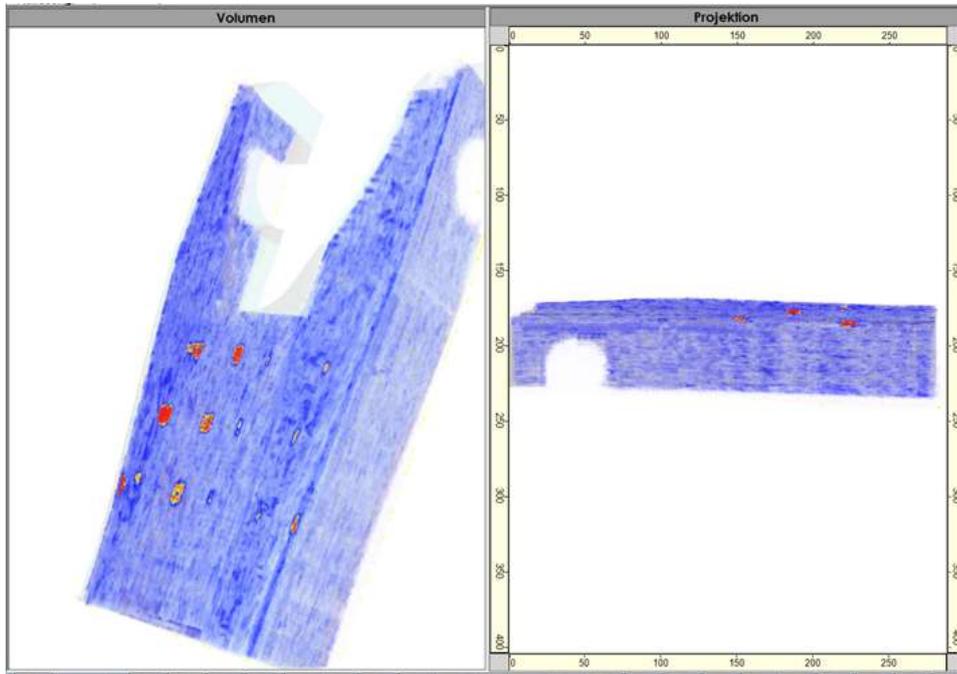


Abb. 6: Darstellung des Bauteils mit Flachbodenbohrungen.

4. Defekterkennung

Zusätzlich zur Möglichkeit einer manuellen Auswertung mithilfe der zuvor beschriebenen spezialisierten Software, wurde im Projekt SONICSCAN eine automatisierte Fehlererkennung entwickelt. Die Datenauswertung in der Ultraschallprüfung erfolgt typischerweise manuell durch geschulte Personen. In die Bewertung fließen dabei diverse Signalcharakteristiken ein. Dieser komplexe Entscheidungsprozess lässt sich leider kaum algorithmisch fassen, um die Entwicklung klassischer Algorithmen zu ermöglichen. In diesem Kapitel stellen wir eine Auswertung mithilfe eines neuronalen Netzwerkes vor, das anhand Domänen-randomisierten Simulationen trainiert wurde.

Die Anwendung statistischer Modelle in der ZfP wird stark durch die geringe Menge an zur Verfügung stehenden Trainingsdaten gebremst. Die geringe Verfügbarkeit ist dadurch bedingt, dass Daten selten der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt werden, da Aufnahmen des Innenlebens einzelner Bauteile vertrauliche Details offenlegen können. Außerdem ist das Erzeugen von Trainingsdaten in der ZfP oft sehr aufwendig und dementsprechend teuer.

Eine Alternative stellt das Training anhand simulierter Daten dar. Große Vorteile simulationsbasierter Ansätze ergeben sich dadurch, dass (i) die Datensätze einfach skalierbar sind, (ii) Ground Truth ohne weiteren Aufwand als Nebenprodukt verfügbar ist und (iii) Grenzfälle – die in der Realität definitionsgemäß selten auftreten – einfach in den Trainingsprozess integrierbar sind. Die wirklichkeitsgetreue Simulation von Daten komplexer ZfP Methoden ist allerdings äußerst herausfordernd, da komplexe Modelle benötigt werden und eine hohe Anzahl an Parametern, die beispielsweise die Oberflächeneigenschaften, Signaldämpfung und Wellenausbreitung festlegen, identifiziert werden müssen.

