

Zerstörungsfreie Charakterisierung (faserverstärkter) Kunststoffteile mittels FMCW-Radar

Peter-Christian ZINN¹, Timo JAESCHKE², Jan BAROWSKI⁴, Simon KÜPPERS²,
Burkhard WALDER³

¹ Industrial Analytics Lab GmbH, Bochum

² 2pi-Labs GmbH, Bochum

³ BW Engineering GmbH, Hagen

⁴ Lehrstuhl für Hochfrequenzsysteme, Ruhr-Universität Bochum

Kontakt E-Mail: zinn@ial.ruhr & timo.jaeschke@2pi-labs.com

Kurzfassung. Faserverstärkte Kunststoffe werden für viele, häufig auch sicherheitsrelevante Bauteile insb. im Automotive-Sektor eingesetzt. Die Prüfung dieser Bauteile ist daher eine Routine-Aufgabe in zahlreichen fertigungsnahen Prüflabors, deren Automatisierung aufgrund des großen Aufkommens ebenso großes Einsparpotenzial birgt.

Um dies zu leisten, musste zunächst ein Verfahren entwickelt werden, das routinemäßige Prüfaufgaben, die bisher zerstörend stattfinden, in zerstörungsfreier Weise ersetzt und gleichzeitig die Möglichkeit zur automatisierten Auswertung bietet. Ein solches Verfahren wurde in der Verwendung eines breitbandigen Radars gefunden, welches durch die direkte Messung der elektromagnetischen Permittivität ϵ_r des zu prüfenden Kunststoffes sowohl in der Lage ist, den Faser-Anteil zu bestimmen als auch durch die Nutzung des Synthetic Aperture Radar (SAR) Verfahrens ein Bild des Prüfstücks zu generieren, aus dem Faser-Verteilung sowie -Ausrichtung entnommen werden können. Somit ist eine umfassende Charakterisierung des Prüfstücks möglich, die insb. zerstörende Prüfverfahren wie die Veraschung (zur Bestimmung des Fasergehalts) ersetzt und durch die Bildgebung völlig neue Prüfaufgaben ermöglicht, so etwa die Detektion von „Fasernestern“.

Die Automation des gesamten Prüfablaufs wird primär durch eine KI-gestützte Bilderkennung der SAR-Aufnahmen gewährleistet, die mittels eines Verfahrens des unsupervised Learnings Abweichungen von regulären Gut-Teilen selbsttätig erkennt. Durch diese automatisierte Bildanalytik können nicht nur SAR-Bilder faserverstärkter Kunststoffe analysiert werden, ebenso ist etwa eine Lage-Kontrolle für Kunststoffteile mit eingelegtem Metall, etwa Steckern und Konnektoren, möglich. Dokumentation und Archivierung jeder einzelnen Prüfung werden direkt in einer vollständig maschinenlesbaren und manipulationssicheren Data Warehousing Infrastruktur erledigt, sodass diese auch einer weiteren Meta-Auswertung zur Verfügung stehen.

Einführung

Durch die zunehmende Bedeutung des Leichtbaus, nicht nur in der Automobilindustrie, stehen Alternativen zu metallischen Werkstoffen, in der Regel Stahl, immer stärker im Fokus der Forschung. Etabliert im Sinne der technischen Anwendung haben sich hier vor allem



Kohle- oder Glasfaserverstärkte Kunststoffe, da sie ein wesentlich geringeres Leistungsgewicht aufweisen als gerade Stahl und daher mittlerweile vor allem im automotiven High-End Segment Einsatz finden. Dies bringt naturgemäß auch den Bedarf an Methoden zur – im Idealfall – zerstörungsfreien Prüfung dieser Werkstoffe mit sich, da etwaige Fehler im Fertigungsprozess aufgrund der inhärenten Anisotropie der mechanischen Eigenschaften von CFK- und GFK-Teilen katastrophale Auswirkungen auf die Performance im späteren Einsatz haben. Dies gilt insb. für grundlegende Fertigungsparameter wie Faseranteil und Faserlage bzw. -ausrichtung.

Um diese Parameter zu prüfen, sind aktuell zerstörende Verfahren die Regel. Dies wird insb. deutlich an der Veraschung als der klassischen Prüfmethode zur Bestimmung des Gewichtsanteils von Kohle- oder Glasfasern am gesamten Bauteil. Um entsprechende Parameter zerstörungsfrei zu prüfen, ist eine Methodik erforderlich, die sowohl zuverlässig quantitative Ergebnisse für die genannten Parameter liefert als auch automatisierbar im Sinne des Gedankens der ZfP 4.0 ist, also keine manuellen Arbeitsschritte erfordert.

