

ZUSTANDSÜBERWACHUNG VON LUFTFAHRTRELEVANTEN TRAGSTRUKTUREN AUS KOHLEFASERVERSTÄRKTEM KUNSTSTOFF MITTELS AKUSTISCHER PLATTENWELLEN

D. Hentschel (Vortragender), B. Frankenstein, F. Schubert, L. Schubert
Fraunhofer Institut Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP-D
Maria-Reiche-Str.2
D-01109 Dresden

Zusammenfassung

In Flugzeugen der nächsten Generation, die zum Großteil aus faserverstärkten Kunststoffen bestehen werden, ist wegen der eingeschränkten Prüfbarkeit dieser Materialien mit zerstörungsfreien Methoden die permanente Zustandsüberwachung wünschenswert, wenn nicht gar notwendig. Dieses Monitoring wird effektiv und sensitiv durch den Einsatz aktiver akustischer Signaturanalyse von akustischen Plattenwellen und durch Schallemissionsverfahren ermöglicht. In dem vorliegenden Papier werden Verfahren, Sensorik und Auswertelektronik eines Systems zur Zustandsüberwachung von luftfahrtrelevanten Tragstrukturen vorgestellt.

1. EINLEITUNG, MOTIVATION

Das Wachstum des Luftverkehrs stellt an die Industrie zunehmende Anforderungen, Flugzeuge kostengünstiger herzustellen und gleichzeitig Effizienz, Umweltfreundlichkeit und Sicherheit zu gewährleisten. Aktuell ist in diesem Zusammenhang der verstärkte Einsatz von Faserverbundwerkstoffen. Der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen, hauptsächlich Kohlenstoff-Faser verstärkter Kunststoff (CFK, CFRP), in der Luftfahrt bringt Vorteile wie verbesserte Designmöglichkeiten sowie Gewichtsersparnis und niedrigere Betriebskosten mit sich.

Damit einhergehend sind völlig neue Anforderungen auf dem Gebiet der Wartung und zerstörungsfreier Prüfung zu erwarten, vor allem dadurch, dass sich die Fehlerprognose in den Faserverbundwerkstoffen wesentlich komplizierter als bei dem Risswachstum in metallischen Werkstoffen darstellt. Risse in metallischen Werkstoffen wachsen im Allgemeinen kontinuierlich; aus ihrer Lage und Größe kann die Lebensdauer des Konstruktionselementes abgeschätzt werden. Schädigungen in Verbundwerkstoffen wie CFK bleiben jedoch zunächst oft unentdeckt und führen unter Umständen zum totalen Versagen der Struktur.

Eine automatisierte Zustandsüberwachung der aus Verbundwerkstoffen bestehenden Luftfahrt-Tragstrukturen erscheint aus diesem Grund zwingend notwendig. Bisherige Systeme, die mit Reißdrähten oder Vakuumröhren arbeiten, liefern nur ungenaue Angaben und das auch nur über drastische Belastungen in der Struktur. Detaillierte Angaben über den Materialzustand sind nicht zu erhalten.

Anisotropie, Inhomogenität und nicht genau beschreibbare elektrische Leitfähigkeit sind Eigenschaften der CFK-Werkstoffe, die die klassische zerstörungsfreie Prüfung (ZFP) vor Herausforderungen stellen. Eine Vielzahl etablierter Prüfverfahren wie Wirbelstrom und magnetische Verfahren scheiden damit aus. Die klassische Röntgentechnik kommt wegen zu geringer Kontrastunterschiede ebenfalls nicht infrage. Die detaillierte Untersuchung des inneren Materialzustandes von CFK kann sensitiv nur mit akustischen Methoden erfolgen.

In den nachfolgenden Ausführungen soll zunächst das zum Einsatz kommende akustische Verfahren näher erläutert werden. Fragen der akustischen Sensorik sowie der zugehörigen Auswertelektronik werden in den nächsten Abschnitten erörtert. Laborversuche und erste praktische Anwendungen werden illustriert, ein Ausblick auf zukünftige integrierbare Sensornetze wird gegeben.

2. AKUSTISCHE VERFAHREN ZUR ZUSTANDSÜBERWACHUNG

2.1. Passive Verfahren

Das passive Schallemissionsverfahren (engl.: Acoustic Emission, AE) nutzt die von einer Fehlstelle unter Belastung erzeugten Schallemissionen, die von auf der Struktur applizierten Wandlern detektiert werden. Das Auswertesystem im Sensorknoten wertet die Zeitsignale

bezüglich Schalllaufzeiten, Signalenergie und anderer Signalparameter aus. Aus den erfassten Zeitsignalen ist die Bestimmung der Schalllaufzeiten zum Quellort und damit die Ortung der Schallquelle möglich. Bild1 illustriert das Schallemissionsverfahren am Beispiel eines Flügels unter Last.

