

INTEGRATION VON ANGEPASSTEN UND DEZENTRALEN STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEMEN IN FASERVERBUNDSTRUKTUREN

D. Schmidt¹, M. Moix-Bonet¹, S. Galiana^{1,2}, P. Wierach^{1,2}

¹Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Institut für Systemleichtbau, Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig, Deutschland

² Technische Universität Clausthal, Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik, Agricolastraße 6, 38678 Clausthal-Zellerfeld, Deutschland

Zusammenfassung

Es wird ein integriertes, modulares und dezentrales Structural Health Monitoring System (SHM) vorgestellt, das auf verschiedene Anwendungsszenarien von Flugzeugstrukturen angepasst werden kann. Mithilfe eines SHM-Systems lassen sich Flugzeugstrukturen im Betrieb auf Schadensereignisse und -fortschritt kontinuierlich überprüfen. Durch den Einsatz von SHM-Systemen kann die Verfügbarkeit von Luftfahrzeugen erhöht, Wartungskosten reduziert und ein erweitertes Leichtbaupotential von Faserverbundstrukturen erschlossen werden.

Keywords

Luftfahrt, Structural Health Monitoring, SHM, Lamb Waves, Piezokomposite, Funktionsintegration

1. EINFÜHRUNG

Mit Systemen zur integrierten Strukturüberwachung (engl.: Structural Health Monitoring - SHM) lassen sich Flugzeugstrukturen im Betrieb auf Schadensereignisse und -fortschritt kontinuierlich überprüfen. Dadurch können unerwartete Schadensereignisse bewertet und angepasste Wartungs- und Reparaturmaßnahmen abgeleitet werden, sodass die Verfügbarkeit von Luftfahrzeugen erhöht, Wartungskosten reduziert und ein erweitertes Leichtbaupotential von Faserverbundstrukturen erschlossen werden können.

Für SHM-Systeme existieren diverse technische Ansätze [1]. Ein auf geführten Ultraschallwellen, sogenannten Lambwellen, basierendes SHM-System ist ein vielversprechender Ansatz, da sich Lambwellen über große Bauteilbereiche ausbreiten und eine hohe Sensitivität gegenüber diversen Schäden besitzen. Anhand verschiedener Interaktionsmechanismen von Lambwellen mit Schäden lassen sich Rückschlüsse auf Schadensort, -art und -größe ziehen.

Zur Anregung und zum Empfang von Lambwellen werden piezokeramische Wandler eingesetzt, die permanent auf der zu überwachenden Struktur appliziert sind (siehe BILD 1). Weiterhin besteht das SHM-System aus elektronischen Komponenten zur Ansteuerung, Signalaufzeichnung und Signalanalyse sowie Algorithmen zur Schadensdetektion und -lokalisierung. Innerhalb des piezokeramischen Netzwerks werden Lambwellen an einem Ort angeregt und von den umliegenden Sensoren empfangen. Die Lambwellen interagieren an diversen Schadensarten (Delamination, De-Bonding usw.) mit unterschiedlichen Wellenphänomenen, wie bspw. Reflektion, Absorption, Streuung, Beugungen oder Konversion von Lambwellen-Moden. Die empfangenen Sensorsignale werden anschließend mit

Signalen, die zum Zeitpunkt eines schadensfreien Zustands der Struktur aufgezeichnet wurden, verglichen. Durch die Auswertung einzelner Signalanteile im Hinblick auf Amplitude, Laufzeit, Frequenz und/oder Energie kann ein Schaden detektiert und innerhalb des Netzwerks lokalisiert werden.