In dieser Arbeit wird die Nutzung eines besonders breitbandigen Radars zur Bestimmung von Produktionsparametern von CFK-Bauteilen untersucht. Im Vergleich zu bereits weit verbreiteten, bildgebenden Verfahren, die meist auf der Nutzung von hochenergetischer Röntgenstrahlung basieren, bietet die Radar-Technik einige entscheidende praktische Vorteile:

- Röntgen-basierte Aufbauten benötigen aus Gründen des Arbeitsschutzes eine speziell unterwiesene Fachkraft („Strahlenschutzbeauftragter“), nur eine solche darf an diesen Geräten abreiten und entsprechende Versuche durchführen. Radargestützte Aufbauten unterliegen aufgrund der Unbedenklichkeit der hier verwendeten Strahlung keine besonders geschulten bzw. zertifizierten Bediener.
- Röntgen-basierte Aufbauten sind teuer. Nicht nur die Komponenten wie die Röntgenröhre zur Erzeugung der Strahlen selbst schlagen mit niedrigen fünfstelligen Beträgen zu Buche, sie sind ebenfalls einem stetigen Verschleiß unterworfen und müssen daher in regelmäßigen Abständen ausgetauscht werden. Zusätzlich verteuern die zur Abschirmung des eigentlichen Röntgen-Geräts notwendigen Sicherheitskomponenten wie Einhausungen den Aufbau weiter. Dies entfällt aufgrund der Unbedenklichkeit der Radar-Strahlung für entsprechende Aufbauten komplett, ebenso unterliegt das hier verwendete Radar-Gerät der Fa. 2 π -Labs GmbH aus Bochum praktisch keinem Verschleiß, sodass auch ein regelmäßiger Austausch entfällt.

Im Folgenden wird die Eignung von hochauflösender Radarsensorik zur Prüfung von CFK-Proben hinsichtlich ihres Faseranteils sowie der Faserverteilung diskutiert. Ebenso wird ein weiteres, praktisch motiviertes Anwendungsbeispiel des FMCW-Radars präsentiert, die Prüfung von Lage und Ausrichtung metallischer Kontakte in einer Kunststoff-Steckverbindung. Diese Prüfung eines Komposit-Bauteils, die aktuell noch rein visuell oder mit einer Lehre und ausschließlich stichprobenhaft durchgeführt wird, stellt eine wesentliche Qualitätssteigerung in der Fertigung entsprechender Bauteile dar.

1. Grundlagen der Radartechnik

Fortschritte im Bereich der Silizium Germanium (SiGe) Chiptechnologie, getrieben durch den Erfolg von Radarsensorik im Automobilbereich, erlauben die Nutzung von höheren Frequenzbereichen über 100 GHz auch für industrielle Radarsysteme.

Anpassungen in der Frequenzregulierung für breitbandige Radarsensorik in Industrieanwendungen [1, 2] ermöglichen zudem die Nutzung immer größerer Spektralbereiche für industrielle Sensorik, so dass chip-basierte Radarsensorik für viele

Anwendungen in der zerstörungsfreien Prüfung immer mehr zu einer verlässlichen Alternative für THz-Sensorik oder Röntgen wird. Vorteile der Radartechnik sind durch die hohe Integration, Reproduzierbarkeit in der Herstellung und Langzeitverlässlichkeit der Chip-basierten Hardware gegeben. In Anwendungen, in denen die direkte Auflösung dünner Schichten gefordert ist, bieten THz-Systeme aufgrund ihrer größeren spektralen Messbandbreite jedoch weiterhin Vorteile.

Durch die Möglichkeit mittlerweile auch FMCW-Radarmessungen mit 56 GHz Bandbreite [3] im Frequenzbereich >116 GHz durchzuführen entstehen einige Vorteile die mit bisheriger schmalbandiger Sensorik mit Bandbreiten von meist ca. 1 GHz nicht möglich waren.

So können über einen breiten spektralen Bereich Informationen über das Transmissions- und Reflexionsverhalten von Radarzielen gewonnen werden und aus diesen die komplexe Übertragungsfunktion nach Betrag und Phase [4] bestimmt werden. Das Messergebnis ähnelt dem von Netzwerkanalyse-Laborgeräten, jedoch in einem handlichen industrietauglichen (In-Line sowie End-of-Line tauglichen) Sensorsystem und mit einer Preisreduktion von ca. dem Faktor 20 bei für die Mehrzahl der industriellen Messaufgaben ausreichendem Dynamikbereich.

