

Verfahren der INLINE-Qualitätssicherung und der zerstörungsfreien Prüfung innerhalb der Fertigungslinie von Faser-Metall-Laminaten

H. Apmann¹, M. Mayer², K. Fortkamp³, A. Hascheburger⁴, C. Kromholz⁴, S. Meister⁴, H. Ucan⁴, P. Zapp⁴

¹Premium AEROTEC GmbH, Riesweg 151-155, D-26316 Varel, Germany

²DLR, Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie, Am Technologiezentrum 4, D-86159 Augsburg

³Premium AEROTEC GmbH, Technologiezentrum Nordenham, D-26954 Nordenham

⁴DLR, Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Ottenbecker Damm 12, D-21684 Stade

EINLEITUNG

Der Einsatz von glasfaserverstärktem Aluminium ermöglicht aufgrund der geringen Dichte und der Konstruktionsmöglichkeiten eines Laminates eine signifikante Gewichtsreduzierung gegenüber einem herkömmlichen Rumpfhautfeld aus monolithischen Aluminiumwerkstoffen. Neben der Entwicklung einer Bauweise für sehr dünne Faser-Metall-Lamine, welche gleichzeitig eine deutlich größere Leistungsfähigkeit im Hinblick auf Ermüdung, Schadenstoleranz und Impact-Verhalten gegenüber herkömmlichen Bauteilen aus Aluminium aufweisen, steht eine neue Prozesskette für die automatisierte Rumpfschalenherstellung im Mittelpunkt der Arbeiten.

Der Fertigungsprozess für Faser-Metall-Lamine besteht aus vielen Einzelschritten, die letztlich zum Endbauteil führen. Anstatt die Qualität des Bauteils nach jedem der Einzelschritte zu untersuchen, sollen auftretende Abweichungen dann entdeckt werden, wenn sie auftreten. Auf diese Weise können rechtzeitig Korrekturmaßnahmen bereitgestellt und in den laufenden Prozess eingegriffen werden. Somit können Prozessabweichungen vermieden und aufwändige Reparaturen und Ausschuss verringert werden. Während für die Einzelschritte im Fertigungsprozess von Faser-Metall-Laminaten eine Inline-Qualitätssicherung entwickelt und integriert wird, wird das Endbauteil zerstörungsfrei geprüft. Neben neuen Konzepten steht hierbei die automatisierte Auswertung der erhobenen Messdaten im Fokus, das die bisherigen Aufwände wesentlich reduzieren soll.

Im Rahmen dieser Veröffentlichung werden die oben genannten Themen der Inline-Qualitätssicherung und der zerstörungsfreien Prüfung mit automatisierter Auswertung detailliert dargestellt.

Inline-QS bei der Aluminiumablage

Die positionsgenaue Ablage der Aluminiumfolien soll während des Prozesses überprüft werden. Dabei sind materialspezifische Herausforderungen zu berücksichtigen: eine relativ geringe Dicke von 0,3 bzw. 0,4 mm, eine reflektierende Oberfläche sowohl von Aluminiumfolie als auch der Werkzeugform, sowie mögliche Welligkeiten im sphärischen Bereich der Zielkontur. Ein hochgenauer Laserlichtschnittsensor (LLS) kann die resultierenden Anforderungen an Auflösung, Materialeinstellungen und 3D Messdaten erfüllen.

Zur Prüfung der Zuschnittsposition wird nach jedem abgelegten Zuschnitt die Außenkontur mittels LLS erfasst. Durch einen Lasertracker werden die sechs DoF (Degrees of Freedom) des Messgeräts aufgezeichnet, wie in Abbildung 1 links abgebildet, und eliminieren somit die Ungenauigkeiten, die während einer robotergestützten Messfahrt entstehen. Die Messaufzeichnung beinhaltet die Punktwolke entlang der Sollkontur des Zuschnittes und somit dreidimensionale Oberflächeninformationen. Diese 3D-Informationen haben gegenüber 2D-Verfahren den Vorteil, dass sie Aufschluss über Aufwölbungen, Welligkeiten oder aufstehende Ecken von Zuschnitten realitätsgetreu wiedergeben können.

