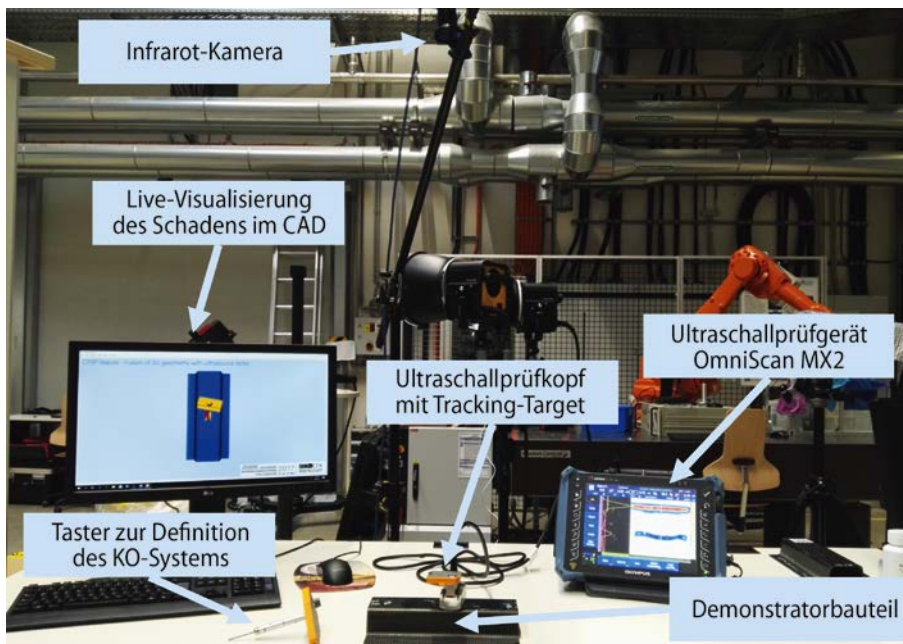


Digitale Reise ins kohlenstofffaserverstärkte Innere

Multisensorbasierte Schadenserfassung im CFK-Reparaturprozess

Schlagschäden in kohlenstofffaserverstärkten Bauteilen sind in der Regel von außen nicht sichtbar. Deswegen haben sich gleich drei Forschungsinstitute der RWTH Aachen der dreidimensionalen Schadenserfassung angenommen. Ziel war eine praxistaugliche Schadenserfassung im Kontext des Reparaturprozesses, dessen Kern ein kombiniertes Multisensorsystem bestehend aus Thermografie und Ultraschall ist.



Zur multisensorbasierten Schadensermittlung an CFK-Bauteilen wurde am WZL ein Ultraschallprüfstand aufgebaut und verfahrensspezifische Vor- und Nachteile evaluiert (© WZL)

reparatur fordern die Auslegung des Prüfprozessablaufs an die Werkstatsumgebung sowie die Fähigkeiten des Kfz-Mechanikers. Bislang erfolgt die Auswertung der Messergebnisse anhand produktspezifischer Software und durch die manuelle Bedienung von geschultem Personal oder Ingenieuren. Eine bedienerunabhängige und automatisierte Schadensdetektion, die die Grundlage der strukturellen Schadensbewertung liefert, ist aktuell nicht verfügbar.

Ziel ist es, durch die Kombination unterschiedlicher Sensorsysteme alle relevanten Fehlstellen zu lokalisieren und zu analysieren. Sensorkonzepte, die eine solche detaillierte Auswertung, und die damit verbundene Aufbereitung der Messdaten ermöglichen, existieren bislang nicht.

Multisensordatenfusion im 3D-Geometriemodell

Zur Fusion unterschiedlicher Sensorsysteme und um Schadensfälle genau zu lokalisieren und zu analysieren, wird im ersten Schritt ein dreidimensionales Geometriemodell des Bauteils benötigt. Da dieses im Schadensfall nicht aus den CAD-Daten entnommen werden kann, muss es zunächst auf Basis des beschädigten Bauteils generiert werden. Kommerziell verfügbare kamerabasierte Systeme können FVK-Oberflächen aufgrund der reflektierenden Oberfläche allerdings vielfach gar nicht oder nur unzureichend erfassen. Darüber hinaus existiert ein konkreter »