1.1 Funktionsprinzip FMCW Radar

Bei FMCW-Radarsensoren handelt es sich um frequenzmodulierte Dauerstrich-Radarsensoren bei denen ein mittels spannungsgesteuertem Oszillator erzeugtes Sendesignal linear moduliert wird, also eine Frequenzrampe erzeugt wird. Diese wird über eine Antenne gesendet und am bestrahlten Radar-Ziel reflektiert und wieder empfangen. Durch das gechirpte Signal wird das Radarziel im überdeckten Frequenzbereich abgetastet und es werden komplexe (Betrag und Phase) Datensätze über die frequenzabhängige Reflexionscharakteristik des Objekts ermittelt.

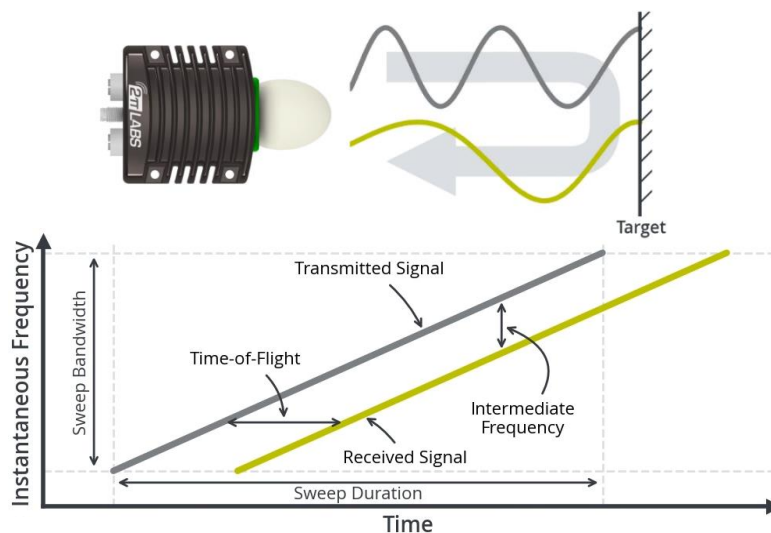


Abb. 1. Schematische Darstellung des FMCW-Verfahrens.

Abb. 1 zeigt oben exemplarisch eine Anordnung mit einem Radarziel. Die Frequenzrampe ist durch einen Frequenz-Chirp im Signal angedeutet.

Unten sind die korrespondierenden Sende und Empfangssignale dargestellt. Durch Mischen der aktuell gesendeten Frequenzrampe mit dem empfangenen Signal kann die Laufzeit „Time-of-Flight“ in das Zwischenfrequenzsignal „Intermediate Frequency“ umgesetzt werden. Dieses enthält in seiner Frequenz die Distanzinformation zum Ziel. Ein größerer Abstand, also längere „Time-of-Flight“ resultiert in einer höheren Frequenz im Zwischenfrequenzsignal. Zudem sind in dem Signal auch frequenzabhängige Informationen über die Ausbreitungsphase sowie die Amplitude enthalten. In Mehrzielumgebungen

überlagern sich die Reflexionssignale der einzelnen Ziele entsprechend dem Superpositionsprinzip, so dass das Verfahren Mehrzielfähigkeit besitzt.

1.2 Materialparameterextraktion & Auflösung bei 3D-SAR-Bildgebung

3D-Objekte können bildgebend erfasst werden, indem der Sensor z.B. auf einer 2D-Ebene über dem Objekt dieses meanderförmig abtastet. Die Sensorsignale der Einzelpositionen werden synthetisch fokussiert, so dass im gesamten 3D-Bildbereich ein scharfes Objektbild entsteht. Das Bild enthält neben Reflexions-Betragswerten auch Phaseninformationen und somit Informationen über den Frequenzgang des aufgenommenen Objekts.

Auf Basis der Information des komplexen Frequenzgangs der vermessenen Objekte können über einen „Software Defined Radar“ Ansatz physikalische Eigenschaften des Objekts extrahiert werden. Dazu wird mittels a-priori Informationen über das Objekt ein Modell erstellt und dieses über Variation der Eingangsparameter mit dem Messergebnis synchronisiert. Dadurch lassen sich z.B. Dicke und Permittivität des Objekts bestimmen und damit bei bekanntem Hintergrundmaterial und bekanntem Inklusionsmaterial (z.B. Glasfasern) der Faseranteil bestimmen.