Das 2017 in [6] vorgeschlagene Training mit Domänen-randomisierten Datensätzen ermöglicht in vielen Anwendungsfällen ein Training anhand von Simulationen mit geringer Wirklichkeitstreue. Dieser Ansatz wird in den letzten Jahren sehr erfolgreich in der Robotik angewandt, erfährt bisher jedoch wenig Beachtung in der aktuellen ZfP Literatur. Dabei wird an Stelle eines Simulators, der das reale System möglichst exakt abbildet, auf eine Randomisierung des Simulators selbst gesetzt. Die Annahme dabei ist, dass bei ausreichender Variation, die reale Welt schlicht wie eine weitere Variation des Simulators erscheint [6].

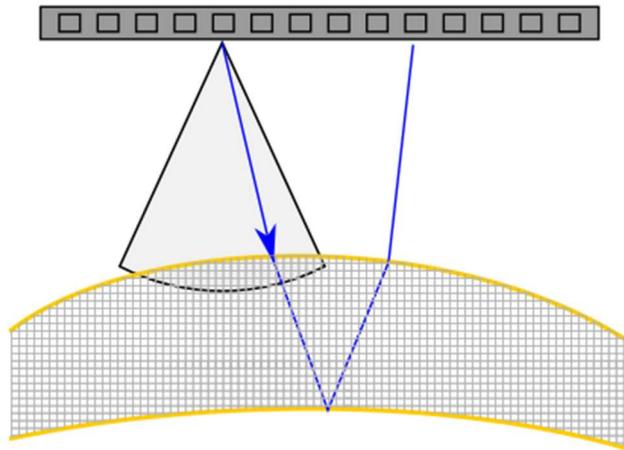


Abb. 7: Veranschaulichung eines durch die virtuelle Szene verfolgten Strahls.

4.1. Simulation von TFM Bildern

Typische Effekte in der Ultraschallprüfung, die in den Trainingsdaten abgebildet werden sollen, sind die Rückwandabschattung, Mehrfachreflexionen und Ghost-Artefakte. Das Simulationsmodell muss dazu berücksichtigen, dass Schall an Grenzflächen (Übergänge zwischen zwei Medien) teilweise reflektiert und teilweise transmittiert wird und dass unterschiedliche Signalpfade von der Quelle zum Empfänger durch mehrfache Reflexionen und Transmissionen zustande kommen. Die Simulation von Ultraschalldaten wurde mithilfe eines geometrischen Modells der Beschallung umgesetzt, welches die oben genannten Effekte abbildet.

4.2 Stochastisches Raytracing

Zur Simulation von Ultraschallschnittbildern wird die Beschallung mithilfe eines geometrischen Modells modelliert und die Full-Matrix-Capture Messung numerisch geschätzt. Abschließend wird ein TFM-Schnittbild gerendert. Die Beschallung durch Ultraschallwandler erfolgt anhand einer fächerartigen Richtcharakteristik (siehe Abb. 3 links). Die Antwortfunktion eines Sender-Empfänger Paares ergibt sich daher durch Integration infinitesimaler Beiträge der Beschallung über sämtliche zu berücksichtigende Abstrahlrichtungen. Mathematisch lässt sich das durch die sogenannte Messgleichung modellieren [7].

Numerisch nähern wir die Lösung der Messgleichung mithilfe einer Monte-Carlo Integration an (diese Vorgehensweise wird in der Literatur als Backwards¹ Raytracing bezeichnet). Dazu werden – wie in Abb. 7 dargestellt - diskrete Richtungen anhand der Richtcharakteristik gesampelt und deren Pfad durch eine virtuelle Szene verfolgt, bis sie schließlich durch eine oder mehrere Reflexionen und Transmissionen wieder auf ein Empfängerelement des Ultraschallwandlers treffen.