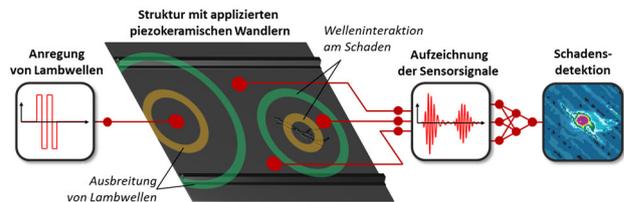


BILD 1: Funktionsweise eines SHM-Systems auf Basis von Lambwellen

Im Folgenden wird ein modulares und dezentrales SHM-Gesamtsystem vorgestellt, das auf verschiedene Anwendungsszenarien angepasst werden kann. Zentrales Element des SHM-Systems ist ein robustes SHM-Array. Das SHM-Array besteht aus integrierten piezokeramischen Wandlern, Temperatursensoren, elektrischen Leitungen sowie elektronischen Hardware-Komponenten. Durch die dezentrale Anordnung einzelner Elektronik-Komponenten des SHM-Systems kann der Installations- und Verkabelungsaufwand während des Assembly von Flugzeugstrukturen sowie das Systemgewicht reduziert werden. Anhand einer Airbus A350 Türumgebungsstruktur werden Integrations- und Installationsaspekte sowie verschiedene Systemarchitekturen diskutiert.

2. SHM-GESAMTSYSTEM

In vergangenen Projekten, wie z. B. das EU-Projekt SARISTU, wurden piezokeramische Wandler auf Faserverbundstrukturen appliziert und jeweils einzeln mit einer SHM-Hardware verkabelt [2]. Eine derartige Verkabelung ist beispielhaft im BILD 2 dargestellt.

Dementsprechend muss die SHM-Hardware eine hohe Anzahl an Anschlüssen bzw. Multiplexer-Kanälen aufweisen. Die hohe Anzahl an Kabeln führt zwangsläufig zu einem sehr hohen Verkabelungsaufwand und Gesamtgewicht des SHM-Systems. Derartige Verkabelungsaufwände sind in einer MCA (Major Component Assembly) und FAL (Final Assembly Line) von Flugzeugen nicht darstellbar, da diese Prozesse kaum automatisierbar und mit hohen Zeit- sowie Kostenaufwand verbunden sind. Weiterhin müssen bei der Kabelinstallation definierte Abstände zu anderen elektrischen Leitungen des Flugzeugsystems eingehalten werden, um Interferenzen zu vermeiden. Dies führt zwangsläufig zu größeren Systemträgern/-haltern, weshalb diese ein höheres Gewicht aufweisen. Ggf. muss auch die Flugzeugstruktur an den Orten der Systemhalter verstärkt werden, wodurch das Strukturgewicht ebenfalls steigt.

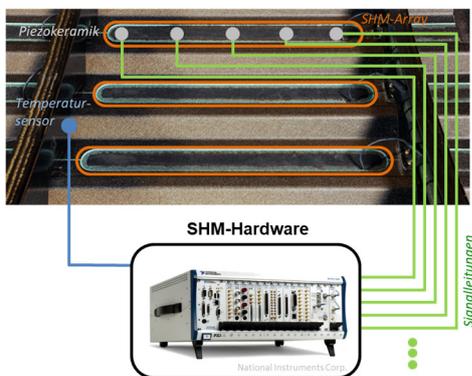


BILD 2: Standard-Architektur eines SHM-Gesamtsystems

Aus diesem Grund wurde eine dezentrale und modulare Architektur des SHM-Systems entwickelt, die sich auf verschiedene Anwendungsszenarios anpassen lässt und einen geringeren Installations- und Verkabelungsaufwand besitzt (siehe BILD 3). Das Architektur-Konzept basiert auf einem modularen SHM-Array und einer örtlichen Verteilung der einzelnen elektronischen Hardware-Komponenten des SHM-Systems. Einzelne Komponenten, wie Signalgenerator, Verstärker, Analog-Digital-Wandler, PC und Datenspeicher, sind in die zentrale SHM-Hardware integriert. Bei der SHM-Hardware handelt es sich um ein PXI-System von National Instruments. Die gesamte SHM-Hardware wird mithilfe der Software LabVIEW und verschiedenen Software-Modulen zur automatisierten Datenerfassung und -auswertung gesteuert.

