

3D-strain-sense

SHM von bionischen 3D-Druck-Strukturbauteilen über Direct-to-Shape Ink-Jet-Printing von Dehnungssensoren

Programm / Ausschreibung	TAKE OFF, TAKE OFF, TAKEOFF Ausschreibung 2021	Status	laufend
Projektstart	01.04.2023	Projektende	31.03.2026
Zeitraum	2023 - 2026	Projektlaufzeit	36 Monate
Keywords	Ultraleichtbau, Zustandsüberwachung, Funktionales Drucken, Sensoren		

Projektbeschreibung

Ultra-Leichtbau ist der Schlüssel für die Umsetzung der Zero-Emission-Strategie der Luftfahrt. Vor allem der Ersatz von Kohlenwasserstoff-basierten durch Elektro-Antriebe mit höherer Anzahl kleinerer Aggregate an aerodynamisch optimalen Positionen am Airframe ändert disruptiv derzeitige Konstruktionsleitlinien, die z.B. thermische Schädigung der Triebwerksbefestigungen am Airframe im Falle von Triebwerksbränden berücksichtigen müssen. Heute bereits verfügbare bionische, gewichtsoptimierte Bauteilauslegung nutzt die Topologie-Optimierung für möglichst gleichmäßig hohe Belastung entlang von Lastpfaden, was damit zu komplexen Freiformgeometrien von Fachwerk-ähnlichen Verstreibungen führt. Deren wirtschaftliche Fertigung ist konventionell (Schmieden, CNC-Zerspanen) kaum möglich und bedarf additiven Fertigungsmethoden (AM, „3D-Druck“) mit den erforderlichen Werkstoffen höchster spezifischer Festigkeit (z.B. TiAl6V4, PEI). Der dabei genutzte lagenweise Aufbau, z.B. aus dem Pulverbett (PBF) oder mit Filamenten (FDM), führt aber gegenüber z.B. Walzprodukten zu signifikant höheren Fehlerdichten (Poren, Einschlüsse, Bindefehler zwischen den Lagen, etc.), welche z.B. gehäuft in Übergängen mit großen Wandstärkenunterschiede (bionische Fachwerkknotten) auftreten. Damit wird sehr aufwendige zerstörungsfreie Werkstoffprüfung (NDT) erforderlich – vor Einbau mit z.B. Computertomographie und bei jeder Inspektion mit z.B. Ultraschall. Komplex gekrümmte bionische Oberflächen sind dabei nur extrem schwierig und zeitaufwendig manuell prüfbar, was derzeit die Barriere zur AM-Fertigung von (Primär-)Strukturbauteilen darstellt. Structural Health Monitoring (SHM) mit kontinuierlicher sensorischer Überwachung höchstbeanspruchter Bauteil-Bereiche bietet dafür einen höchst wirtschaftlichen Ausweg, fehlt aber bislang speziell für komplexe bionische Freiformoberflächen, z.B. auf Bauteile aufdruckbare Sensorik zur z.B. Dehnungsmessung.

Ziel von „3d-strain-sense“ mit einem transdisziplinären Team von Spezialisten aus KMUs und F&E-Instituten ist daher die Entwicklung von funktionalem Direct-to-Shape-Druck von resistiven Sensoren auf konvexe und konkave Freiformoberflächen mittels Roboter-gesteuertem Inkjet-Druck. Erstmals werden die zu bedruckenden Teile bei vertikaler Druckrichtung bewegt, um signifikant höhere Präzision und Reproduzierbarkeit gegenüber gekippten Druckköpfen sowie auch den Druck innerhalb von Hüllstrukturen zu ermöglichen (JR). Die Entwicklung von Demonstratoren für Zusatztankhalterungen mit hohem Bedarf in Kleinflugzeugen (Mali-Air in Kooperation mit Eclipse Aerospace und Diamond Aircraft als assoziierte Flugzeughersteller) ermöglicht neben bereits mittelfristigem kommerziellen Projektnutzen (2025) auch die wissenschaftlich-fundierte Ermüdungsprüfung und Versagensuntersuchung an bionischen PBF TiAl6V4- und FDM PEI-Demonstratoren im Labor (MCL)

und damit die entscheidende Datenbasis für die Validierung der Prozesssimulation (SinusPro) als essentielle Basis zur AM-Weiterentwicklung speziell für Topologie-optimierte Komponenten mit fertigungstechnisch schwieriger Wärmekonzentration in Fachwerkknoten (JR, Alphacam). Lebensdauervorhersage und Rissfortschrittsrechnung schließen diese Weiterentwicklung von SinusPro zu mittelfristig (2025) kommerziell verfügbarer Software für virtuelle AM-Produktentwicklung („digital twin“) ab – unter Berücksichtigung der Leitlinien zur Bauteilkonzeption für Direct-to-Shape-Printing.

Die Demonstratoren sind zudem Brücke für die langfristige Integration der SHM in den Airframe (und damit für die Integration von AM und damit bionischen Ultra-Leichtbauteilen in die Primärstruktur) bis 2035, wobei weitreichende LOIs von Technologiepartnern und des Verwertungsnetzwerks vor allem im Bereich von Kleinflugzeugen unsere Kommerzialisierungsstrategie abdecken.