Kohlenstofffaserverstärkte (CFK)-Strukturbauteile unterscheiden sich im Schadens- und Versagensfall grundlegend gegenüber konventionell verarbeiteten Materialien. Deshalb müssen bestehende Prozesse zur Schadensdetektion, insbesondere in der KFZ-Reparatur, angepasst werden. Schäden an der CFK-Struktur sind in der Regel nicht von außen sichtbar. Daher sind Sensorkonzepte gefordert, die Rückschlüsse auf den Zustand des Bauteilinneren zulassen. Der Kostendruck in der Fahrzeugreparatur fordert eine zeit- und kosteneffiziente Schadens-

detektion. Eine konturgenaue und ressourceneffiziente Reparatur kann durch eine solche hochaufgelöste Schadenserfassung verwirklicht werden. Gängige Verfahren basierend auf Thermografie, Ultraschall, Wirbelstrom oder Computertomografie genügen nicht allen drei Anforderungen zugleich.

Abhilfe schaffen hier Ansätze der Sensordatenfusion, bei denen unterschiedliche Sensorsysteme kombiniert werden, um spezifische Messaufgaben zu lösen. Die erfolgreiche Implementierung komplexer Sensorkonzepte in der Fahrzeug-

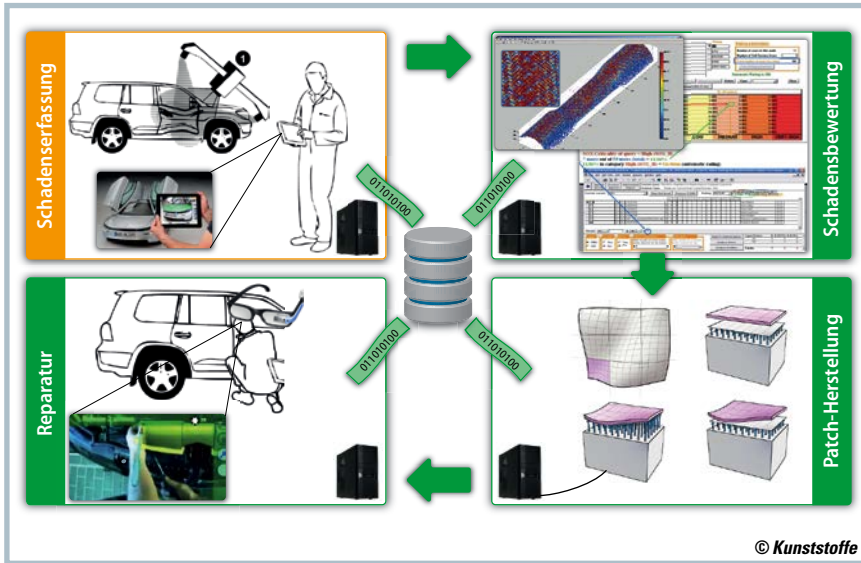


Bild 1. Interaktive Reparaturwerkstatt der Zukunft: Drei AiF-Forschungsprojekte untersuchten die CFK-Reparatur von der Schadenserkennung bis zur praxisnahen Reparatur (Quelle: WZL)

Forschungsbedarf in der Fusion der Daten verschiedener zerstörungsfreier Messverfahren mit den Geometrieinformationen des Bauteilmodells. Zur sensorbasierten Erfassung innenliegender Schäden in CFK-Bauteilen wurden im ersten Schritt verschiedene Sensortechnologien messtechnisch bewertet und hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz im Kfz-Werkstattumfeld qualifiziert. Eine Kombination der Thermografie und der Ultraschallmesstechnik stellte sich als vielversprechende Lösung heraus. Dadurch, dass die Thermografie eine vergleichsweise schnelle und großflächige Messung erlaubt, wohingegen mit der Ultraschallmesstechnik hochauflösend, allerdings punktförmig gemessen wird, ergänzen sich die verfahrensspezifischen Vor- und Nachteile. Im Rahmen eines AiF-Forschungsprojekts (siehe Infokasten 5.30 und Bild 1) wurden beide Sensortechnologien an kalibrierten Bohrungsplatten, unterschiedlich geschädigten Impactplatten und Demonstratorbauteilen untersucht und anhand digitaler Bewertungskriterien bewertet.