Um zwischen einzelnen piezokeramischen Wandlern innerhalb des SHM-Netzwerks zu schalten, wird eine Multiplexer-Elektronik genutzt, die lokal auf jedem SHM-Array integriert ist. Durch den Multiplexer können bis zu 8 piezokeramische Wandler mit jeweils zwei analogen Signalleitungen (Koaxialkabel) verschaltet werden. Durch die Verwendung von zwei Signalleitungen können innerhalb eines Arrays Lambwellen ausgesendet und empfangen werden. Die Steuerung des Multiplexers erfolgt über einen integrierten Mikrokontroller und eine angeschlossene BUS-Leitung (RS485), die mit der SHM-Hardware verbunden ist. Weiterhin wird mit der lokalen Elektronik das Signal des in

dem SHM-Array integrierten Temperatursensors (PT100) digitalisiert. Der Temperaturwert kann anschließend über den BUS ausgelesen werden. Dadurch entfallen zusätzliche Kabel für die notwendige Temperaturmessung. Das Anschluss-Konzept basiert darauf, dass alle Multiplexer an einen zentralen Kabelbaum (Daisy-Chain Prinzip) angeschlossen werden können. Dadurch sinken der Verkabelungsaufwand und das Gewicht des Gesamtsystems. Der Kabelbaum, bestehend aus zwei Signalleitungen und einer BUS-Leitung inkl. Spannungsversorgung, kann für eine Zielanwendung von einem Zulieferer passgenau vorgefertigt werden, sodass in der MCA und FAL der Verkabelungsaufwand sinkt.

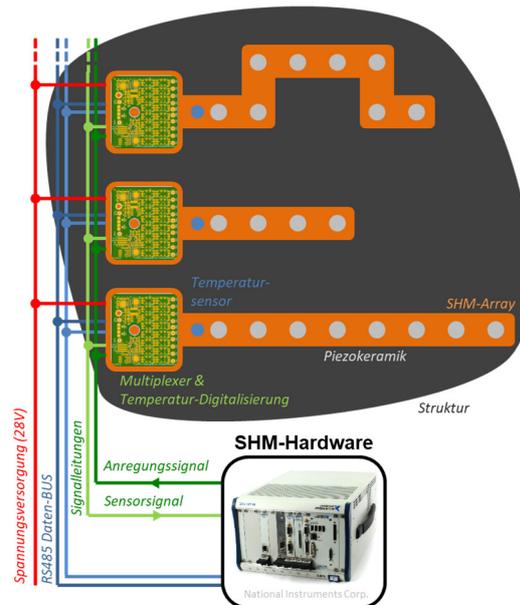


BILD 3: Architektur des dezentralen SHM-Gesamtsystems

Eine weitere Funktion des SHM-Gesamtsystems ist ein integrierter und automatisierter Selbsttest der piezokeramischen Wandler. Der Selbsttest basiert auf einer elektro-mechanischen Impedanzmessung, die mithilfe der SHM-Hardware (PXI-System) und einem angeschlossenen Referenz-Widerstand, durchgeführt wird [3]. Anhand der Impedanzmessung können in vordefinierten Zeitabschnitten die piezokeramischen Wandler auf Defekte, wie z. B. Risse, Brüche oder fehlerhafte elektrische Kontakte, im Betrieb überprüft werden.

3. MODULARES SHM-ARRAY

Das modulare SHM-Array basiert auf der Piezokomposite-Technologie (DuraAct™), die am DLR entwickelt wurde [4]. Hierbei werden die bruchempfindlichen Piezokeramiken in ein Epoxidharz eingebettet, wodurch die Keramik mit einer Druckvorspannung beaufschlagt wird und somit den im Betrieb auftretenden Zug- und Biegebeanspruchungen widerstehen kann. Die Druckvorspannung entsteht durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Keramik und des Epoxidharzes während dessen Aushärtung. Weiterhin sorgt die Einbettung für eine elektrische Isolierung der Piezokeramik und der elektrischen Leitungen. In [5] wurde nachgewiesen, dass diese Piezokomposite-Technologie eine hohe Robustheit aufweist und hohen statischen sowie dynamischen Lasten, wie sie im Betrieb von Flugzeugstrukturen auftreten, widerstehen

kann. Im folgendem BILD 4 ist ein beispielhaftes SHM-Array abgebildet.