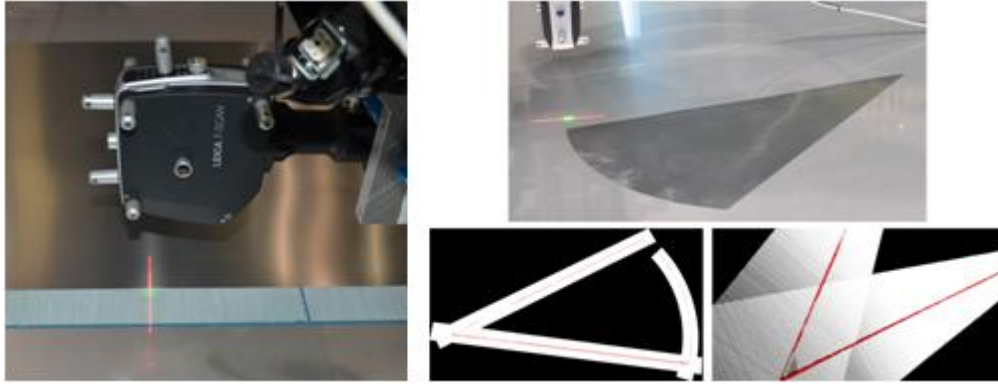


Abbildung 1: Automatisierte Messfahrt mittels TScan über eine Aluminiumkante im FML-Lagenaufbau

Die Istpositionen der Zuschnittskante können mittels unterschiedlicher Herangehensweisen automatisiert bestimmt werden. Diese werden aktuell getestet. Unterschiedliche mathematische Ansätze werden anhand der Qualität der Ergebnisse und Laufzeit der Algorithmen bewertet. Eine Implementierung betrachtet bspw. die Analyse der Oberflächenvariation, die sich auf die Erkenntnisse zur Detektion von Eck- und Kantenpunkten aus [1] und [2] stützt. Abbildung 1 rechts zeigt die damit detektierten Kantenpunkte eines Aluminiumzuschnittes mittels freier Programmbibliothek PCL (Point Cloud Library) [3].

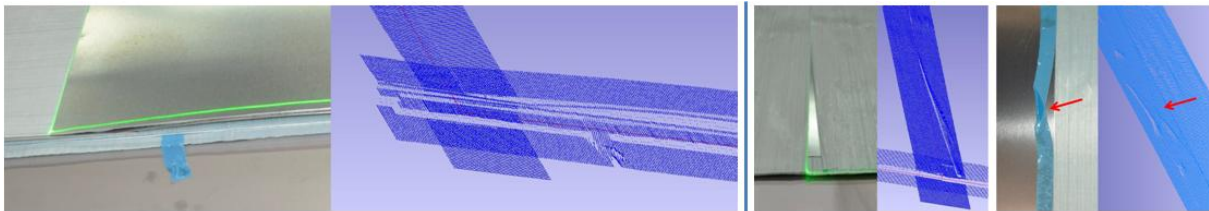


Abbildung 2: FML-Lagenaufbau mit künstlichen Fehlstellen in der Realität und als Punktwolke (in Blau) auch für Prepreg und Klebfilm-Applikation

Durch ihre Eigensteifigkeit liegen die Aluminiumbleche nicht immer formschlüssig auf. Mit zunehmender Lagenanzahl und evtl. Ablagefehlern ergibt sich eine Vielzahl an Kanten (siehe Abbildung 2, linke Seite). Ziel ist es, die Kanten auch in komplexen Situationen sicher zu detektieren und für den Soll-Ist-Vergleich die richtige Istkontur automatisch auszuwählen. Neben bewusst eingebauten Schikanen in den Aluminiumblechen wurden auch Fehlstellen im Prepreg und Klebfilm eingebracht, um die prinzipielle Machbarkeit nachzuweisen (siehe Abbildung 2, rechte Seite).

