

Schlussbericht vom 15.11.2022

zu IGF-Vorhaben Nr. 21197 BR

Thema

Neuartige Wirbelstromsonde basierend auf flexiblen GMR-Sensor-Arrays zur Analyse von Bauteilen komplexer Formen - WirbelFlex

Berichtszeitraum

01.06.2020 - 31.05.2022

Forschungsvereinigung

Europäische Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e.V.

Forschungseinrichtung(en)

Forschungsstelle 1:	Forschungsstelle 2:	Forschungsstelle 3:
Fraunhofer IKTS-MD Martin Schulze Leitung: Prof. Dr. rer. nat. habil. A. Michaelis Maria-Reiche-Str. 2 01109 Dresden	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf Dr. Denys Makarov Leitung: Prof. Dr. Dr. h. c. Roland Sauerbrey Bautzner Landstraße 400 01328 Dresden	Fraunhofer IKTS-DD Dr. Mykola Vinnichenko Leitung: Prof. Dr. rer. nat. habil. A. Michaelis Winterbergstraße 28 01277 Dresden



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Wissenschaftlich- technische und wirtschaftliche Problemstellung

Wirbelstrommethoden (ET – Eddy-Current Testing) haben sich als schnelle, zerstörungsfreie Verfahren zur Prüfung von elektrisch leitfähigen und/oder magnetisch permeablen Werkstoffen bewährt und sind deshalb über viele Jahre in der Industrie bereits etabliert. Insbesondere wird diese Technik zunehmend zur Prüfung der noch relativ neuen, aber besonders im Automobilbau und in der Luft- und Raumfahrt weit verbreiteten carbonfaserverstärkten Kunststoffe (CFK) eingesetzt. Mit diesen elektromagnetischen Prüfverfahren können Bauteile mit komplexer Geometrie geprüft und deren Eigenschaften wie Fasergehalt, Faserlagenorientierung sowie Defekte sicher detektiert werden (Abbildung 1a). Das Fraunhofer IKTS-MD ist derzeit eine der führenden Einrichtungen auf dem Gebiet der Entwicklung und Applikation von Wirbelstrommethoden zur CFK-Prüfung. Da die Anzahl der CFK-Bauteile, die zerstörungsfrei auf Defekte geprüft werden müssen, stark steigt [Carbon Fiber Market Analysis, 2018 – 2025. Grand View Research, 2017], hat die ET Wirbelstrom-Prüfung das Potenzial, sich in einer dynamischen Marktnische zu entwickeln. Jedoch weist das heutige ET-Verfahren durchaus Grenzen auf. Zum einen können derzeit tiefer liegende Strukturen im Schichtaufbau (Blech-CFK-Verbund, z.B. Abbildung 1b), aufgrund der limitierenden geringen Eindringtiefe der Wirbelströme, nicht geprüft werden. Anwendungen mit Forderung einer hohen Wirbelstromeindringtiefe über 1,5 mm (abhängig von der Prüffrequenz und der elektrischen Leitfähigkeit sowie Permeabilität des zu prüfenden Materials) bei gleichzeitig hoher lateraler Auflösung können demnach aktuell nicht realisiert werden. Des Weiteren ist der Einsatz der Array-Technologie, die durch das Aneinanderreihen von Sensoren die notwendige Prüfzeit wesentlich verkürzen kann, mit der bestehenden Technologie vor allem bei der Applikation an Bauteilen mit komplexer Geometrie, wie es bei Verbundbauteilen mit Kohlefasern häufig der Fall ist, nur mit sehr hohem Aufwand, meist aber gar nicht, umsetzbar.