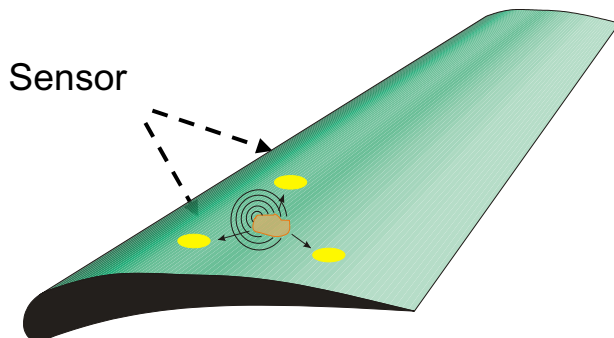


BILD 1. Passives Schallemissionsverfahren

2.2. Aktive Verfahren

Bei dem akustischen Signaturanalyseverfahren handelt es sich um ein aktives Ultraschallverfahren, bei dem der „Gut“-Zustand des Prüflings und anschließend nach bestimmten Belastungszyklen der „Ist“-Zustand bestimmt wird. Dazu werden in das Überwachungsobjekt durch einen als Aktor fungierenden Wandler Ultraschallwellen eingebracht. Diese akustischen Plattenwellen durchlaufen den Prüfling und interagieren je nach Wellenlänge und Wellenmode mit der Fehlstelle. Sie werden von den als Sensoren fungierenden Ultraschallwandlern empfangen. Ein Auswertesystem im Sensorknoten vergleicht die Zustände und ermöglicht somit eine Aussage über Veränderungen und unter bestimmten Bedingungen auch über Lage, Typ und Umfang der Fehler. Bild 2 zeigt dieses aktive akustische Verfahren anhand dreier Aktoren/Sensoren: Einer der drei Prüfköpfe sendet definierte akustische Plattenwellen aus, die mit einer Fehlstelle im Material wechselwirken. Die anderen beiden Prüfköpfe empfangen die resultierenden Plattenwellen und können Rückschlüsse auf Art, Größe und Lage der Fehlstelle ziehen.

Sensor / Aktuator

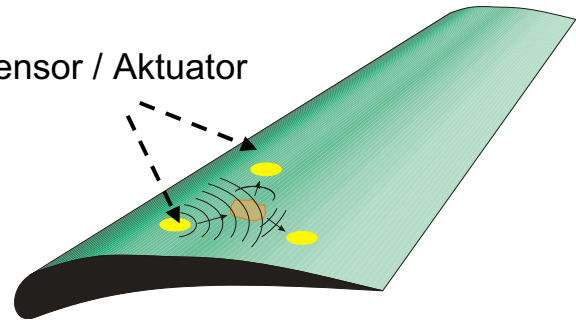


BILD 2. Akustisches Signaturanalyse-Verfahren

Im anglo-amerikanischen Sprachraum hat sich für ähnliche Verfahren der Name „Acousto Ultrasonic“ eingebürgert. Die Sensitivität und Fernwirkung dieses Verfahrens wird im Bild 3 demonstriert: Bild 3 zeigt die Wechselwirkung einer akustischen Plattenwelle mit einem künstlich eingebrachten Fehler auf einer ebenen Platte mit den Abmessungen 500mm*500mm. Die Plattenwelle geht von einem Aktuator aus, der sich in der Mitte der unteren Kante der Platte befindet. Die so erzeugte Plattenwelle interagiert mit einer in der Mitte der Platte angebrachten Flachbodenbohrung. Durch Modenkonversion entstehen an der Fehlstelle akustische Plattenwellen sehr hoher Amplitude. (Im Bild 3 werden die Amplituden in Falschfarben dargestellt; unmittelbar in der Fehlstelle entstehen die höchsten gemessenen Amplituden.)