Inline-QS für den automatisierten Faserlegeprozess

Die technologischen und ökonomischen Anforderungen an Strukturbauteile in der Luftfahrtindustrie sind sehr unterschiedlich und stark anwendungsfallspezifisch. Faser-Metall-Laminare (FML) legen die Grundlage für sehr leichte und steife Bauteile mit guter Schlagzähigkeit. Um den wachsenden Bedarf der Luftfahrtindustrie an Strukturbauteilen aus FML zu bewältigen, werden automatisierte Produktionsprozesse benötigt. Zur Sicherung einer ausreichenden Bauteilgüte sind darüber hinaus entsprechende Qualitätssicherungsmaßnahmen notwendig. Nach dem Stand der Technik wird die Qualitätssicherung eines Bauteils mittels einer visuellen Inspektion durch einen Werker realisiert und nimmt zwischen 32 % [4] und 68 % [5] der Gesamtproduktionszeit in Anspruch. Zur Steigerung der Produktivität sind daher optische Messsysteme zur Inline-Qualitätssicherung erforderlich und Teil der

aktuellen Entwicklung. Speziell Laserlichtschnittsensoren, Thermografiekameras und optischen Industriekameras als berührungslose Messverfahren werden als zielführend betrachtet [6-8].

Im Rahmen dieser Arbeiten entwickelt das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) am Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP) in Stade ein flexibles und erweiterbares QS-System. Dieses System ist in der Lage, verschiedene Fasermaterialien innerhalb unterschiedlicher Fertigungsprozesse, wie z.B. Automated Fiber Placement (AFP) und Automated Tape Laying (ATL), zu betrachten und die typischen Material- und Prozessfehler, wie z.B. Gaps/Overlaps, Falten, Fremdkörper u. ä. zu erfassen [9-11] (siehe Abbildung 3, links). Durch den Ansatz der bildbasierten Messdatenerfassung bzw. -vorverarbeitung besteht die Möglichkeit, eine Kombination aus verschiedenen Sensoren in das System einzubinden.

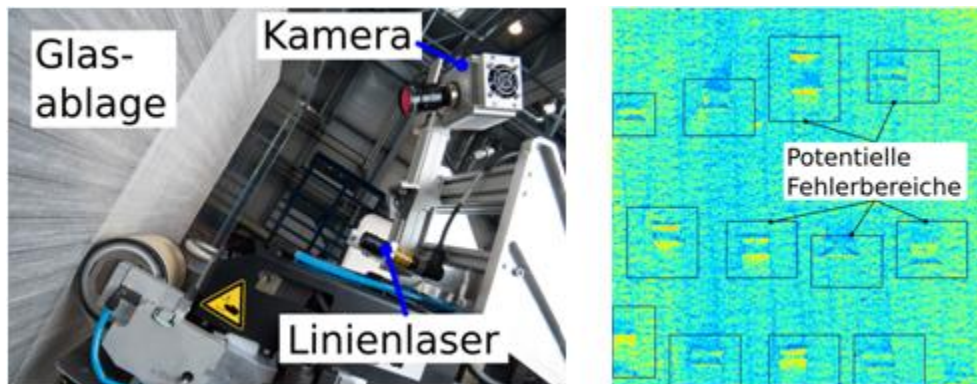


Abbildung 3: Integriertes QS-System für den automatisierten Faserlegeprozess mit detektierten und potentiellen Fehlerbereichen

Für die automatisierte CFK-Bauteilfertigung wird aktuell ein Laserlichtschnittsensor zur Erfassung des Höhenprofils, der Rückstrahlintensität sowie des Transparenzgrades eingesetzt. Mittels der gewonnenen Informationen können flächig die geometrischen und optischen Eigenschaften des Messbereichs ermittelt und bewertet werden. Zur Minimierung der Rechenzeit und unter Berücksichtigung der zumeist fehlerfreien Fasermaterialablage wird ein kaskadischer Ansatz zur Bewertung einer Ablegeoberfläche gewählt [12]. In der ersten Kaskade werden Bereiche mit stark inhomogener Datenbasis ermittelt und hieraus potentielle Fehlerbereiche abgeleitet (siehe Abbildung 3, rechts). In der zweiten Kaskade werden diese potentiellen Fehlerbereiche detailliert untersucht. Die übrigen Bildbereiche des Eingangsmessbildes werden von der weiteren Berechnung ausgeschlossen. Im hier beschriebenen Fall werden sogenannte Histogram-of-Oriented-Gradients (HOG) Merkmale zur Fehlerbeschreibung und eine Support-Vektor-Maschine (SVM) als Lernansatz zur Kategorisierung der Fehlertypen verwendet. Abschließend werden die Position und die Geometrie der detektierten und kategorisierten Fehler ermittelt.