Ansatz der kombinierten Sensorik

Die Kombination der Thermografie und Ultraschallsensorik erfolgte in einem zweistufigen Verfahren. Zunächst wurden ein 3D-Geometriemodell des beschädigten Bauteils und Thermografie-Daten in einem globalen Referenzsystem zueinander ausgerichtet und aufeinander abgebildet. So können Schadensregio-

nen (ROI) und Kanten im virtuellen Modell unterschieden werden. Damit kann die ROI auch an realen Bauteilen automatisiert detektiert werden. Zur exakten Bestimmung der Schadensgeometrie wurde ein für die Werkstatt geeignetes Ultraschallmesssystem entwickelt. Es bestimmt anhand einer Fusion von Geometrie- und Ultraschallmessdaten die Lage und geometrische Ausdehnung des Schadens im Bauteil.

Während des Projekts wurden zudem umfangreiche messtechnische Untersuchungen an unterschiedlich geschädigten CFK-Strukturen durchgeführt. Ziel war es, Grundlagenwissen über die Prüfprozesseignung der Einzelsensorik und des entwickelten kombinierten Sensorsystems zu erhalten. Zudem wurde das kombinierte Sensorsystem an Demonstratorbauteilen getestet. Bei diesem Testlauf



Bild 2. Mobiles optisches Messsystem, bestehend aus einem handgeführten Laserscanner (links) und einem Photogrammetrie-System (rechts). Damit erfolgt die Positionierungs- und Orientierungsbestimmung im Raum (© WZL)

zeigte sich, dass die entwickelten Algorithmen zur automatisierten Schadensdetektion im bestehenden Kfz-Werkstattumfeld verwendet werden können.

3D-Geometriemodell erfassen und ausrichten

Um einen für KMU geeigneten Reparaturprozess zu entwickeln, muss dieser unabhängig vom vorhandenen Informationsstand der zu reparierenden Fahrzeugstruktur erfolgen. Es kann daher nicht vorausgesetzt werden, dass die CAD-Datei der Soll-Geometrie vorliegt. Weiterhin kann es durch Beschädigung zu Verformungen des CFK-Strukturbauteils gekommen sein. Daher setzt die Datenfusion der Thermografie- und Ultraschalldaten ein 3D-Geometriemodell des beschädigten Bauteils als Basis voraus. Dieses 3D-Geometriemodell wird durch Digitalisierung der beschädigten Bauteiloberfläche generiert. Hierzu wurde ein mobiles optisches Messsystem, bestehend aus einem handgeführten Laserscanner und einem integrierten Photogrammetrie-System verwendet (Typen: T-Scan CS und T-Track CS, Hersteller: Carl Zeiss AG, Oberkochen) (Bild 2). Durch Einsatz des Laserlichtschnittverfahrens wird die Bauteilgeometrie mit einer Linienbreite von bis zu 125 µm und 1312 Punkten pro Linie erfasst. Das System arbeitet mit einem mittleren Arbeitsabstand von 150 mm und einer Datenrate von 210 000 Punkten/Sekunde und eignet sich auch für opake Bauteiloberflächen. Über acht Trackingstäbe und ein Photogrammetrie-System erfolgt die Positions- und Orientierungsbestimmung im Raum. Das Photogrammetrie-System bestehend aus drei Kameras erkennt den Laserscanner



im Arbeitsabstand zwischen 2 m und 4 m und erfasst ein Messvolumen von $6,3\text{ m}^3$. Aus der erfassten Punktwolke wird mithilfe der Software colin3D (Hersteller: Carl Zeiss AG) ein Polygonnetz gebildet und im Stereolithographie-Format (STL) zur weiteren Datenverarbeitung exportiert.