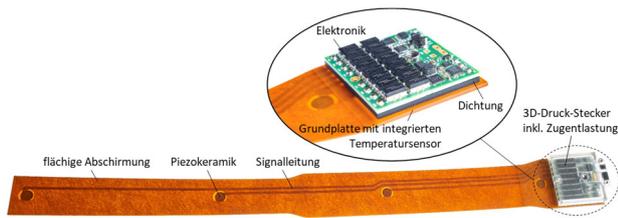


BILD 4: Modulares SHM-Array [6]

Das SHM-Array kann an die jeweilige Einbausituation des Anwendungsszenarios sowie an die technischen Randbedingungen des SHM-Systems angepasst werden [6]. Im vorliegenden Fall wurden runde Piezokeramiken (ø10 mm, Dicke: 0,2 mm) im Abstand von 150 mm zueinander eingebettet. Das SHM-Array besitzt im Bereich der Piezokeramiken eine Gesamtdicke von 0,5 mm, wodurch es eine hohe Flexibilität aufweist und auch auf stark gekrümmten Strukturen appliziert werden kann.

Für die elektrischen Leitungen wurde ein flächiges Kupfer-Vlies verwendet. Auf der Oberseite des Arrays befindet sich eine flächige Lage des Kupfer-Vlieses, die als Erdung und zur Abschirmung der darunterliegenden Signalleitungen dient. Indem die Signalleitung zwischen der flächigen Abschirmung (Oberseite) und der geerdeten Flugzeugstruktur (Unterseite) geführt wird, kann eine vergleichbare Abschirmung der Signalleitung – ähnlich wie bei einem Koaxialkabel – erzielt werden (siehe BILD 5). Dadurch wird die Signalleitung vor im Flugbetrieb auftretenden Störsignalen abgeschirmt. Gleichzeitig werden potentielle EMV-Störungen (elektro-magnetische Verträglichkeit), die vom SHM-System ausgehen könnten, reduziert. Derartige Maßnahmen zur Schirmung können im Zulassungsprozess dazu beitragen, dass die Anforderungen an ein integriertes SHM-System erfüllt werden.

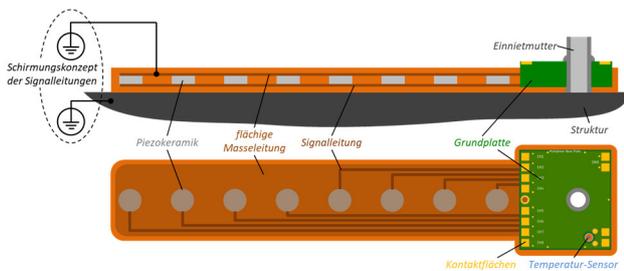


BILD 5: Schematischer Aufbau des SHM-Arrays

Die Signalleitungen wie auch die Abschirmung werden auf eine Grundplatte geführt, die als Anschlussplatine für die Multiplexer-Elektronik dient. In die Grundplatte ist ein Temperatursensor (mikrotechnisches PT100-Element) eingeklebt. Das SHM-Array (ohne Elektronik) ist derart konzipiert, dass es als Halbzeug in typische Fertigungsprozesse (180°C, 7bar) und Vakuumaufbauten von Faserverbundstrukturen integriert werden kann. Die elektrische Verbindung zwischen Grundplatte und Multiplexer-Elektronik ist über Federkontakte realisiert, die in die Elektronik-Platine integriert sind. Die Federkontakte können geringe Unebenheiten der Grundplatte, die bspw. durch die Applikation auf gekrümmten Strukturen zustande kommen, ausgleichen. Außerdem gewährleisten die Federkontakte, dass die Elektronik-Platine mechanisch von der

Grundplatte und der damit verbundenen Flugzeugstruktur entkoppelt ist. Somit werden die im Betrieb auftretenden Dehnungen der Struktur nicht auf die Elektronik übertragen. Derartige Ansätze und Konzepte zur Entkopplung von Struktur- und Systemkomponenten sind wertvoll, um die Anzahl an Anforderungen an das SHM-System zu senken. Dies führt schließlich zu reduzierten Systemkosten und einem vereinfachten Zulassungsprozess.

