

crystAlr

Artificial Intelligence- and sensing-driven combustion burner

Programm / Ausschreibung	TAKE OFF, TAKE OFF, TAKEOFF Ausschreibung 2021	Status	abgeschlossen
Projektstart	01.09.2022	Projektende	31.08.2025
Zeitraum	2022 - 2025	Projektlaufzeit	36 Monate
Keywords	Sensoren; Künstliche Intelligenz; Additive Fertigung		

Projektbeschreibung

Die bevorstehende Einführung von Wasserstoff in Verkehrssystemen wird mehrere Herausforderungen mit sich bringen. Zu den wichtigsten gehören die erhöhte Verbrennungstemperatur und die viel schnellere Verbrennung, die zu einem Rückschlag im Brenner mit katastrophalen Folgen führen kann. Um diese Effekte zu kontrollieren wird die strukturelle Gesundheitsüberwachung (SHM) mit einem verteilten Netzwerk von Sensoren von großer Bedeutung sein. Darüber hinaus kann der viel höhere NOx-Gehalt in den Verbrennungsgasen, der sich aus der Verwendung von H₂ ergibt, nur durch die Erhöhung der Luft/H₂-Vormischungskapazität verringert werden. Zu diesem Zweck ist die Erforschung neuer Konstruktionen und Brennerkonfigurationen von wesentlicher Bedeutung. Neue fortschrittliche Fertigungstechnologien wie die additive Fertigung (AM) sind soweit ausgereift, um die konventionellen Technologien für ein freiformiges, leichtes und funktionelleres Flugzeugdesign zu ersetzen.

SHM wurde mit dem Ziel entwickelt, die Wartungskosten von Flugzeugstrukturen durch die Einführung automatischer Schadenserkennungssysteme zu senken, die in der Lage sind, beginnende Risse weit unterhalb der kritischen Größe und fast ohne menschliches Eingreifen zu erkennen. Mit der Einführung von SHM-Systemen, die auf ferngesteuerten, nahegelegenen und eingebetteten Sensoren beruhen, könnten Inspektionen der strukturellen Integrität fast kontinuierlich durchgeführt werden. Dies kann entweder während des Fluges oder während nächtlicher Zwischenlandungen, ohne dass das Flugzeug zerlegt werden muss, passieren. Dies wird bei wasserstoffbasierten Triebwerken aufgrund der oben genannten Herausforderungen noch wichtiger sein, und zu diesem Zweck ist die Sensorisierung von Komponenten unerlässlich. Die Einbettung von Sensoren in Flugzeugkomponenten und die riesigen Datenmengen, die im SHM gesammelt werden, können einen Nutzen haben, der weit über die Kontrolle der strukturellen Integrität hinausgeht. Die Datenerfassung im SHM bildet die Grundlage für ein mit künstlicher Intelligenz (KI) ausgestattetes digitales Double, das die Zukunft der Produktentwicklung in vielen Bereichen, einschließlich der Flugzeugkonstruktion, darstellt. Digitale Zwillinge, die auf KI basieren, werden wahrscheinlich eine völlige Umgestaltung des Produktdesigns auslösen, was die Effizienz steigern, die Entwicklung beschleunigen und bessere Designoptionen liefern wird, die zu einer viel besseren Leistung führen.

Im Vergleich zu dezentralen Sensoren erfassen eingebettete Sensoren viel mehr kritische Daten mit höherer Präzision. Bei Flugzeugteilen aus Polymer-Verbundwerkstoffen ist dies einfacher, bei Metallteilen aufgrund der sehr hohen Temperaturen und der rauen Umgebung jedoch sehr viel schwieriger. Daher werden neue Generationen von Sensoren benötigt, die in einer solch rauen Umgebung Daten erfassen können, ohne beschädigt zu werden.

crystAir zielt darauf ab, eine digitale Zwillingstechnologie für den neu gestalteten Verbrennungsbrenner (wirklich? Verbrennungsbrenner?) als Schlüsselement des Triebwerks zu entwickeln und einzusetzen, die auf 1) der Erfassung von Schlüsselparametern des Brenners durch Piezocryst (eingebettet) und faseroptische Sensoren (FOS) (in der Nähe platziert) und 2) einem integrierten Ansatz für maschinelles Lernen (ML) für die erfassten Daten basiert, um die Leistung des Wasserstoffbrenners im Hinblick auf einen sicheren und nahtlosen Durchflussbetrieb mit minimalen Auswirkungen auf die Umwelt zu verbessern.

Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die folgenden Herausforderungen/Problemstellungen überwunden werden

- a) Sensorik des Verbrennungsbrenners: Implementierung eines geeigneten Sensornetzwerks (1-3 Sensoren) für die SHM-Datenerfassung, basierend auf im Brenner eingebetteten Piezocryst-Sensoren;
- b) Entwicklung von Datenerfassungsstrategien, einschließlich der Auswahl von Parametern und der Positionierung der Sensoren sowie der Datenverarbeitung und der Recheneinrichtungen, zur Verbesserung von Wasserstoffverbrennungsbrennern im Hinblick auf die Vermeidung von Flammenrückenschlägen, eine verbesserte Wartung und die Reduzierung von NOx durch die Erprobung neuartiger sensorgesteuerter H2-Brenner, die mit Hilfe von AM-Technologien hergestellt werden.
- c) Entwicklung eines hybriden digitalen Zwillinges auf der Grundlage eines integrierten Ansatzes zur Modellierung von Komponenten und Verbrennungsprozessen, angetrieben durch KI-basierte Lösungen (XAL), mit dem Ziel, eine unüberwachte Gemisch- und Flammenkontrolle in der bestehenden Brennerkonstruktion durchzuführen.

Die digitale Architektur wird auf einen neu konstruierten Brenner angewendet, der mit Hilfe von Mathematik-zu-Form-Strategien und additiver Fertigung hergestellt und vollständig für die Verbrennung von Wasserstoff optimiert wurde. Für dieses Gemeinschaftsprojekt haben sich drei Forschungseinrichtungen (JOANNEUM RESEARCH) sowie zwei KMUs (Combustion Bay One und Piezocryst) zusammengeschlossen. Sie verfügen über nachgewiesene und anerkannte Kapazitäten in den Bereichen additive Fertigung, Sensortechnologie, KI-basierte Entwicklung von digitaler Zwillingstechnologie und Konstruktion von Luftmotorbrennern sowie Labortests unter repräsentativen Anwendungsbedingungen.

Abstract

The imminent adoption of Hydrogen in transport systems will bring several challenges. Among the most relevant will be the increased burning temperature and much faster burning which can bring to a flash-back into the burner with catastrophic consequences. Therefore the Structural Health Monitoring (SHM) with a distributed network of sensors will be of high relevance to control these effects. Additionally, much higher content of NOx in the burned gases derived from the usage of H2 will be diminished only by the increase of the air/H2 premixing capacity. To this aim, exploring new designs and burner configurations will be essential. New advanced manufacturing technologies, such as Additive Manufacturing (AM), have already matured to substitute the conventional technologies for freeform, lightweight and more functional aircraft design. SHM emerged with the goal of reducing maintenance costs in aircraft structures by the implementation of automatic damage detection systems, able to detect incipient cracks well below the critical size, and nearly without human intervention. With an implementation of the SHM systems, based on remote, vicinity and embedded sensors, the inspections of structural integrity could be done almost continuously, either during flights or during overnight stops, without aircraft disassembly. This will be even more important in Hydrogen-based engines due to above mentioned challenges and to that aim sensorization of components is essential. The sensor embedding in aircraft components and the huge amount of data collected in the SHM can have a use far beyond the structural integrity control. The data collection in the SHM sets a foundation for an Artificial Intelligence (AI)-enabled digital double that represents the future of product development in many