Zur Ausrichtung der verschiedenen Messdatensätze wird ein Schachbrettmuster als Marker auf das Bauteil aufgetragen. Anhand der Höhendifferenz zwischen weißem Papier und schwarzer Tinte wird das Schachbrettmuster im Basismodell sichtbar. Gleichzeitig ist der Emissionskoeffizient von schwarzer Tinte höher als von weißem Papier, wodurch das Schachbrettmuster auf der Thermografie-Aufnahme registriert wird. Die Ausrichtung der Thermografie- und Laser-scandaten setzt die Bestimmung einer Orientierungsebene und des Normalenvektors voraus. Da die vollautomatisierten Ansätze (Mittelung der Normalenvektoren, Höhenlinienverteilung und Häufigkeitsverteilung) zu unzureichenden Ergebnissen und langen Rechenzeiten führen, wird eine teilautomatisierte Lösung umgesetzt. Der Bediener wählt im Bedienerfenster den Ursprung des Schachbrettmusters, die drei weiteren Eckpunkte des Musters sowie drei Punkte auf der Bauteilhauptebene, wie in **Bild 3** dargestellt, manuell aus. Um Bedienfehler zu reduzieren, wird eine Bedienungsanleitung zur Unterstützung der Punkteauswahl eingebundet.

Thermografie-Daten auf das 3D-Geometriemodell übertragen

Nach der Identifikation des Markers lassen sich die 2D-Thermografiescans auf das 3D-Geometriemodell projizieren. Über Translationen und Rotationen ist das Bauteil beliebig auszurichten, sodass sich skalierte Thermografie-Daten (Phasenbild und IO-Bild) und Daten des Laserlichtschnittsensors (Polygonnetz und Orientierungsebene) zusammenführen lassen. Die Datensätze werden zunächst zueinander ausgerichtet, die Defektinformation auf das Basismodell projiziert und die ROI und Fehlerposition berechnet. Die Registrierung der Datensätze erfolgt im gemeinsamen auf Basis des 3D-Geometriemodells definierten Globalkoordinatensystem. Um die Datensätze zu überlagern, wird die Netzstruktur des

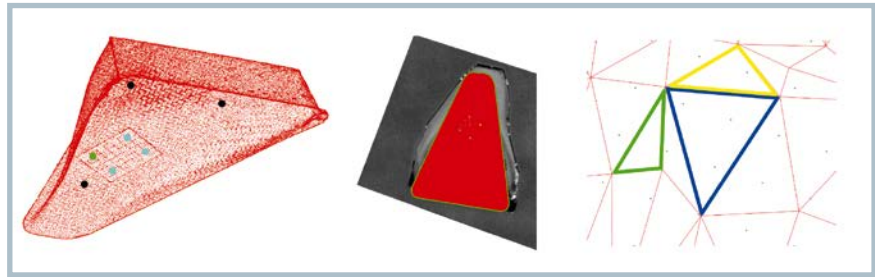


Bild 3. Manuelle Bestimmung der Orientierungsebene im Basismodell (links, grün: Koordinatenursprung; blau: Eckpunkte Schachbrettmuster; schwarz: Punkte auf Bauteilhauptebene). Abgrenzung der Bauteilkanten (Mitte) und Zuordnung der Thermografie- und Geometriedaten (rechts) (© WZL)

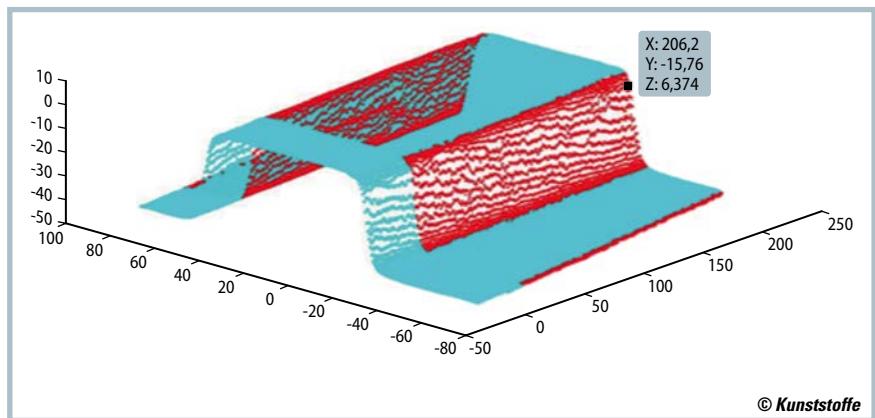


Bild 4. Kantendetektion: Ist keine Standardabweichung im Höhenprofil zu verzeichnen, handelt es sich um einen Schaden (Quelle: WZL)

Basismodells in die xy-Ebene gelegt, indem der z-Koordinate der Wert Null zugeordnet wird.