Im betrachteten Validierungsversuch mit CFK-Prepreg sind fünf typische Prozessfehler (Falte, Twist, Gap, Overlap, Fremdkörper) betrachtet worden. Die Rate falsch-positiver Fehlerdetektionen liegt hierbei zwischen 27,8 % und 45,0 %. Die Systemparameter sind so gewählt worden, dass vorliegende Prozessfehler immer detektiert worden sind. Die Fehlerklassifizierungsrate liegt hierbei für die meisten Fehlertypen zwischen 46,7 % und 76,7 %. Gaps sind mit einer korrekten Klassifikationsrate von 24,6 % deutlich schlechter kategorisiert worden. Die verwendeten Parameter dieses Validierungsversuchs sind vorab ermittelt worden.

Zusammenfassend ist ein flexibel anwendbares und adaptives Inline QS-System entwickelt worden, welches auch für die FML-Produktion angepasst und anschließend vollständig in den automatisierten Faserlegeprozess integriert wird. Erste Versuchsergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt.

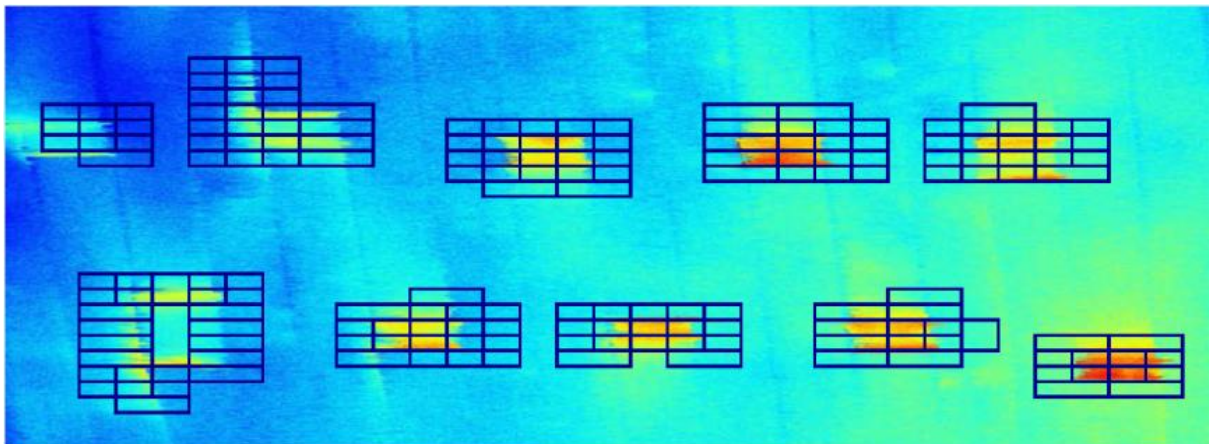


Abbildung 4: Inline-Qualitätssicherung bei der automatisierten Glasprepregablage

Inline-QS bei der Leckageerkennung von Vakuumaufbauten

Nach der fertiggestellten Ablage des FML-Bauteils muss dieses für den Autoklavzyklus vorbereitet werden. Hierzu wird ein Vakuumaufbau auf dem Bauteil und Werkzeug erstellt. Je nach Komplexität der Bauteilgeometrie und Integration von Versteifungselementen unterscheiden sich die Aufbauten in Materialien und Hilfsstoffen. Nach Fertigstellung des Vakuumaufbaus muss dieser auf seine Dichtigkeit überprüft werden. Die traditionelle Methode zur Dichtigkeitsprüfung ist die Druckanstiegmethode, bei der mit Hilfe eines Absolutdruckmessgerätes der Druckanstieg innerhalb des Vakuumaufbaus über einen festgelegten Zeitraum gemessen wird. Liegt dieser innerhalb einer festgelegten Toleranz kann das Bauteil dem Autoklav übergeben werden, ist dies nicht der Fall muss der Vakuumaufbau nachgebessert werden. Um in diesem Fall die genaue Position der Leckage zu ermitteln wird ein Ultraschallmikrofon eingesetzt mit dem der Vakuumaufbau manuell abgesucht wird. Dieser Prozess ist sehr zeitaufwendig, ungenau und kostenintensiv, weshalb am DLR in Stade an automatisierten Prozessen zur Leckageerkennung und -ortung geforscht wird.