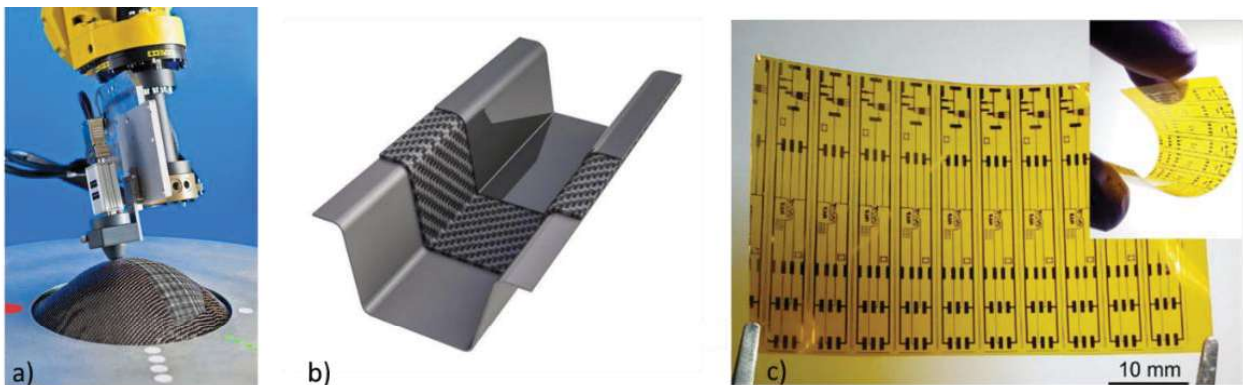


Abbildung 1: a) aktuelle Applikation des HF-Wirbelstroms an reinen CFK-Strukturen (IKTS) b) hybride Strukturen - derzeit nicht prüfbar; c) flexible GMR-Arrays (PVD Abscheidung, HZDR).

Diese offenen Fragestellungen und Probleme sollten im Projekt „WirbelFlex“ gelöst werden. Im Vergleich zu den Spulen, die normalerweise bei Wirbelstromprüfungen als elektromagnetische Sonden verwendet werden, bieten die Riesenmagnetowiderstandssensoren (**Giant MagnetoResistance – GMR**) eine höhere Magnetfeldempfindlichkeit bei deutlich kleineren Abmessungen und können auf ultradünnen flexiblen Substraten hergestellt werden. Daher sind die Wirbelstromprüfverfahren basierend auf GMR-Technologie in der Lage, bei relativ niedrigen Prüffrequenzen eine sehr hohe Eindringtiefe - bei zugleich sehr hoher lateraler Auflösung - zu ermöglichen. Somit könnte man neuartige Prüfsonden schaffen, die auch 3D-geformte CFK-basierende Bauteile genau und schnell prüfen könnten. In Vorarbeiten wurden funktionelle und flexible GMR-Sensoren bereits vom Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V. (HZDR) im

Labor demonstriert (Abbildung 1c). Um das volle Potenzial dieser Technologie bei ET-Anwendungen auszuschöpfen und ihre Kosten zu reduzieren sind aber neue technische Ansätze notwendig. Insbesondere standen für das Projekt „WirbelFlex“ Weiterentwicklungen im PVD-Abscheidungsprozess von flexiblen Dünnschicht-GMR-Sensorarrays im Vordergrund, insbesondere deren Kontaktierung unter Verwendung von Inkjet-/ Aerosoljet-Drucken in Kombination mit Diodenlaser-Bearbeitung und sowie elektrische Anpassungen an die Anforderungen von Wirbelstromsonden. Die Lösung dieses Problems wird nicht nur den Anwendungsbereich der ET-Methoden erweitern, sondern auch die Entwicklung von relevanten Dünnschicht- und Drucktechnologien vorantreiben.

Forschungsziele

Ziel dieses Projektes war es, eine neuartige technologische Herstellung von GMR-Sensoren in Dünnschichttechnologie des HZDR in Kombination mit der Kontaktierungstechnologie des Fraunhofer IKTS-DD derart weiterzuentwickeln, so dass die Anforderungen an einen praxisrelevanten Sensor zur Wirbelstromanwendung gegeben sind. Dieser wird durch das Fraunhofer IKTS zu einem Sensor-Demonstrator weiterentwickelt und erprobt. Die wichtigsten Forschungs- und Entwicklungsziele des „WirbelFlex“ - Vorhabens waren demnach:

- 1) Einsatz und Anpassung der GMR-Sensoren und deren Herstellungstechnologie an die ET-Anforderungen und Optimierung der flexiblen GMR-Sensorarrays zur Erhöhung ihrer Empfindlichkeit (HZDR)
- 2) Entwicklung einer neuen technischen Lösung basierend auf der Kombination von Inkjet und Diodenlaserbearbeitung zur Kontaktierung der flexiblen GMR-Sensoren und Erweiterung des Prozesses auf Substraten mit einer Dicke unter 10 µm (IKTS-DD)
- 3) Realisierung eines Demonstrators eines innovativen Wirbelstrom-GMR-Sensorarrays mit verbesserter Empfindlichkeit, größerer Diagnostik-Eindringtiefe bis 10 mm bei einer Ortsauflösung ≤ 0,5mm (IKTS-MD) (Abbildung 2).

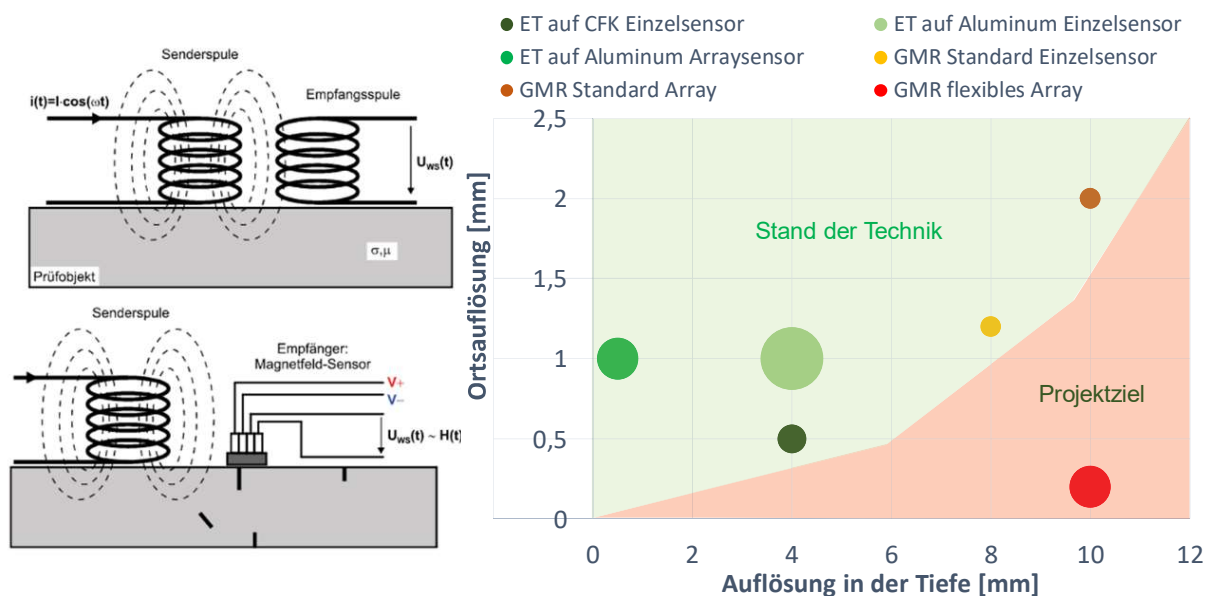


Abbildung 2: Vergleich der Konzepte Spulen- und GMR-basierter Sensorik in Bezug zu Aufbau und erreichbaren Lateralen- und Tiefenauflösungen.

Arbeitshypothese

Mit der Anwendung der neuartigen GMR-Sensortechnologie wurden Sensor-Arrays auf flexiblem Substrat aufgebaut. Durch den kompakten Aufbau der neuen Arrays sollte die laterale Auflösung im Vergleich zum aktuellen Stand der Technik noch einmal entscheidend verbessert werden. Ebenso ermöglichten derartige Sensor-Arrays auf flexiblen Trägern die Prüfung von Bauteilen mit komplexen Geometrien. Damit kann die GMR-Technologie genau die technologische Nische füllen, die die oben genannten Probleme adressieren.