Da das SHM-Array auf die Innenseite der Primärstruktur appliziert wird, kann im Flugzeugbetrieb Kondensationsfeuchtigkeit auftreten und potenziell zu einem Kurzschluss führen. Aus diesem Grund wird zwischen Grundplatte und Multiplexer-Elektronik eine flächige und nachgiebige Dichtung appliziert, welche die Federkontakte nach außen und untereinander abdichtet. Außerdem ist die Elektronik zum Schutz vor Feuchtigkeit mit einem Schutzlack überzogen. Die Elektronik-Platine ist in ein Steckergehäuse, welches im 3D-Druckverfahren hergestellt wurde, integriert. Das Gehäuse verfügt über eine Zugentlastung für die Kabel, die von der Elektronik zum Kabelbaum geführt werden. Für den späteren Verkabelungsprozess ist vorgesehen, dass an einem vorgefertigten Kabelbaum die Gehäuse mit integrierter Elektronik und flächiger Dichtung bereits vorinstalliert sind. Somit muss nur der Stecker mit dem zuvor applizierten SHM-Arrays verschraubt werden (siehe BILD 6). Die Verschraubung geschieht über eine Einnietmutter, die in der Grundplatte vorinstalliert ist. Durch diesen vereinfachten Assembly-Prozess sinken der Verkabelungsaufwand und die Kosten. Das Gehäuse inkl. Dichtung und SHM-Array hat eine max. Höhe von 12 mm. Durch die geringe Bauhöhe sollen Störungen bzw. Beschädigungen des SHM-Arrays in der MCA, FAL oder im Betrieb minimiert werden.

4. INTEGRATION IN EINE TÜRUMGEBUNGS-STRUKTUR

Das SHM-Array kann sowohl in den Fertigungsprozess der Faserverbundstruktur (Co-Bonding) als auch nachträglich mit einem Klebprozess (Secondary Bonding) auf die Struktur appliziert werden. Die Integration in den Fertigungsprozess der Faserverbundstruktur ist weitaus effizienter und kostengünstiger, da der Klebprozess zusätzliche Schritte, wie Anschleifen, Reinigen, Applikation des Klebefilms und Vakuumaufbau, bedingt. Das SHM-Array kann man auf nicht ausgehärtetes Prepreg oder auf trockene Faserhalbzeuge, die injiziert werden, applizieren. Der Applikationsprozess kann für eine spätere Serienfertigung auch automatisiert werden. Dazu können die einzelnen SHM-Arrays mit einem Roboter (Pick-and-Place) aufgenommen und auf der Struktur exakt abgelegt werden. Grundsätzlich wird der Applikationsprozess des SHM-Arrays entsprechend BILD 6 durchgeführt.