Ein Verfahren, das am DLR patentiert wurde, ist die Leckageerkennung mittels Thermografie. Bei diesem Verfahren wird der Vakuumaufbau mit Hilfe einer Thermografiekamera abgescannert, um mögliche Leckagen zu detektieren. Diese zeigen sich in dem Thermogramm als Cold-Spot, da sich die einströmende Luft auf ein geringeres Druckniveau entspannt und dabei abkühlt (Joules-Thomson-Effekt). Das bildgebende Verfahren ermöglicht die Realisierung eines hohen Automatisierungsgrads, da die Kamera, wie in der Abbildung 5 dargestellt, z.B. an einen Roboter oder Portal angebracht werden kann. Der Prozess ist schnell und zeigt im Gegensatz zu den anderen Verfahren die exakte Position der Leckage an. Um die Technologie erfolgreich einzusetzen, ist eine luftführende Schicht, wie z.B. Entlüftungsvlies oder -Gewebe, innerhalb des Vakuumaufbaus von Nöten. Bei FML-Bauteilen wird diese häufig weggelassen, um Materialkosten einzusparen. Allerdings verhindert dies zum einen eine gleichmäßige Verteilung des Vakuums und zum anderen eine valide Leckageerkennung. Es ist also ratsam bei der Gestaltung des Vakuumaufbaus für eine ausreichende Luftführung zu sorgen.

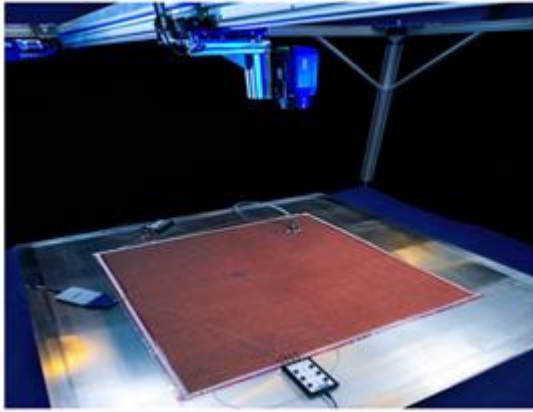


Abbildung 5: Versuchsaufbau zur Leckageerkennung

Weitere Technologien, die am DLR betrachtet werden, sind Durchflussmessung und in den Vakuumaufbau integrierte Piezosensorik. Diese Technologien werden untersucht, um leckagebehaftete Bereiche noch schneller zu identifizieren, die im zweiten Schritt von der Thermokamera gezielt untersucht werden können, ohne das komplette Bauteil abzuscannen. Während eine Übertragung der Durchflussmessung auf FML-Bauteile keine Probleme darstellt, solange eine Luftführung sichergestellt ist, hat sich bei ersten Versuchen mit der Piezosensorik gezeigt, dass FML-Bauteile hier eine Besonderheit aufweisen. Festzustellen waren Störungen der aufgenommenen Messschriebe durch Bewegungen des Bauteils. So konnten bei Druckänderungen während des Be- und Entlüften des Vakuumaufbaus leise knackende Geräusche registriert werden, die vermutlich von kleinsten intervallartigen Bauteilbewegungen, ausgelöst durch die nicht exakte Übereinstimmung aus Werkzeug- und Aluminiumblechkrümmung, herrühren. Die durch diese Bewegungen ausgelösten kleinsten Erschütterungen des massiven Werkzeuges wurden durch die empfindlichen Piezosensoren aufgezeichnet, weshalb die Messungen unerwünschte Signalanteile aufwiesen. Sobald sich ein konstanter Druck einstellt, bleiben diese Bewegungen erwartungsgemäß aus. Weitere Versuche müssen zeigen, ob hierdurch ein negativer Einfluss auf die Messungen und die Leckageerkennung zu erwarten ist.