Zudem können Objekte in einer Ebene gescannt werden und dann mittels 3D-Darstellung der komplexen Messdaten Informationen über das Objekt gewonnen werden.

Eine gute laterale Auflösung kann dabei durch spezielle Realapertur-Fokusantennen oder auch durch Verfahren zur Erzeugung von synthetischen Aperturen (SAR) erzielt werden. Beim SAR-Verfahren sind Auflösungen von bis zu der Hälfte der Aperturgröße möglich, was bei z.B. bei Abstrahlung mittels eines offenen Hohlleiters im D-Band (110 GHz – 170 GHz) einer Auflösung von ca. 0,8 mm entspricht. In Entfernungsrichtung wird die Auflösung durch die Bandbreite der FMCW-Modulation bestimmt und beträgt bei 56 GHz Modulationsbandbreite in etwa 3 mm.

Zusätzlich ist mit den breitbandigen Systemen weiterhin die präzise Abstandsmessung möglich, hier werden mittlerweile Genauigkeiten von +/- 1µm erreicht [5] bei den von FMCW-Radar bekannten Vorteilen wie Absolutmessung und Mehrzielfähigkeit.

2. Grundlagen der maschinellen Bilddatenverarbeitung

2.1 Self-Organizing Maps als Klassifikationsmethode

Self-Organizing Maps (zu Deutsch: selbstorganisierende Karten) stellen einen Sonderfall in der großen Familie der Neuronalen Netze – der mittlerweile bekanntesten Gruppe von Verfahren des Maschinellen Lernens – dar. Sie gehören, anders als klassische, geschachtelte Neuronale Netze mit mehreren Ebenen von Nodes, zu den sog. unsupervised-learning Methoden. Das bedeutet, dass kein aufwändiges Labelling von Trainingsdaten in Gut- und Schlechtzustände erforderlich ist, die Damit kann eine Klassifikation von Bilddaten ohne a priori Wissen ausschließlich basierend auf algorithmisch identifizierter Ähnlichkeit der Bilder durchgeführt werden. Dies ermöglicht Klassifikationsaufgaben ohne vorherige Kenntnis der Anzahl und Art der zu bildenden Klassen [6]. Befinden sich in einem Satz Bilddaten etwa Fotografien von Hunden, Katzen und Mäusen, so wird die SOM eine dreiteilige Gliederung ganz von selbst herausbilden. Kommt dann z. B. die Fotografie eines Vogels hinzu, wird diese in keine der drei Teile der Karte einsortiert werden können und entsprechend an den Rand der Karte rücken und so als Ausreißer deutlich hervortreten. Da der Name bei SOMs auch Programm ist („Karte“ ist hier wörtlich zu nehmen), kann sogar ein Bestimmtheitsmaß für die so erfolgte Klassifikation ermittelt werden, da der Abstand in der Karte ein direktes Maß für die Ähnlichkeit darstellt [7]. Dieses Distanz-Maß wird hier für alle weiteren Klassifikations-Aufgaben als diskriminierende Größe herangezogen.