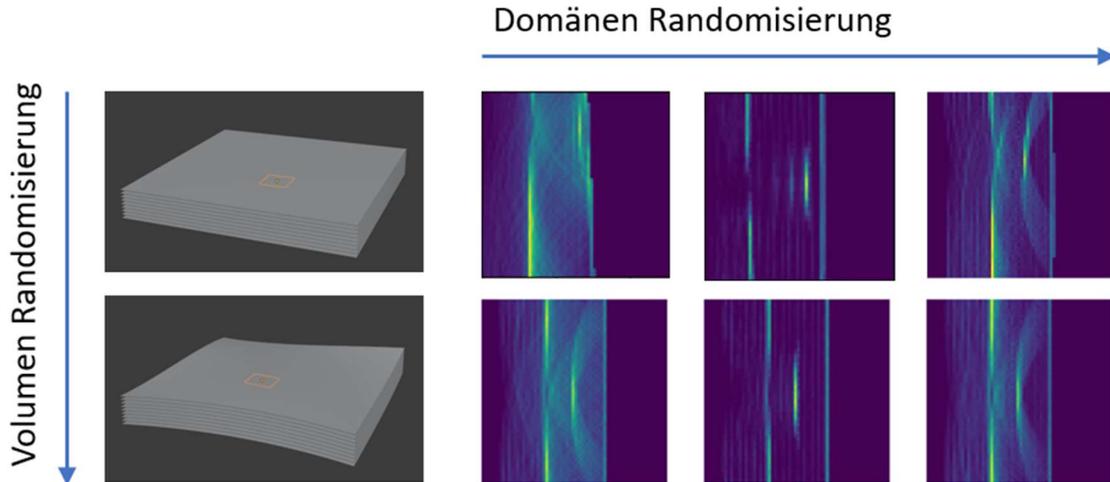


Abb. 8: Zum Training verwendete Beispieldaten.

Trifft ein Strahl auf eine Grenzfläche, wird ein Teil der Energie reflektiert und ein Teil der Energie transmittiert. Das Streuverhalten wird zusätzlich durch die Bidirectional Reflection Distribution Function (BRDF) modelliert. Reflexions- und Transmissionsrichtungen werden anhand der BRDF gesampelt und Verzweigungen des Pfades weiterverfolgt. Russian Roulette dient dabei als Abbruchstrategie der rekursiven Strahlverfolgung². Eine detaillierte Beschreibung des Simulationsmodells und der algorithmischen Umsetzung findet sich in [8].

4.3 Domänen-randomisierte Trainingsdaten

Die Defekterkennung erfolgt durch semantische Segmentierung der Ultraschallschnittbilder durch ein neuronales Netzwerk mit U-Net Architektur, welches ausschließlich anhand simulierter Daten trainiert wurde. Zur Erzeugung eines Domänen-randomisierten Datensatzes, variieren wir neben der Bauteilgeometrie zusätzlich die Reflexions- und Transmissionseigenschaften der Bauteiloberflächen. Dazu wird die Transmissivität und Reflektivität festgelegt und das Streuverhalten mittels der – in [9] vorgeschlagenen - BRDF

$$\rho = k(V_{R/T} \cdot \Theta)^N$$

modelliert. Die Reflexion- bzw. Transmissionsrichtung Θ streut um die Vorzugsrichtung (gegeben durch das Reflexionsgesetz bzw. Brechungsgesetz) $V_{R/T}$, Der Parameter N bestimmt die Form der Funktion, wobei die degenerierten Fälle $N = 0$ eine vollständig

¹ Als Raytracing werden traditionell Verfahren bezeichnet, die Strahlen ausgehend vom Sensor in die Szene senden. Verfahren die Strahlen ausgehend von der Quelle aussenden werden als Backwards Raytracing bezeichnet.

² Im Gegensatz zu einer maximalen Rekursionstiefe, bleibt dabei die Erwartungstreue der Schätzung erhalten.

diffuse, und $N \rightarrow \infty$ eine perfekt spiegelnde Oberfläche beschreiben. Der Faktor k wird abhängig von N so gewählt, dass eine gültige Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion vorliegt.

Randomisierte Oberflächenparametrierungen realisieren wir anhand einer Gleichverteilung. Dazu ermitteln wir zunächst einen Parametersatz, mit welchem simulierte Bilder ähnlich zu realen Ultraschallschnittbilder des Referenzsystems erscheinen. Die ermittelten Parameter dienen bei der Realisierung zufälliger Parametrierungen als Erwartungswerte (siehe Abb. 8).