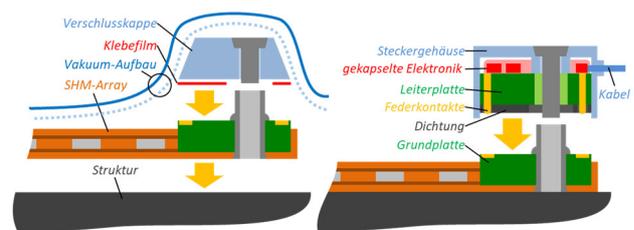


BILD 6: Prozess zur Applikation (links) und Assembly (rechts) des SHM-Arrays

Die Grundplatte des SHM-Arrays wird mit einem Klebe-

band/-film bedeckt, um die elektrischen Kontakte vor einer Kontamination mit Epoxidharz zu schützen. Auf die Grundplatte wird eine Verschlusskappe geschraubt, die trennende Eigenschaften besitzt und z. B. aus PTFE (Polytetrafluorethylen) gefertigt ist. Die Verschlusskappe besitzt stark abgeschrägte Kanten, wodurch der Vakuumaufbau vereinfacht werden soll. Die Applikation des SHM-Arrays kann z. B. auf nicht ausgehärtetes Prepreg erfolgen, sodass das Array direkt in den Vakuumaufbau der Struktur integriert ist. Die Anbindung des Arrays an die Struktur erfolgt während der Aushärtung (Co-Bonding) in bspw. einem Autoklav-Prozess. Im vorliegenden Fall wurde die Türumgebungsstruktur (Airbus A350) bereits in dem vorhergehenden EU-Projekt MAAXIMUS gefertigt. Aus diesem Grund wurden die Arrays nachträglich in einem Vakuumaufbau mithilfe eines Epoxid-Klebstoff appliziert. Diese Tätigkeit wurde von dem Projektpartner INVENT GmbH durchgeführt. Nach der Aushärtung der Struktur bzw. des Klebefilms werden die Verschlusskappe und der Klebefilm von der Grundplatte des SHM-Arrays entfernt. Anschließend wird der vorgefertigte Kabelbaum installiert und die daran befindlichen Steckergehäuse mit integrierter Elektronik und Dichtung auf die Grundplatte geschraubt. Die mit SHM-Arrays ausgerüstete Türumgebungsstruktur ist in BILD 7 dargestellt. Am Beispiel der Türumgebungsstruktur ist zu sehen, dass sich das modulare SHM-Arrays in seiner Form und Konfiguration an die jeweilige Einbausituation und den verfügbaren Bauraum flexibel anpassen lässt.

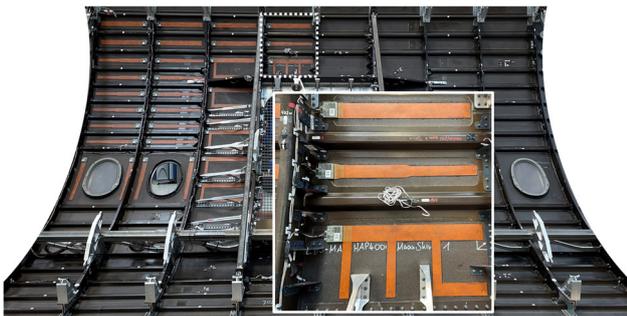


BILD 7: Türumgebungsstruktur mit installierten SHM-Arrays

Die Türumgebungsstruktur wurde bei der IMA GmbH unter verschiedenen Arten von repräsentativen Fluglasten mechanisch getestet [7]. Innerhalb der Tests kam es zu keinerlei Ausfällen bzw. Defekten der SHM-Arrays. Alle piezokeramischen Wandler, Elektronik-Module sowie elektrischen Anschlüsse und Leitungen waren voll funktionsfähig nach Abschluss der Tests.

Im Folgenden wird das Gewicht von Wandlern und Kabeln eines SHM-Systems in verschiedenen Konfigurationen abgeschätzt. Hierbei wird ein SHM-System in einer Standard-Konfiguration, bei dem alle piezokeramischen Wandler durch Koaxialkabel mit der SHM-Hardware verbunden sind, verglichen mit der Multiplexer-Konfiguration, bei der die SHM-Arrays genutzt werden (siehe Kapitel 2). Für die Gewichtsabschätzung wird eine typische Airbus A350 Rumpfstruktur angenommen, bei der 3 Spant-Felder und 10 Stringer-Felder mit piezokeramischen Wandlern ausgerüstet sind. Wie in BILD 8 dargestellt, wird jedes Spant-Stringer-Feld mit jeweils 4 piezokeramischen Wandlern ausgestattet. Die Piezokeramiken haben einen typischen Abstand von 150 mm zueinander. Es wird angenommen, dass die SHM-Hardware 3 m von der zu überwachenden Struktur

entfernt ist. In der Standard-Konfiguration werden Piezokomposite (DuraAct™) der Fa. PI Ceramics GmbH genutzt, die über eine runde Piezokeramik (ø10 mm, Dicke: 0,2 mm) verfügen. Die Piezokeramiken sind jeweils durch ein Koaxialkabel (RG178) mit der SHM-Hardware verbunden. Die Koaxialkabel sind entlang der Spante auf direktem Weg zur SHM-Hardware verlegt.