2.2 Eine etablierte Anwendung: End-of-Line Prüfung in der manuellen Fertigung

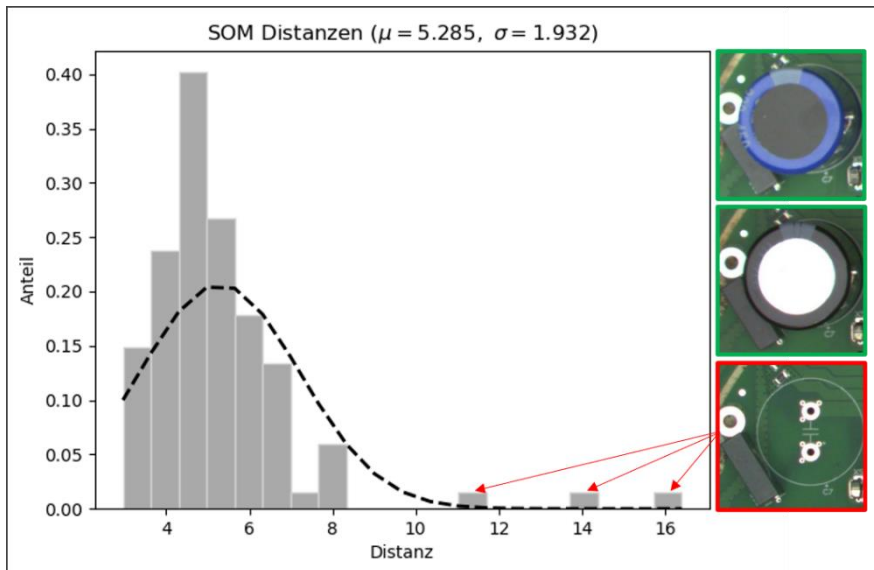


Abb. 1. Normiertes Histogramm der gefundenen SOM-Distanzen für ein Trainings-Sample von 100 Bildern eines Kondensators auf einer Platine. Die so trainierte SOM wurde dann auf drei weitere Bilder angewandt, bei denen der Kondensator fehlte. Diese wurden mit Distanzmaßen außerhalb des 3σ Konfidenz-Intervalls (entspricht einer Bestimmtheit größer 99,7%) klar als fehlerhaft erkannt.

Obwohl die Bestückung von Platinen mit SMD-Bauteilen heute nahezu ausschließlich mit Automaten passiert, kommt es immer wieder vor, dass etwa aufgrund von Größe und/oder Gewicht einzelne Bauteile nicht in einem solchen Automaten platziert werden können und daher im Anschluss an die automatisierte Bestückung manuell aufgebracht werden müssen. Sehr selten kommt es dabei vor, dass ein solches Bauteil wie eine Spule oder ein Kondensator schlicht vergessen wird, sodass eine hundertprozentige Kontrolle der Bauteile zum Ende der Fertigung im Sinne einer End-of-Line Prüfung nötig wird. Um diesen Fall ausschließlich mit Bildern von korrekt bestückten Platinen abzudecken, kann eine SOM zum Einsatz kommen. Sie erhält durch das Training ausschließlich mit einer größeren Anzahl von Gut-Bildern gleichsam Kenntnis über die prozess-intrinsische Varianz, die als normal zu erachten ist, und quantifiziert diese in einem mittleren Abstand der einzelnen Bauteile zueinander. Tritt nun der Fall ein, dass etwa ein Kondensator schlicht vergessen wurde, so erkennt die SOM den Unterschied dieses einen Bildes zu allen bisherigen und platziert es daher in großem Abstand zu den anderen. Anhand dieses Abstandes (für den konkreten Fall eines fehlenden Kondensators dargestellt in Abb. 2) kann so einfach quantifiziert werden, wie ähnlich ein einzelnes Bild den bisherigen ist, ob also ein Ausreißer vorliegt oder nicht [8].

Damit wird es möglich, ein Training ausschließlich auf Gut-Bildern aufzusetzen, sodass eine langwierige und manchmal auch schlicht zu aufwändige Suche nach Bildern von Schlecht-Teilen gänzlich vermieden werden kann. Ebenso können durch dieses Vorgehen Fehlerzustände identifiziert werden, die beim Aufsetzen des Prüfverfahrens noch gar nicht bekannt waren, solange sie sich im Bild hinreichend unterschiedlich zu den angelernten Gut-Zuständen darstellen. Durch die vorliegende Implementierung wird zusätzlich erreicht, dass die Erkenn-Genauigkeit der SOM der des Menschen nachempfunden wird; Bilder, die für das menschliche Auge also einfach unterscheidbar sind werden auch durch die SOM gut getrennt und umgekehrt. Durch dieses „natürliche Lernen“, das der Intuition des Menschen entspricht, wird insb. die Handhabung des Verfahrens erleichtert, da die Klassifikationsgüte mit dem menschlichen Empfinden der Schwierigkeit des Problems korreliert.

3. Anwendungen für die zFP (faserverstärkter) Kunststoffe

In Folgenden werden einige mit dem Radarsystem aus [3] gewonnene Ergebnisse vorgestellt.

3.1 Bestimmung des Faseranteils

Zum Nachweis der modellbasierten Extraktion der Faseranteils wurden Referenz-Objekte aus Polycarbonat (LEXAN 124R) in Plattenform angefertigt (Faseranteil 0, 10, 20, 25, 30 und 35%) und die Dielektrizitätszahl über einen modellbasierten Ansatz extrahiert.