Das Bauteil wird durch eine konvexe Hülle vom Hintergrund abgegrenzt. Die Zuordnung der Thermografie- und Geometriedaten für die visuelle Darstellung erfolgt über die Grauwerte des Phasenbilds und des Polygonnetzes. Für jedes Polygon werden die gemittelten Grauwerte berechnet und zugeordnet. Die Zusammenführung von Geometrie- und Thermografie-Daten differenziert Kanten und Schäden. Inhomogenitäten, die in der Auswertung der Thermografie-Aufnahme detektiert worden sind, werden in einem anschließenden Schritt hinsichtlich des Höhenprofils untersucht. Die z-Koordinate wird den Thermografie-Daten zugeordnet. Liegen eine Unregelmäßigkeit und ein hoher Gradient im Höhenprofil vor, die anhand der Standardabweichung in der Bildebene quantifiziert werden, handelt es sich um eine Kante. So sind wie in **Bild 4** dargestellt, Kanten detektierbar. Ist keine Standardabweichung im Höhenprofil zu verzeichnen, handelt es sich folglich um einen Schaden.

Die verbleibenden Schäden werden durch die Zuordnung jedes Polygondreiecks mit mindestens einem schadhaften Farbwert als fehlerhaft zur sicheren Seite abgeschätzt. Die Eckpunkte der ROI kommen zur Berechnung des Fehlerschwerpunkts in x-, y- und z-Richtung zum Einsatz. Für die weiteren Schritte des Reparaturprozesses werden ein maximales Fehlerrechteck (Abtastung Ultraschallsensorik) und ein Hüllkreis (Schäftprozess) berechnet und angegeben. Die Darstellung und Auswertung der ROI erfolgt folglich unter Berücksichtigung der z-Koordinate im dreidimensionalen Raum. Das Ergebnis der Sensordatenfusion von Thermografie- und Geometriedaten ist in **Bild 5** dargestellt.

Werkstattgeeignete Ultraschallmessung im 3D-Geometriemodell

Nach der Thermografie-Messung werden die Informationen über das maximale Fehlerrechteck an die Ultraschallsensorik übermittelt und visualisiert, sodass der Werker den Prüfkopf innerhalb der ROI positionieren und verfahren kann. Bei »

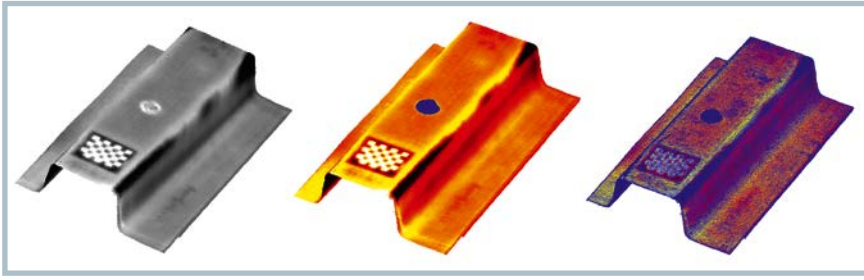


Bild 5. Ergebnis der Sensordatenfusion von Thermografie- und Geometriedaten (© WZL)

Die Autoren

Prof.-Dr.-Ing. Robert H. Schmitt ist Direktor des Lehrstuhls für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement am Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen.

Sarah Ekanayake, M. Sc., und **Dipl.-Ing. Philipp Nienheysen** sind ebenfalls am WZL tätig.

Forschungsprojekte im Detail

Die skizzierten Forschungsvorhaben wurden über die Vereinigung zur Förderung des Instituts für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen e.V. der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert. Allen Institutionen gilt der Dank der Autoren. Die Ergebnisse stammen aus dem im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) geförderten Projekts „Multisensorbasierte Schadenserkenntnis und Qualitätssicherung im CFK-Reparaturprozess“ (IGF-Vorhaben Nr. 18757N). Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurde im Forschungsprojekt „Methodenentwicklung zur strukturellen Schadensabbildung und -bewertung faserverstärkter Kunststoffe und zur Auslegung von Reparaturkonzepten“ (IGF-Vorhaben Nr. 18758N) die strukturelle Bewertung und im Forschungsprojekt „Interaktive Reparaturwerkstatt der Zukunft für Elektromobile in CFK-Bauweise“ (IGF-Vorhaben Nr. 26LN) die konturgenaue Reparatur durchgeführt, die anschließend an einem Demonstratorbauteil verifiziert werden soll.