Inline-QS beim Aushärtungsprozess im Autoklaven

Zur Optimierung des Aushärteprozesses in einem Autoklav werden verschiedene Sensorsysteme eingesetzt. Neben der Oberflächentemperatur des Bauteils soll auch der Aushärtegrad der Matrix gemessen werden. Für eine globale Temperaturerfassung wird die Thermografiekamera des Forschungsautoklaven BALU eingesetzt. Die Detektion des Aushärtegrades soll mittels Ultraschall- und dielektrischen Sensoren realisiert werden. Die zwei Sensorsysteme haben für sich sowohl Vor- als auch Nachteile. Aufgrund dessen ist es nach dem aktuellen Stand der Technik geplant, beide Systeme korrelierend miteinander einzusetzen. Die auf dem elektrischen Widerstand basierende Aushärtesensorik ist ein bereits zuverlässig arbeitendes System, benötigt jedoch den direkten Kontakt zu der Matrix des Bauteils und kann somit nur im Rand- und Besäumungsbereich des Bauteils eingesetzt werden, da die Sensoren im Bauteil verbleiben (siehe Abbildung 6, links). Die Analyse mittels Ultraschall arbeitet hingegen kontaktfrei, ist durch zahlreiche physikalische Randbedingungen jedoch ein sehr komplexes System und bedarf einer Weiterentwicklung. Aktuell werden beide Methoden auf Coupon-Ebene miteinander verglichen (siehe Abbildung 6, links).

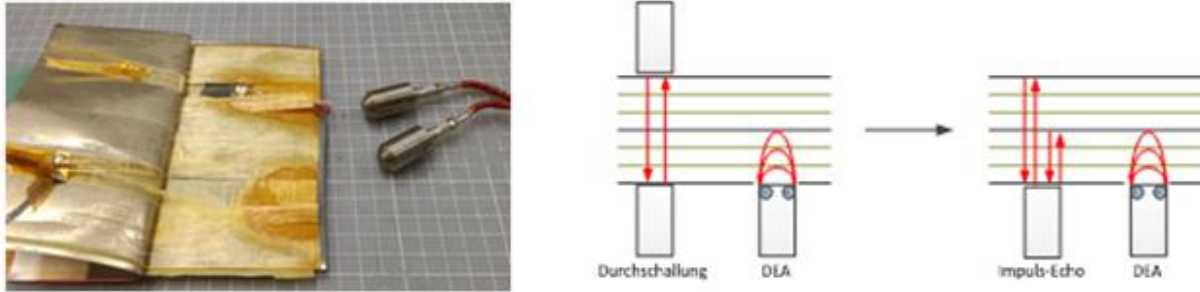


Abbildung 6: DEA Sensoren in einem zerstörten GLARE Bauteil mit US-Sensoren (links); US (Durchschallung / Impuls Echo rechts) in Kombination mit DEA

Dabei wird erörtert, inwiefern die Messdaten beider Verfahren miteinander korrelieren und unterstützend genutzt werden können, da aktuell nur eine individuelle Anwendung der jeweiligen Sensortechnik möglich ist. Die Ultraschall-Technologie wird derzeit im Durchschallungsverfahren eingesetzt, ein Verfahren in dem sich zwei Sensoren koaxial gegenüberstehen und als Sender und Empfänger fungieren. Da dieses Verfahren nicht in einem Open-Mould-Bauteil verwendet werden kann, wird derzeit die Entwicklung des Impuls-Echo-Verfahrens vorangetrieben. Hierbei wird lediglich nur ein toolseitig integrierter Sensor benötigt, der sowohl als Sender als auch Empfänger fungiert, wie in Abbildung 6 rechts, zu sehen ist.

Es wurden bereits erste Versuchsreihen durchgeführt, welche ein realistisches Potential der Machbarkeit aufweisen. Jedoch müssen für den Anwendungsfall FML mehrere Sensoren miteinander verglichen und eine spezielle Soft- und Hardware für die Messdatenauswertung entwickelt werden. Aufgrund des Materialverbundes kommt es zu mehreren Impedanzsprüngen, welche die Signalqualität erheblich beeinflussen. Diese gilt es durch eine angepasste Messmethodik herauszufiltern. Das Vorhaben der Inline-QS kombiniert dabei unterschiedliche Sensortechnologien, welche in Echtzeit Informationen über den Zustand des Bauteils liefern werden.