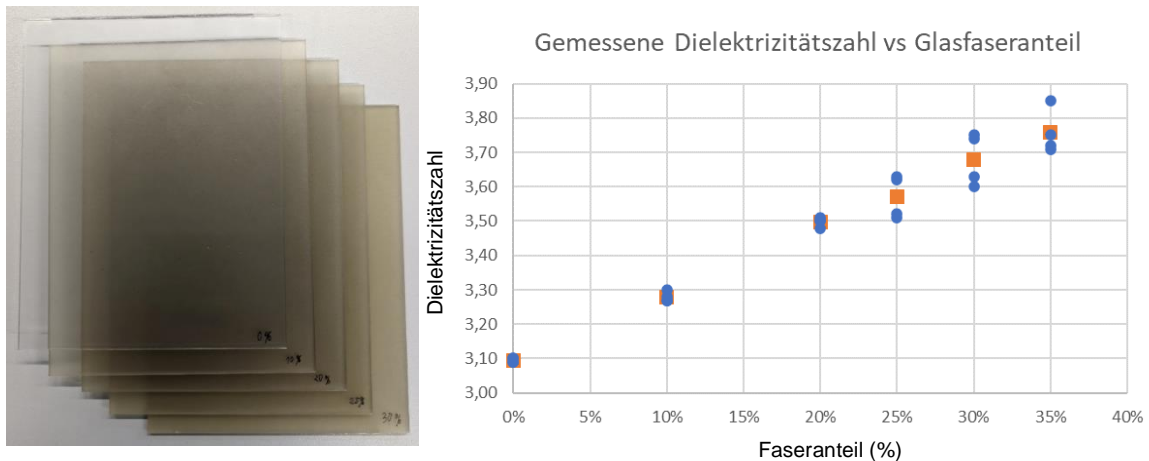


Abb. 3. Gemessene Dielektrizitätszahlen der Proben (4 Messstellen an den Ecken jeder Probe, Mittelwert in Orange) über dem bekannten Soll-Faseranteil der Probe.

Abbildung 3 zeigt zwischen Faseranteil und Dielektrizitätszahl einen nahezu linearen Zusammenhang, welcher durch eine entsprechende Kalibration sofort zur Bestimmung des Faseranteils in unbekanntem Bauteilen herangezogen werden kann. Dies ist in schneller Folge und automatisierbar, etwa über einen Handling-Roboter, möglich.

Höhere Faseranteile und der Einfluss von Faserrichtungen machen die Verwendung einer genaueren Analyse über Mischungsformeln und mit zusätzlicher Auswertung der Polarisationsinformationen notwendig.

3.2 Bildgebende Ermittlung der Faserlage in Werkstoffen

Der nächste Schritt hin zu einem anwendungstauglichen Prüfverfahren ist die ortsaufgelöste Bestimmung des Faseranteils. Abbildung 4 zeigt zur Verdeutlichung der erreichbaren

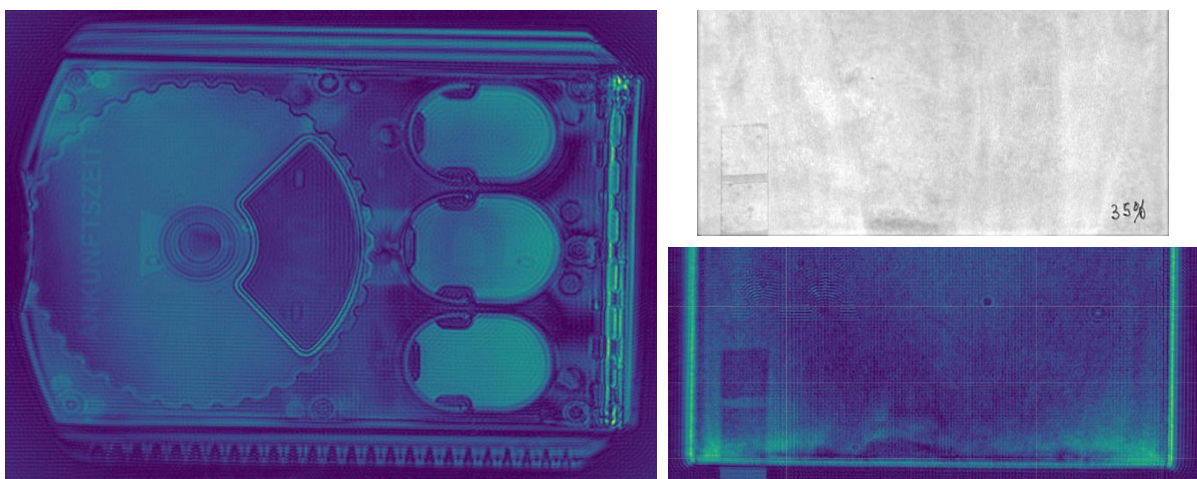


Abb. 4. Hochoaufgelöstes SAR-Bild einer Parkscheibe und einer Platte mit Faserinkclusionen.