Service

Digitalversion

» Ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/5027764

der Ultraschallmessung wird ein Liniensensor mäandierend über die ROI geführt. Traditionell gestaltet sich jedoch vor allem die Zuordnung aufgezeichneter Schäden zu definierten Positionen am Bauteil problematisch. Diese ist jedoch essenziell für eine strukturelle Bewertung eines Schadens. Zur Lösung dieser Problematik wurde im Rahmen des Projekts ein Demonstrator entwickelt, der den Ultraschallsensor während des Messprozesses optisch verfolgt. Dieser erfasst Informationen über die Position und die Orientierung des Ultraschallsensors während des Messvorgangs. Außerdem fusioniert er die Geometrie- mit den Ultraschallmessdaten und wertet den kombinierten Datensatz aus. Der Demonstrator besteht aus dem mobilen und werkstattdauglichen Phased-Array-Ultraschallmesssystem Olympus OmniScan MX2, einem IR-Tracking-System (Hersteller: Nexonar, Rüsselsheim) sowie einem Messrechner mit der im Rahmen des Projekts entwickelten Software (**Titelbild**). Das IR-Tracking-System besteht aus einer Infrarot-Kamera und einem mit LEDs bestückten und befestigten Objekt. Dieses Objekt dient der Erfassung des Ultraschalllinien-Sensors durch das Tracking-System und wird daher als Target bezeichnet.

Die Funktionen der Software und die Prozessschritte, die das Programm während eines Messvorgangs ausführt, werden im Folgenden kurz skizziert:

- **Visualisierung der Geometriemodelle:** Das mittels 3D-Scanner erstellte Geometriemodell des beschädigten Bauteils mit der ermittelten ROI sowie das CAD-Modell des Ultraschallsensors werden virtuell in der Ultraschallmesssoftware dargestellt.
- **Berechnung der Position und Orientierung des Targets:** Die Position der LED-Leuchten auf dem Target relativ zueinander und relativ zum Koordina-

tenursprung am Bauteil werden durch die Infrarot-Kamera erfasst. Aus den Informationen berechnen sich Position und Orientierung des Targets. Das Koordinatensystem des Bauteils wird durch Antasten markanter Bauteilpunkte mit einem ebenfalls mit LED-Leuchten bestückten Tasters anhand des Ebene-Linie-Punkt-Prinzips berechnet und definiert.

- **Berechnung der Positionen der Übertragungselemente des Ultraschallprüfkopfs:** Aufgrund der bekannten Geometrien des Targets und des Ultraschallliniensensors werden zur Lokalisierung der Ultraschallmessdaten die Positionen der Schallübertragungselemente relativ zur Bauteiloberfläche berechnet.
- **Bestimmung der nächstliegenden Knotenpunkte auf dem Geometriemodell:** In Abhängigkeit der Position der Übertragungselemente werden die nächstliegenden Knotenpunkte auf dem Geometriemodell bestimmt.
- **Transfer der Ultraschallmessdaten:** Die am Ultraschallprüfgerät erfassten Daten werden vom Messgerät zur Software auf dem Messrechner übertragen.
- **Schadensanalyse der Ultraschallmessdaten:** Auf Basis der Ultraschallmessdaten werden Schäden in der Bauteilstruktur detektiert. Die Position, die Tiefenlage und die Ausdehnung der Schadensgeometrie werden erfasst.
- **Visualisierung der Schadensinformationen im Geometriemodell:** Die identifizierten Knotenpunkte werden anhand der erfassten Schadensinformationen hinsichtlich der Tiefenlage des Schadens farblich codiert.

Fazit

Der Versuchsaufbau demonstriert ein für den Werker in einer Reparaturwerkstatt taugliches Multisensorsystem. Durch die Fusion von Thermografie- und Geometriedaten sowie das kamerabasierte Tracking des Ultraschallsensors und die automatische Verarbeitung der Ultraschallmessdaten können die Schadensinformationen direkt erfasst und in der Bauteilgeometrie lokalisiert werden. Das schafft die Grundlage zur automatisierten Schadensbewertung und zur Bereitstellung von Handlungsanweisungen zur Reparatur. ■