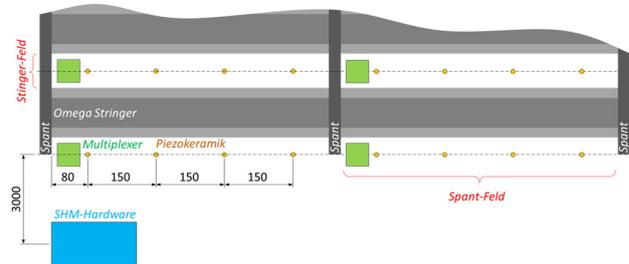


BILD 8: Konfiguration und Abmessungen des SHM-Netzwerks (Angaben in mm)

Im Gegensatz dazu setzt sich die Multiplexer-Konfiguration aus den in Kapitel 3 beschriebenen SHM-Arrays zusammen. Jeder Multiplexer ist mit einem durchgehenden BUS-Kabel und zwei Koaxialkabeln (Daisy-Chain Prinzip) verbunden. Wie in BILD 3 dargestellt, muss jeder Multiplexer durch T-Stücke (SMA-Steckverbindung) mit den zwei Koaxialkabeln (RG178) verbunden werden. Die BUS-Leitung wird vorkonfektioniert, sodass hierbei keine T-Stücke notwendig sind. Für die BUS-Leitung ist ein 4-adriges (Twisted Pair) Kabel vorgesehen. Hierbei werden zwei Adern zur Kommunikation des RS485-BUS und zwei weitere Adern zur Spannungsversorgung der Multiplexer genutzt. Alle Kabel sind entlang der Spante verlegt. In der folgenden TABELLE 1 sind die Gewichte der Einzelkomponenten zusammengefasst.

Komponente	Gewicht
Piezokeramischer Wandler (DuraAct™)	2.5 g
SHM-Array	68.1 g
T-Stück für Koaxialkabel	14.3 g
Koaxialkabel (RG178)	9.3 g/m
BUS-Kabel (4-adrig)	27.2 g/m

TABELLE 1: Gewichte der einzelnen Komponenten des SHM-Systems

Die folgende TABELLE 2 zeigt die Kabellängen und Gewichte der Einzelkomponenten.

	Standard	Multiplexer
Anzahl - Piezokeramiken	120 Stück	120 Stück
Anzahl - Multiplexer	0 Stück	30 Stück
Länge - Koaxialkabel	572.6 m	18.5 m
Länge - BUS-Kabel	0.0 m	9.2 m
Gewicht - Kabel	5.3 kg	1.3 kg
Gewicht - Wandler/Arrays	0.3 kg	2.0 kg
Gewicht - Gesamt	5.6 kg	3.3 kg

TABELLE 2: Kabellängen und Gewichte für verschiedene Konfigurationen des SHM-Systems

Es zeigt sich, dass das Gewicht der Multiplexer-Konfiguration gegenüber der Standard-Konfiguration um ca. 40% reduziert werden kann. Dies ist auf die hohe Einsparung an Kabeln zurückzuführen. Gleichzeitig wird die Anzahl der

Komponenten (Multiplexer-Module) der zentralen SHM-Hardware reduziert. Dieser Aspekt ist jedoch in der Kalkulation nicht berücksichtigt. Für die SHM-Hardware können kleinere Chassis des PXI-Systems ausgewählt werden, da weniger Komponenten installiert werden müssen, wodurch das Gewicht weiter sinkt. Die Multiplexer der SHM-Arrays sind zudem für 8 piezokeramische Wandler ausgelegt. Im vorliegenden Fall werden jedoch nur jeweils 4 Wandler pro Array benötigt. Insofern kann auch das Gewicht des SHM-Arrays weiter reduziert werden, wenn die Multiplexer-Elektronik exakt auf die Anzahl der Wandler in einem SHM-Array ausgelegt ist. Außerdem wurden die Sensoren und Kabel für die Temperaturmessung in der Standard-Konfiguration nicht berücksichtigt. Bei der Multiplexer-Konfiguration ist die Temperaturmessung bereits integriert (siehe Kapitel 2). Grundsätzlich stehen die Kabellängen und die Anzahl an Anschlüssen im direkten Zusammenhang mit dem Installationsaufwand. Da die Kabellängen bei der Standard-Konfiguration um ein Vielfaches höher sind, wird auch der Installationsaufwand wesentlich höher ausfallen. Zudem müssen auch die Systemhalter größer ausgeführt werden, wenn die Kabelanzahl steigt. Dies führt wiederum zu höherem Gewicht der Systemhalter sowie der Substruktur, an der die Halter appliziert sind.