Auflösung ein SAR-Bild einer Parkscheibe als bekanntes Referenzobjekt im Frequenzbereich von 126-182 GHz. Zudem ist rechts daneben das SAR Bild der oben erwähnten Probenplatte mit Glasfaserinklusionen dargestellt. Im SAR-Bild sind, insbesondere im Randbereich, bereits mit bloßem Auge die Fluktuationen im Fasergehalt um den Anspritzpunkt feststellbar, obwohl die Fasern in der Platte im Vergleich zu anderen Bauteilen bereits sehr homogen verteilt sind. Eine weitergehende Auswertung ist nun mit Anwendung der Modellbasierten Extraktion des Fasergehalts aus jedem komplexwertigen Bildpunkt möglich.

3.3 Lagekontrolle metallischer Komponenten

Die Fertigung hybrider Bauteile, etwa solcher mit in einen Kunststoff-Korpus eingelegten metallischen Konnektoren zur Verwendung als elektrische Steckverbindungen, spielt etwa im Automotive-Bereich eine große Rolle. Um deren Funktionsfähigkeit sicherzustellen, ist die akkurate, formhaltige Verbindung beider Komponenten unerlässlich, da sonst schlicht keine Passung hergestellt werden kann, die für eine Steckverbindung natürlich essentiell ist. Die Kontrolle der genauen Lage der eingelegten metallischen Komponente ist aufgrund der oft sehr kleinen Abmessungen dieser Bauteile eine Herausforderung, da eine solche Kontrolle heute mit Lehren oder sogar nur rein optisch mit dem menschlichen Auge passiert. Filigrane Strukturen oder auch ungenaue Passungen bzw. zu große Taumelkreise einzelner metallischer Komponenten können so nur unzureichend erkannt werden. Auch ist die Kontrolle in dieser Form nicht automatisierbar.

Hier bietet die Anwendung der Radartechnik aufgrund der sehr guten Trennschärfe zwischen metallischen Komponenten und solchen aus Kunststoff eine ideale Lösung. Abb. 5 zeigt das im SAR-Verfahren erzeugte Bild eines beispielhaften Stecker-Bauteils mit der Kantenlänge von etwa 22 mm. Die einzelnen, immer paarweise angeordneten Konnektoren auf der rechten Seite sind deutlich zu erkennen. Mit Hilfe eines entsprechenden Computer Vision Ansatzes (s. dazu 2.1) kann die Kontrolle von Anzahl, Lage und ggf. Ausrichtung der einzelnen Konnektoren nun quantitativ überprüft und gleichzeitig automatisiert werden.

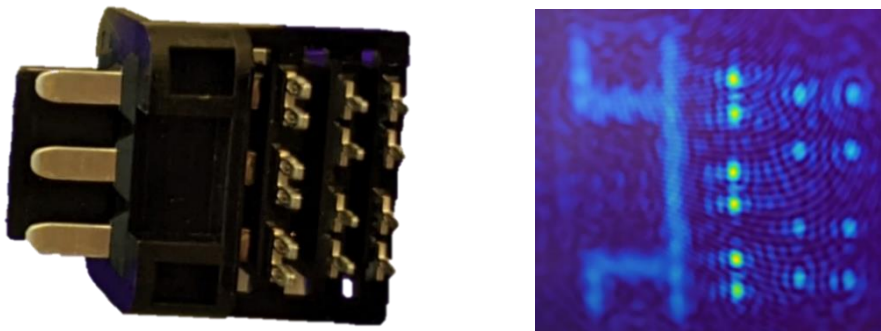


Abb. 5. Radar SAR-Bild eines Spritzguss-Steckers mit Metall-Inlays (Kontakte). Über das 3D bildgebende Verfahren können alle Topologie-Informationen wie Lage, Höhe und Taumelkreis der Kontakte extrahiert werden.