NDT - Automatisierte Auswertung bei der Bauteilüberprüfung

Mittels Wasserultraschallprüfanlage werden komplexe Luftfahrtbauteile wie Panels und Schalen gescannt. Um die Sicherheit und die lückenlose Rückverfolgbarkeit der Bauteilqualität zu gewährleisten, wird jedes einzelne Bauteil zerstörungsfrei in solch einer Anlage geprüft, bevor es schlussendlich im Flugzeug verbaut wird. Die Dauer der Messfahrt ist dabei deutlich geringer als die anschließende manuelle Auswertung der C-Scans. Steigert man nun die Produktionsrate ergibt sich ein Engpass, der auch mit der Investition in Neuanlagen bestehen bleibt. Aus diesem Grund soll eine Software entwickelt werden, die den Prüfer bei seiner Aufgabe unterstützt und eine effizientere Bewertung der Messdaten ermöglicht. Durch maschinelles Lernen soll eine künstliche Intelligenz bzw. ein Algorithmus auf Basis der Daten trainiert werden, um anschließend den Auswertefachmann zu unterstützen. Die Grundlage für das Training liefern die Prüfdaten der einzelnen Bauteile zusammen mit den entsprechenden Bewertungen, die von den Prüfern bei der manuellen Auswertung angelegt wurden. Während einer früheren Pilotstudie [13] konnte das DLR zusammen mit einem Kooperationspartner vielversprechende Ergebnisse präsentieren.

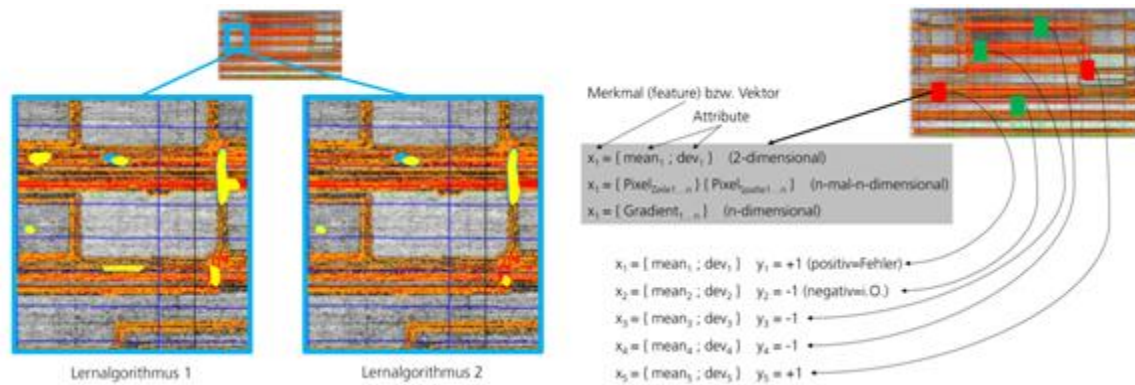


Abbildung 7: C-Scan eines Bauteils mit sinnbildlicher Markierung der Fehlstellen durch unterschiedliche Lernalgorithmen

Abbildung 7, links, veranschaulicht die Ausgabe eines maschinellen Lernalgorithmus. Die gelben Markierungen symbolisieren die gefundenen Fehler im Bauteil und können je nach Auswahl der Lernmethode oder der Merkmalsrepräsentation variieren. Für ein zuverlässiges Ergebnis ist eine hohe Anzahl von bereits ausgewerteten Datensätzen erforderlich.

Abbildung 7, rechts, zeigt die prinzipielle Vorgehensweise, um eine Merkmalsrepräsentation zu erzeugen. Die fehlerbehafteten sowie einige fehlerfreie Bereiche im Bauteil werden durch Attribute beschrieben und bilden somit n-Vektoren, die als Merkmalsrepräsentation bezeichnet werden. Erfolgsversprechende Lernverfahren sind unter dem Überbegriff des überwachten Lernens zu finden. [14] und [15] beschreiben die Lernansätze SVM (Support-Vector-Machine) und Random Forest, die sich auch in der Pilotstudie bewährt haben.