4.4 Auswertung der Fehlererkennung

Die Validierung und qualitative Bewertung des vorgeschlagenen Trainingsverfahrens erfolgt anhand des Referenzkörpers aus Abb. 2. Dazu wurde ein neuronales Netzwerk mit Trainingsdaten trainiert, die anhand der diskutierten Methodik erzeugt wurden. Das trainierte Modell wurde anschließend ohne weitere Adaptierungen zur Auswertung realer Ultraschalldaten herangezogen. Die Ergebnisse sind in Abb. 9 dargestellt.

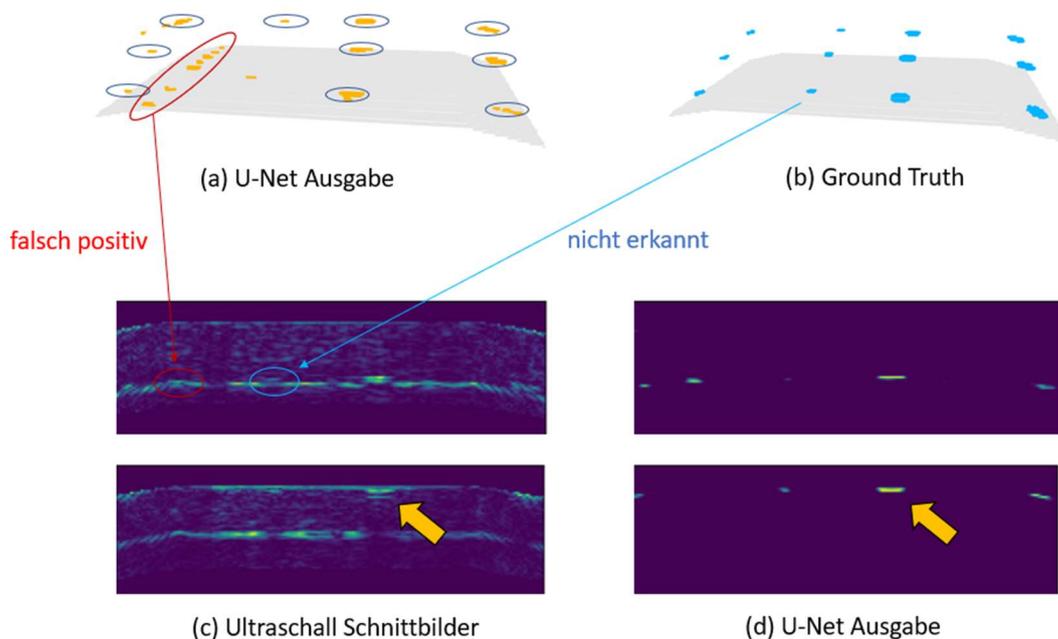


Abb. 9: Auswertung der Fehlerdetektion. Die oberen beiden Bilder zeigen den Ground Truth (rechts) und die Fehlerausgabe (links) dargestellt als 3d Punktwolken. Die Eingangsdaten (Ultraschallschnittbilder) sind in (c) und die Ausgabe des neuronalen Netzwerkes (Fehlerwahrscheinlichkeit) in (d) dargestellt. Interessant ist die korrekte Unterscheidung zwischen Defekten und Ghost-Artefakten (gelber Pfeil). Falsch-positive Fehleranzeigen treten fast ausschließlich an Bauteilkanten auf.

Insgesamt enthält das Bauteil 12 künstlich eingebrachte Defekte (Flachbodenbohrungen), welche im folgenden Schema angeordnet sind: vier Defekte sind jeweils in einer Ebene angeordnet. Defekte in der ersten Ebene haben ein Abstand zur Rückwand von 1mm; Defekte in der darauffolgenden Ebene befinden sich mittig im Bauteil; Defekte in der dritten Ebene befinden sich 1mm unter der Bauteiloberfläche. Das neuronale Netzwerk identifizierte 10 der 12 Defekte korrekt. Falsch-positive Anzeigen traten fast ausschließlich am Übergang zwischen dem geneigten und horizontalen Abschnitt der Rückwand auf.

Zusammenfassung und Ausblick

Der aktuelle Beitrag präsentiert eine flexible Prüfanlage für eine robotergestützte Ultraschallprüfung von Industrieteilen aus CFK. Kurze Umrüstzeiten zur Prüfung unterschiedlicher Bauteile werden durch eine automatisierte Roboterpfadplanung und eine adaptive tomografische Echtzeitrekonstruktion des Bauteilvolumens ermöglicht.