Abstract

Ultra-lightweight construction is the key to implementing the zero-emission strategy of aviation. Especially the replacement of hydrocarbon-based by electric engines, e.g. in higher numbers of smaller units at aerodynamically optimal positions on aircraft fuselage and wings, disruptively changes current design guidelines, which e.g. have to take into account thermal damage to the engine mountings on the airframe in case of engine fires. Bionic, weight-optimised component design uses topology optimisation for uniformly high loading along load paths, which thus leads to complex free-form geometries of truss-like struts. Their production is hardly possible or economical by conventional (forging, CNC machining) and requires additive manufacturing methods (AM, "3D printing") with materials of the highest specific strength. However, the layer-by-layer fabrication used in this process, e.g. from the powder bed (PBF) or with filaments (FDM), leads to significantly higher defect densities (pores, inclusions, binding defects between the layers, etc.) compared to e.g. rolled products, which occur frequently in transitions with large wall thickness differences (bionic truss nodes). This requires highly elaborated non-destructive testing (NDT), i.e. before installation with e.g. computer tomography and at each inspection with e.g. ultrasound. Complex curved bionic surfaces are extremely difficult and time-consuming to inspect manually, which is currently the barrier to AM production of (primary) structural components.

Structural health monitoring with continuous sensory monitoring of highly stressed component areas offers a highly economical potential solution, but is not yet available, especially for complex bionic free-form surfaces. Sensors that can be printed directly onto components, e.g. for strain measurement, are already lacking to supplement fatigue testing in the design phase.

The aim of "3d-strain-sense" with a transdisciplinary team of specialists from SMEs and R&D institutions is therefore the development of functional direct-to-shape printing of resistive sensors on convex and concave free-form surfaces using robot-controlled inkjet printing. For the first time, the parts to be printed are moved around the vertical printing nozzle to achieve significantly higher precision and reproducibility compared to tilted print heads (JR). The development of demonstrators for customer-requested additional tank mounts in small aircraft (Mali-Air in cooperation with Eclipse Aerospace and Diamond Aircraft as associated aircraft manufacturers) enables not only medium-term commercial project benefits (2025), but also scientifically-based fatigue testing and the development of a new printing process. The project will also enable scientific insight during fatigue and failure testing on bionic PBF TiAl6V4 and FDM PEI demonstrators (MCL) and thus a decisive data basis for the validation of process simulation (SinusPro) as an essential basis for further AM development, especially for topology-optimised components with difficult heat concentration in truss nodes from a manufacturing point of view (JR, Alphacam). Lifetime prediction and crack propagation calculation complete this further

development of SinusPro into commercially available software for virtual AM product development ("digital twin") in the medium term (2025) - taking into account the guidelines for component design for direct-to-shape printing.

The demonstrators are also a bridge for the long-term integration of SHM into the airframe (and thus for the integration of AM and thus bionic ultra-lightweight components into the primary structure) by 2035, with far-reaching LOIs from technology partners and the exploitation network covering the crucial commercialisation steps, especially in the area of small aircraft.

Endberichtkurzfassung

Das Projekt 3D-strain-sense hat die technische Machbarkeit einer neuartigen Kombination aus additiver Fertigung, topologieoptimiertem Leichtbau und direkt auf 3D-Freifformflächen gedruckter Dehnungssensorik erfolgreich nachgewiesen. Wesentlich ist, dass ein robotergestütztes Direct-to-Shape-Inkjet-Verfahren entwickelt wurde, bei dem nicht der Druckkopf, sondern das Bauteil bewegt wird. Damit konnte der funktionale Druck auf komplexen 3D-Geometrien technisch demonstriert werden.

Ein zentrales Ergebnis des Projekts ist die Entwicklung einer belastbaren Prozesskette für den Druck von Dehnungssensoren auf additiv gefertigten Bauteilen. Diese umfasst die Oberflächenanalyse und -vorbereitung, das Aufbringen einer glättenden und isolierenden Basisschicht, UV-Härtung, den Druck leitfähiger Sensorstrukturen sowie ein angepasstes thermisches Postprocessing.

Hinsichtlich Leichtbau konnten topologieoptimierte Tankhalterungen für den Luftfahrtbereich entwickelt und validiert werden. Durch die Kombination aus bionischer Auslegung, additiver Fertigung und simulationsgestützter Optimierung wurde eine Gewichtsreduktion von rund 71 % erzielt – von etwa 1,4 kg auf rund 400 g. Darüber hinaus entstand im Projekt eine kooperative, digitale Arbeitsweise zwischen Design, Simulation und Fertigungsplanung, die auch für künftige Anwendungen in der additiven und robotergestützten Fertigung nutzbar ist.

Ein weiterer wesentlicher Projekterfolg war die Validierung der Sensorfunktion an Probekörpern und Demonstratoren. Dabei zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Sensorsignalen und Referenzmessungen. Die gedruckten Sensoren liefern grundsätzlich dehnungsabhängige Signale und die erreichten Zielgrößen waren für die Validierung der Topologieoptimierung ausreichend.

Das Vorhaben hat die Machbarkeit der Technologie überzeugend gezeigt und reale Demonstratoren hervorgebracht. Gleichzeitig wurde deutlich, dass für eine spätere Nutzung als robustes industrielles Strukturüberwachungssystem noch weiterführende Arbeiten erforderlich sind, insbesondere zu Temperaturdrift, Hysterese, Haftung sowie Langzeit- und Dauerfestigkeit der gedruckten Sensoren. Diese Punkte werden in weiterführenden Forschungsarbeiten adressiert.

Die Projektergebnisse wurden bereits verbreitet und verwertet, unter anderem über Demonstratoren, Messe- und Konferenzbeiträge sowie eingereichte wissenschaftliche Publikationen. Als anschauliche Kommunikationsbeispiele wurden unter anderem ein interaktives Flugzeugmodell mit gedruckten Dehnungssensoren und ein Direct-to-Shape-Demonstrator gefertigt.

Projektkoordinator

- JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH

Projektpartner

- PRIME Aerostructures GmbH
- TECHNIA GmbH
- Aviation Invest GmbH
- Materials Center Leoben Forschung GmbH
- alphacam austria GmbH