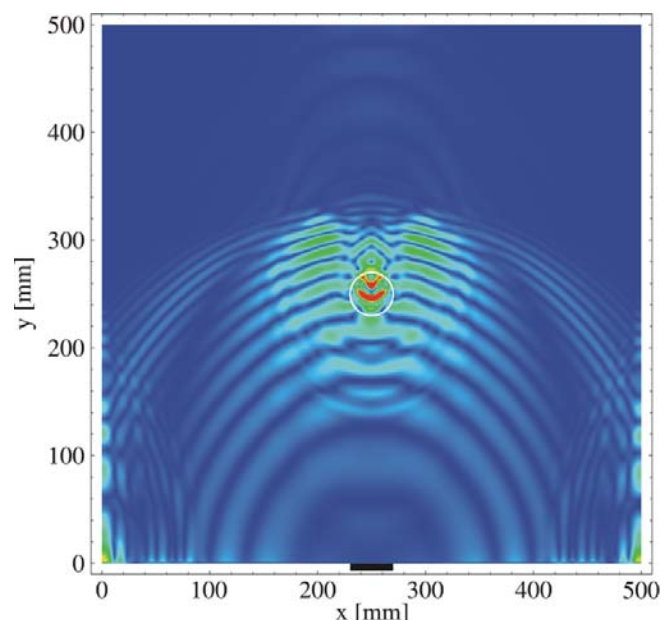


BILD 3. Wechselwirkung akustischer Plattenwellen mit einem künstlich eingebrachten Fehler

2.3. Tomographische Verfahren

Werden um eine zu überwachende Fläche mehrere sowohl als Sensoren als auch als Aktoren betreibbare Prüfköpfe installiert, können auch tomographische Verfahren Anwendung finden. Dazu muss eine Gruppe von Prüfköpfen an einer Seite der Fläche eine gezielte Plattenwelle erzeugen. Dies geschieht dadurch, dass die Aktoren gegeneinander phasenverschoben angesteuert werden. Dadurch kann die entstehende Schallkeule auf elektronischem Wege geschwenkt und/oder fokussiert werden. (Das Prinzip ist aus der Radartechnik und der Ultraschallprüfung mit Volumenwellen als „Phased-Array-Prinzip“ bekannt.) Die anderen um die zu prüfende Fläche gruppierten Prüfköpfe fungieren als Sensoren und empfangen die resultierenden akustischen Plattenwellen. Diese „Ausleuchtung“ der Fehlstelle erfolgt sequentiell von allen vier Seiten, so dass der Fehler komplett in seiner Lage und Form bestimmt werden kann. Bild 4 zeigt die bildgebende Rekonstruktion einer wachsenden Fehlstelle mit den in IZFP-D vorgehaltenen tomographischen Methoden.

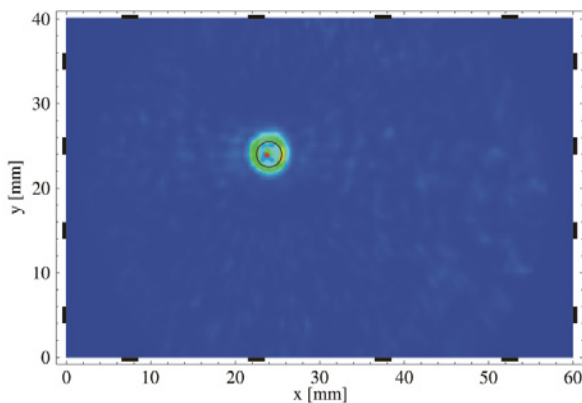


BILD 4.
Bildgebende Rekonstruktion eines Schadens bei räumlich verteilten Wandlerelementen, basierend auf dem Vergleich zwischen aktuellem Zustand und einem Referenzzustand mit geringerer Fehlerausdehnung. Die Vergrößerung des Schadens von 2 auf 3 mm (schwarzer Kreis) führt zu einer korrekten Abbildung von dessen Lage und Form.

3. SENSORIK

Die verwendeten sensorischen Elemente sind Piezofasern von ca. 100µm Dicke. Damit können sehr dünne Komplettsensoren aufgebaut werden, die unter Umständen auch in die zu überwachende Struktur integriert werden können, ohne deren mechanische Eigenschaften nennenswert zu beeinflussen. Ein weiterer Vorteil diese Sensoren besteht in ihrer Richtwirkung: Die Fasern sind naturgemäß in ihrer Längsrichtung am sensitivsten für mechanische Dehnungen und Streckungen.

Die verwendeten Piezo-Faserwandler bestehen im Wesentlichen aus einem Bündel von Piezofasern (im Bild 5 gelb dargestellt) und einer kammförmigen Elektrode (in

Bild 5 blau dargestellt), die die aufgrund des piezoelektrischen Effekts entstehenden elektrischen Ladungen abgreifen.