4. Fazit und Ausblick

Die Herstellung von und Arbeit mit faserverstärkten Kunststoffen erfordert für die nachgelagerte Qualitätskontrolle aktuell nach ausschließlich manuell durchzuführenden, zerstörenden Prüfverfahren. Zerstörungsfreie, bildgebende Verfahren wie etwa die Mikro-CT sind aufgrund des großen apparativen Aufwandes mit entsprechender Kostenstruktur derzeit unwirtschaftlich, gerade in der industriellen Anwendung. Dadurch werden

Qualitätskontrollen nur stichprobenhaft durchgeführt; ein in die Produktion integriertes, automatisiertes Qualitätsmonitoring findet nicht statt.

Mithilfe des Einsatzes eines kompakten FMCW-Radars lässt sich nun eine automatisierte Qualitätssicherung produktionsbegleitend realisieren, kombiniert man insb. das bildgebende SAR-Verfahren mit einer leistungsfähigen Computer Vision Algorithmik. Nicht nur ist es damit möglich, den Fasergehalt von Werkstücken zerstörungsfrei zu quantifizieren und so die derzeit übliche Veraschung als zerstörendes Prüfverfahren überflüssig zu machen. In gleichem Maße kann eine unmittelbare Lagekontrolle von Fasern im Bauteil durchgeführt und Nester von Fasern dargestellt werden. Den Verlauf des Fasergehalts im Bauteil darzustellen ist möglich, wogegen die Bestimmung der Ausrichtung der Fasern weitergehende Analysen wie z.B. Auswertung von Polaritätsinformationen notwendig macht. Hier bedarf es weiterer Entwicklungsarbeit, um etwa mit Hilfe des Vergleichs der Reflexionseigenschaften bei Kreuz- und Co-polarisierter Bildgebung die Ausrichtung der Fasern detektieren zu können.

Ein weiteres, vielversprechendes Anwendungsszenario für die Radartechnik in der Fertigung hybrider Kunststoff-Teile ist die Lagekontrolle von in einen Kunststoff-Korpus eingelegten metallischen Komponenten, beispielsweise Steckerverbindungen im Automotive-Bereich, die aufgrund ihrer kleinen Abmessungen und daraus resultierender hoher Passungsgüte besonders präzise zusammengefügt werden müssen, sodass ihre spätere Funktionalität als Steckverbindung gewährleistet ist.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Kunststoff-Institut Lüdenscheid (KIMW GmbH) für die Fertigung der Referenz-Materialproben.

Teile der Arbeiten wurden gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Vorhaben KI-ROJAL FKZ 01IS21001.

Referenzen

- [1] ECC Decision (22)03 “*Technical characteristics, exemption from individual licensing and free circulation and use of specific radiodetermination applications in the frequency range 116-260 GHz*”, CEPT, Nov. 18, 2022. Link: <https://docdb.cept.org/document/28577>
- [2] ECC Report 334 “*UWB radiodetermination applications in the frequency range 116-260 GHz*”, CEPT, Feb. 28, 2022, amended Feb. 3, 2023. Link: <https://docdb.cept.org/document/26187>
- [3] S. Kueppers, T. Jaeschke, N. Pohl and J. Barowski, "Versatile 126–182 GHz UWB D-Band FMCW Radar for Industrial and Scientific Applications," in *IEEE Sensors Letters*, vol. 6, no. 1, pp. 1-4, Jan. 2022, Art no. 3500204, doi: 10.1109/LENS.2021.3130709.
- [4] T. Jaeschke, S. Kueppers, N. Pohl and J. Barowski, "Calibrated and Frequency Traceable D-Band FMCW Radar for VNA-like S-Parameter Measurements," *2022 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, Las Vegas, NV, USA, 2022, pp. 64-67, doi: 10.1109/RWS53089.2022.9719876.
- [5] L. Piotrowsky, S. Kueppers, T. Jaeschke and N. Pohl, "Distance Measurement Using mmWave Radar: Micron Accuracy at Medium Range," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 70, no. 11, pp. 5259-5270, Nov. 2022, doi: 10.1109/TMTT.2022.3195235.
- [6] Aggarwal, C.; et al.: Algorithms and Applications. Chapman and Hall/CRC, 2013.
- [7] Norris R. P.; et al.: A Comparison of Photometric Redshift Techniques for Large Radio Surveys. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Volume 131, Issue 1004, pp. 10800, October 2019, arXiv:1902.05188.
- [8] Zinn, P-C.; et al.: Kamerabasierte End-of-Line Prüfung in der manuellen Fertigung – Defekte ohne Anlernen erkennen mittels Self-Organizing Maps. in VISION, tedo-Verlag, Ausgabe September 2021.