Die GMR-Strukturen wurden auf die Verfahrensanforderungen der Wirbelstromprüfung angepasst und mittels PVD-Abscheidung auf das Polymersubstrat abgeschieden und charakterisiert (HZDR). Hierbei wurde insbesondere die Anwendbarkeit und Optimierung solcher GMR-Arrays für ET-Sonden untersucht. Neben dem Magnetronspütern entwickelte das HZDR eine Technologie zur Abscheidung von Hochleistungs-GMR-Sensoren über große Flächen (20x20 cm²) mit der industriell angepassten Methode des Ionenstrahlspüterns, welche ebenfalls GMR-Sensoren mit verbesserter Empfindlichkeit ermöglichte.

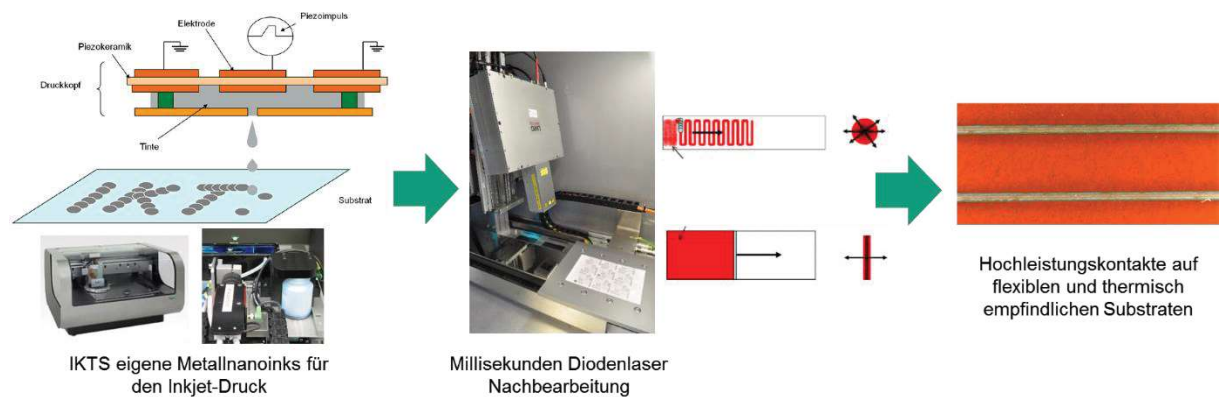


Abbildung 3: Kombination von konventionellem Inkjetdruck mit einem neuartigen Nachbearbeitungsverfahren basierend auf einer Diodenlaserquelle (Diodenlaser-Array).

Um das Problem der elektrischen Kontaktierung großflächiger GMR-Sensorarrays auf flexiblem Substrat zu lösen, wurde der Inkjet-Druck von Metallleiterbahnen (Ag, Cu) in Kombination mit einer „Millisekunden Diodenlaser Nachbearbeitung“ am Fraunhofer IKTS-DD eingesetzt (Abbildung 3). Im Rahmen des Projektes wurden die Tintenrezeptur sowie die Druck- und Nachbearbeitungsparameter an die GMR-Kontaktierungsanforderungen angepasst.

In dem Projekt wurden auf GMR-Strukturen basierende flexible Wirbelstromarrays aufgebaut und an Prüfkörpern komplexer Form, welche definierte Defekte, entsprechend einschlägigen Standards beinhalten, evaluiert (IKTS-MD). Dabei war geplant sensornahe Vorverstärker auf den Polymerfolien zu integrieren und Anpassschaltungen als auch Firm- und Softwareanpassungen für die hauseigene Wirbelstromplattform EddyCus® zu entwickeln.

Die Industriepartner des projektbegleitenden Ausschusses steuerten sowohl Probekörper bei und standen mit ihren unternehmenseigenen Kompetenzen in Bezug auf Sensorintegration und Kommerzialisierung beratend den drei Forschungsstellen bei.