fields, including aircraft design. Digital twins based on AI are likely to trigger a total product design transformation, which will boost efficiencies, speed up development and deliver better design options, which lead to much better performance. The embedded sensors collect much more critical data, with a higher precision, than the remote ones. It is easier in polymer composite aircraft parts, but much more difficult in metal components due to very high temperature and harsh environment. Therefore, new generations of sensors are necessary to collect data in such a harsh environment, without being damaged. crystA1r aims to develop and deploy a digital twin technology over the redesigned combustion burner, as the key element of the engine, based on 1) key parameters' data collection from the burner enabled by Piezocryst (embedded) and Fiber Optical Sensor (FOS) technology (placed in the vicinity) and 2) integrated Machine Learning (ML) approach over the collected data, to improve the Hydrogen burner performance towards safe and seamless flow operation with minimum impact on the environment .

To achieve this objective, it is needed to tackle and overcome the following challenges:

- a) Sensing of the combustion burner: implementation of an adequate sensor network (1-3 sensors) for SHM data collection, based on Piezocryst sensors embedded in the burner;
- b) Development of data collection strategies, including the selection of parameters and the positioning of the sensors, as well as the data handling and computing facilities, for Hydrogen combustion burner improvement in terms of: avoidance of flashback, improved maintenance and reduction of NOx by testing novel sensorized H2 burner designs made by AM technologies.
- c) Development of a hybrid digital twin based on an integrated component & combustion process modelling approach, driven by AI-based solutions (XAL), with an aim to perform unsupervised mixture and flame control in the existing burner design.

The digital architecture will be deployed over a redesigned burner, obtained using mathematics-to-shape strategies and by Additive Manufacturing, fully optimized for the combustion of Hydrogen.

For this collaborative project one three research entityies (JOANNEUM RESEARCH) as well as two SME (Combustion Bay One and Piezocryst) have joined their efforts. They have proven and recognized capacities in Additive Manufacturing, sensor technology, AI-based digital twin technology development and air engine burner design and laboratory testing in representative application conditions, respectively.

Endberichtkurzfassung

Within the crystA1r project, the consortium successfully redesigned and manufactured a new burner using advanced additive manufacturing technologies, enabling precise geometries and improved thermal robustness for hydrogen combustion. The complete sensor setup was validated, demonstrating reliable high-temperature operation up to 500 °C and consistent data acquisition throughout all tests. Comprehensive combustion experiments confirmed the effectiveness of the premixing concept and generated high-quality datasets that supported further model development and analysis.

Based on these data, the team made significant progress in predicting flashback events in hydrogen burners. This is a challenging task, because H2 combustion is very fast and requires extremely short reaction times for effective intervention in the case of upcoming critical operational states that could destroy the burner or the entire burner system. A key difficulty has been the high noise floor of the data, since the hydrogen flame itself is louder than the flashback event. Thus conventional anomaly detection techniques based on simple mean squared error (MSE) loss have proven as insufficient. To address this issue, the project-team developed a multi-step process where at first a novel, filter-based loss method has been introduced for unsupervised learning of a generic, compact representation of the normal combustion state solely derived

from pressure monitoring data. In a second step, the latent space vectors resulting from this process (i.e. the compressed state representation of the burner) are fed as input features into a regression pipeline consisting of a lightweight (thus fast), traditional machine learning model, namely XGBoost, which is modified for survival regression using a accelerated failure time (AFT) model. This makes the entire system capable of predicting flashbacks up to four seconds before they occur, and enables the timely initiation of countermeasures to avoid potential hazards.

Some of the outcomes of crystAIr were disseminated through a conference paper at ASME Turbo Expo 2024, USA, with additional final results prepared for publication as part of the ICPRAM 2026, ESP conference contribution, focusing on advanced event-prevention strategies for hydrogen combustion systems.

Projektkoordinator

- JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH

Projektpartner

- Combustion Bay One e.U.
- Piezocryst Advanced Sensorics GmbH