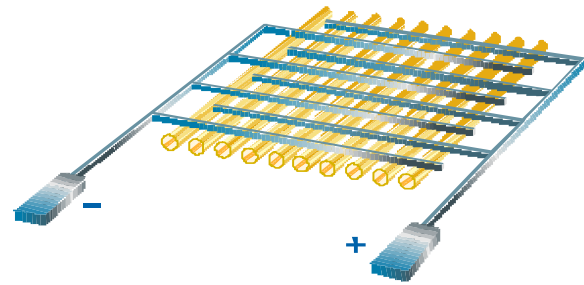


BILD 5. Piezo-Fasern mit kammförmiger Elektrodenstruktur

Die elektrischen Ladungen entstehen auf den Piezofasern durch mechanische Stauchung oder Streckung, wie im nachfolgenden Bild 6 illustriert wird.

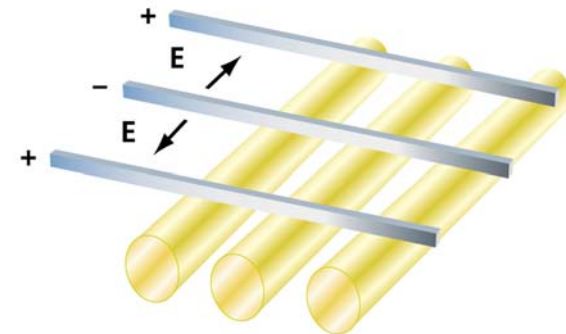


BILD 6. Abgriff elektrischer Ladungen am Piezo-Faserwandler

Wie das nachfolgende Bild 7 zeigt, können die Piezo-Faserwandler sehr dünn und flexibel aufgebaut werden. Sie können damit nicht nur auf die zu untersuchenden Strukturen aufgebracht, sondern auch in die Strukturen selbst integriert werden.

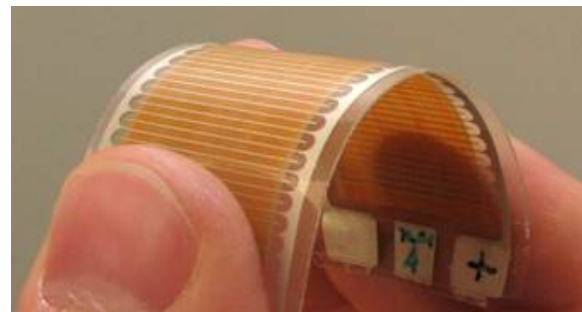


BILD 7. Piezo-Faserwandler mit Elektrodenstruktur zur Erzeugung und zum Empfang geführter Ultraschallwellen.

Die an den Piezofaserwandlern entstehenden elektrischen Signale sind unter Umständen sehr schwach. Sie können aus diesem Grund nicht über lange Zuleitungen geführt werden. Um diesen Nachteil zu umgehen, wurden in Instituten der Fraunhofer Gesellschaft bereits Sensoren mit integrierter Elektronik entwickelt und realisiert. Bild 8 zeigt ein solches System, das im IZFP-D entwickelt wurde. Wandler und Elektronik sind komplett vergossen und damit auch in rauer Umgebung einsetzbar.

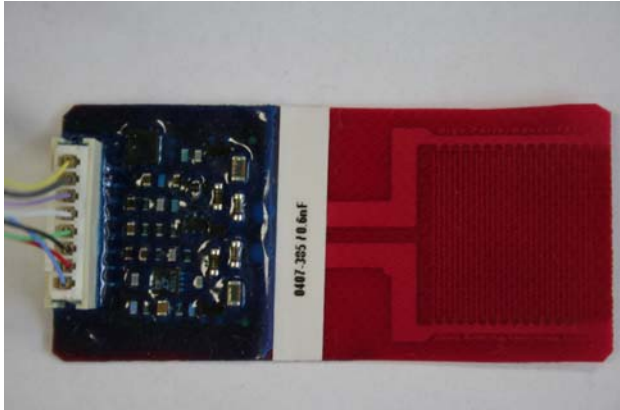


BILD 8. Piezo-Faserwandler mit integrierter Auswerteelektronik

4. AUSWERTEELEKTRONIK

Die in Bild 8 gezeigte, direkt am Wandler angebrachte elektronische Baugruppe verstärkt und filtert die Sensorsignale lediglich analog. Die so konditionierten Signale werden über Kabel weitergeleitet. Eine Auswerteelektronik muss aber viel mehr leisten: Die Signale müssen digitalisiert und rechentechnisch bewertet werden. Im Idealfall findet diese Signal-Auswertung bereits in unmittelbarer Sensornähe statt. Im IZFP-D wurde aus diesem Grund eine miniaturisierte Auswerteelektronik entwickelt und gemeinsam mit dem Projektpartner RHe Microsystems realisiert.