Darüber hinaus ist hervorzuheben, dass mit zunehmender Größe der zu überwachenden Struktur die Gewichtseinsparung bei der Multiplexer-Konfiguration gegenüber der Standard-Konfiguration zunimmt.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Am Beispiel einer Airbus A350 Türumgebungsstruktur wurde ein modulares und dezentrales SHM-Gesamtsystem beschrieben. Zentrales Element des SHM-Systems ist ein robustes SHM-Array, das aus integrierten piezokeramischen Wandlern, Temperatursensoren, elektrischen Leitungen sowie elektronischen Hardware-Komponenten besteht. Es wurden die Vorteile dieser System-Architektur im Hinblick auf Applikations- und Assembly-Prozess diskutiert sowie die dadurch erzielbaren Gewichtseinsparung dargestellt. Es zeigt sich, dass durch eine geeignete Wahl der Systemarchitektur das Gesamtgewicht des SHM-Systems wesentlich reduziert werden kann. Weiteres Potential zur Gewichtsreduktion kann erschlossen werden, wenn z. B. die Analog-Digital-Wandler oder die Signalanregung dezentral angeordnet werden.

6. DANKSAGUNG

Die vorgestellten Ergebnisse wurden in einem Förderprojekt erzielt, das im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms durchgeführt wurde. Wir bedanken uns bei allen beteiligten Projektpartnern Wölfel Engineering GmbH & Co. KG, INVENT GmbH, IMA GmbH und der Universität Siegen für die erfolgreiche Kooperation sowie beim Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz und beim Projektträger des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt für die Bereitstellung der Fördermittel (Förderkennzeichen: 20Q1725D). Weiterhin möchten wir uns bei der Airbus Operations GmbH für die Bereitstellung der Türumgebungsstruktur aus dem EU-Projekt MAAXIMUS (Grant agreement ID: 213371) bedanken.

Kontaktadresse:

E-Mail: daniel.schmidt@dlr.de

7. LITERATUR

- [1] Boller C., Chang F.-K., Fujino Y., "Encyclopedia of structural health monitoring – Volume 1", Wiley & Sons, January 2009
- [2] Schmidt D. et al.: Development of a Door Surround Structure with Integrated Structural Health Monitoring System, Smart Intelligent Aircraft Structures (SARISTU) - Proceedings of the Final Project Conference, S. 935-945, 2016
- [3] Müller I.: Inspection of piezoelectric transducers used for structural health monitoring systems, Dissertation, Universität Siegen, 2017
- [4] Wierach, P.: Elektromechanisches Funktionsmodul, Deutsches Patent DE - 100 51 784, erteilt August 2002
- [5] Moix-Bonet M., Wierach P., Büthe I., Fritzen C.-P., Bach M.: Durability of Co-bonded Piezoelectric Transducers, 2nd International Conference on System-Integrated Intelligence: Challenges for Product and Production Engineering, July 2014, Bremen, Germany
- [6] Schmidt D., Trampe L., Wierach P.: Piezoelektrisches Funktionsnetzwerk, Deutsches Patent DE102020113700A1, erteilt November 2021
- [7] Moix-Bonet M., Schmidt D., Wierach P.: Guided Wave-based Structural Health Monitoring for a Composite Aircraft Fuselage under Mechanical Load, European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT), Portugal, July 2023