Eine TFM-Bildrekonstruktion wird durch einen Vorverarbeitungsschritt zur Rekonstruktion der Bauteilgeometrie ermöglicht. Eine adaptive Volumenblende und eine effiziente Datenverarbeitung erlauben eine Rekonstruktion und Visualisierung in Echtzeit mit hoher Bildwiederholrate. Es wurde demonstriert, dass die entwickelte adaptive Bildrekonstruktion in Kombination mit der flexiblen Abtastung geometrisch komplexer Bauteile ein leistungsfähiges Werkzeug zur dreidimensionalen Erfassung des Bauteilvolumens und zum quantitativen Nachweis von relevanten Materialfehlern darstellt. Dies bietet bereits eine gute Basis für eine automatisierte Datenauswertung.

Darauf aufbauend wurde eine Machine Learning Methode für die automatisierte Datenauswertung entwickelt. Die Ergebnisse legen nahe, dass ein Training anhand eines Domänen-randomisierter Datensatz eine Generalisierung auf reale Ultraschalldaten ermöglicht. Neben einem ausschließlich auf Simulationsdaten basierten Training könnte ein solcher Ansatz zudem als Pre-Training Schritt dienen und ein Fine-Tuning mit kleinem Datensatz ermöglichen. Falsch-positiv Anzeigen traten fast ausschließlich an Bauteilkanten auf. Dies könnte dadurch bedingt sein, dass der Trainingsdatensatz anhand eines sehr glatten virtuellen Bauteils erstellt wurde. Eine generelle Aussage über das Fehlernachweisvermögen des präsentierten Ansatzes ist jedoch aufgrund der kleinen Menge an Testdaten nur bedingt möglich. In einer zukünftigen Arbeit planen wir eine ausführlichere Evaluierung des Konzeptes. Eine Verbesserung des Ergebnisses versprechen wir uns außerdem durch die Integration von geometrisch vielfältigeren Modellen bei der Erzeugung von Trainingsdaten.

Acknowledgements

This research was financially supported by the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the grant agreement No 831830, project SonicScan and Clean Sky 2 Joint Undertaking (JU). This work was also supported by the county of Upper Austria and EFRE as part of the FTI strategy, project "Zer0P", and the Growth strategy, project "SmartFactoryLab".

Referenzen

- [1] Ashir M, Nocke A, Bulavinov A, Cherif C: **Sampling phased array technology for the detection of voids in carbon fiber-reinforced plastics**. Journal of the Textile Institute, May 2019.
- [2] Bulavinov A, Pinchuk R, Gurieva T, Lyanzber D, Lider A, Demyanuk D, Sednev D, Zhvyrblya V, Filippov G: **Robot-based In-Process Examination of ITER Dome and First-Wall Panels based on Novel Ultrasonic Tomography Approach**. 19th World Conference on Non-Destructive Testing, June 2016.
- [3] Felsner K, Schlachter K, Zambal S: **Robotic Coverage Path Planning for Ultrasonic Inspection**. In *Applied Sciences* 2021; 11(22): 10512.
- [4] Bulavinov A.: **Der getaktete Gruppenstrahler**. Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2005 Dissertation.

- [5] D. Dolmatov, D. A. Sednev, A. N. Bulavinov R. V. Pinchuk: **Applying the Algorithm of Calculation in the Frequency Domain to Ultrasonic Tomography of Layered Inhomogeneous Media Using Matrix Antenna Arrays**. Russian Journal of Nondestructive Testing 55(7):499-506, DOI: 10.1134/S1061830919070040, July 2019.
- [6] Tobin J, Fong R, Ray A, *et al.*: **Domain randomization for transferring deep neural networks from simulation to the real world**. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2017; 23–30.
- [7] Dutré P, Bekaert P, Bala K: **Advanced global illumination**. 2nd edition. CRC Press, 2016.
- [8] Schlachter K, Felsner K and Zambal S. **Training neural networks on domain randomized simulations for ultrasonic inspection** [version 1; peer review: awaiting peer review]. Open Res Europe 2022, 2:43.
- [9] Mattausch O, Makhinya M, Goksel O: **Realistic ultrasound simulation of complex surface models using interactive monte-carlo path tracing**. In *Computer Graphics Forum*. 2018; 37(1): 202–213.