Wie die Ergebnisse der verschiedenen Lernalgorithmen und Merkmalsrepräsentationen bewertet und angepasst werden können, wird in [16] zusammengefasst. Dafür stehen u.a. die Confusionmatrix und die ROC (Receiver Operating Characteristic) zur Verfügung. Durch eine Veränderung der Parameter kann sich bspw. die Anzahl an Fehlern, die übersehen werden, minimieren. Gleichzeitig bedeutet dies aber meist eine Zunahme an vermeintlichen Fehlern.

Neben dem optimalen Algorithmus rücken vor allem Sicherheitsanforderungen immer mehr in den Fokus [17]. Besonders für den Luftfahrtbereich und die Zertifizierung des Verfahrens sind Herausforderungen, wie bspw. die relativ geringe Anzahl an Bauteilen und Fehlern oder das Auffinden von neuen Fehlerarten, wie in [18] beschrieben, zu betrachten.

Literatur-Nachweise:

- [1] M. Pauly, R. Keiser, M. Gross: "Multi-scale Feature Extraction on Point-Sampled Surfaces; Computer Graphics Forum 22/3; 2003
- [2] D. Bazazian, J. R. Casas, J. Ruiz-Hidalgo: "Fast and Robust Edge Extraction in Unorganized Point Clouds"; International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications, 2015
- [3] R. B. Rusu, S. Cousins: "3D is here: Point Cloud Library (PCL)"; IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011

- [4] T. Rudberg, J. Neilson, M. Henscheid, J. Cemenska, "Improving AFP cell performance", SAE international journal of aerospace manufacturing and automated fastening conference; 2014.
- [5] A. Halbritter, R. Harper, "Big parts demand big changes to the fiber placement status quo". Mesa, AZ: SME Composites Manufacturing; 2012.
- [6] Airbus InFactory Solutions is delivering for the future with products and services for connected manufacturing, August, 2016 <http://prod-company-public.airbus.com/airbusgroup/responsibility/latest-news/infactory-solutions-intelligent-industry-connected-production.html>
- [7] R. Schmitt, B. Dietrich, C. Mersmann, „Lichtschnittsensor zur Qualitätssicherung beim automatischen Tapelegen," ed, 2010.
- [8] B. Denkena, C. Schmidt, K. Völtzer, and T. Hocke, "Thermographic online monitoring system for Automated Fiber Placement processes," Composites Part B: Engineering, vol. 97, pp. 239--243, 2016.
- [9] C. Krombholz, „Verfahren und Vorrichtung zum Erkennen von Fehlstellen von abgelegten Faserhalbzeugen“, DE102013112260, 2013.
- [10] C. Krombholz, M. Bock, „Verfahren und Vorrichtung zum Erkennen von Fehlstellen von abgelegten Faserhalbzeugen“, DE102013104546, 2013.
- [11] C. Krombholz, J. R. Boelke, „Verfahren und Vorrichtung zum Erkennen von Fehlstellen von abgelegten Faserhalbzeugen“, DE102013104545, 2013.
- [12] S. Meister, C. Krombholz, „Verfahren und Vorrichtung zum Erkennen von Fehlstellen“, DE102017116036, 2017
- [13] T. Schmidt, M. Mayer, R. Lienhart, „Pilotstudie Automatisierte Auswertung von NDT Daten“; <http://elib.dlr.de/101533/>; 2015
- [14] A. Bernieri, L. Ferrigno, M. Laracca, M. Molinara, "Crack Shape Reconstruction in Eddy Current Testing Using Machine Learning Systems for Regression"; IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008
- [15] A. Sumesh, K. Rameshkumar, K. Mohandas, R. Shyam Babu, "Use of Machine Learning Algorithms for Weld Quality Monitoring using Acoustic Signature"; Procedia Computer Science, vol. 50; 2015
- [16] T. Fawcett, "An Introduction to ROC Analysis"; Pattern Recogn. Lett.; 2006
- [17] A. Nguyen, J. Yosinski, J. Clune, "Deep neural networks are easily fooled: High confidence predictions for unrecognizable images"; IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2015
- [18] P. Bodesheim, A. Freytag, E. Rodner, J. Denzler, "Local Novelty Detection in Multi-class Recognition Problems"; IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, 2015