Bild 9 zeigt das Blockschema der realisierten sensornahen Auswerteelektronik. Unmittelbar nach dem am Testobjekt angebrachten Piezowandler (der als Faserwandler ausgeführt werden kann und der sowohl sensorisch als auch aktuatorisch wirken kann), schließt sich das Sensor-Interface an. Diese Baugruppe führt die elektrische Anpassung an die Piezosensorik aus und verstärkt und filtert die ankommenden elektrischen Signale. Eine zweite Baugruppe erzeugt die Leistungssignale für den Aktuator. Die konditionierten Sensorsignale werden digitalisiert und in einem digitalen Signalprozessor verarbeitet. Die Berechnungsergebnisse werden intern abgespeichert und können über diverse digitale Interfaces abgerufen werden. Als Standard-Interface wird der CAN-Bus verwendet, die Stromversorgung geschieht über eine Rohspannung, die zwischen 9V und 28V betragen kann.

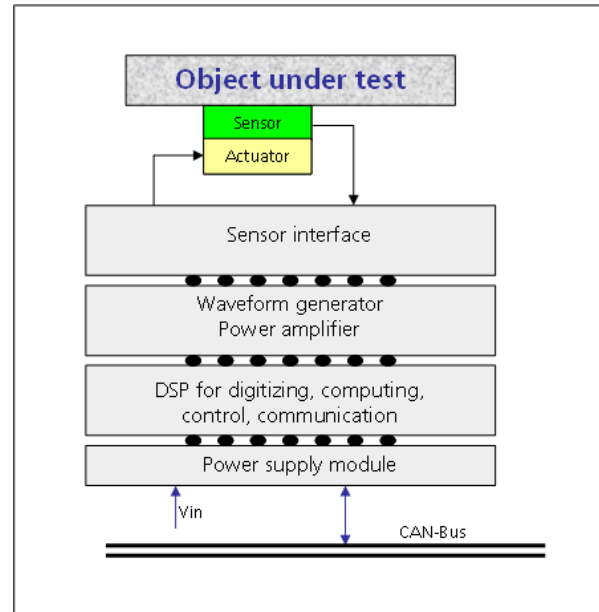


BILD 9. Blockschema der sensornahen Auswerteelektronik

Bild 10 illustriert den mechanischen Aufbau der sensornahen Elektronik: Die einzelnen Baugruppen werden üblicherweise übereinander gestapelt; die elektrischen Verbindungen zwischen den Baugruppen geschehen über den Rahmen. Die gesamte Elektronik kann wie ein integrierter Schaltkreis mittels BGA (ball grid array) auf eine Leiterplatte aufgesetzt werden.

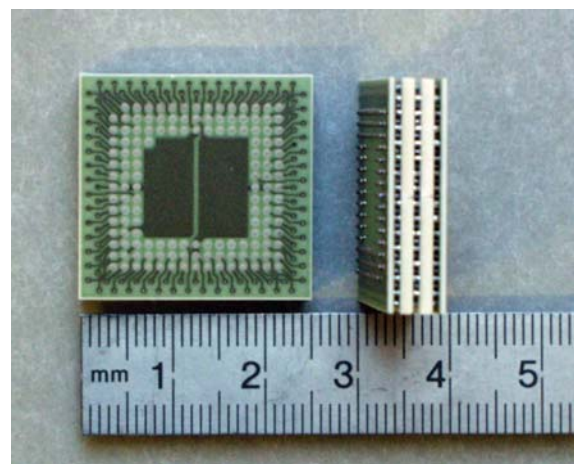


BILD 10. Mechanische Abmessungen der sensornahen Auswerteelektronik

Die zentrale Baugruppe der sensornahen Elektronik ist der DSP-Modul („Digitaler Signalprozessor“) mit folgenden technischen Eigenschaften, die einem kompletten spezialisierten Computer entsprechen:

- 32Bit fixed point DSP
- Clock PLL at frequencies of 15-150 MHz
- Processing power of 400 MIP's

- 16 channel 12Bit ADC with sample rate of 12.5 MSamples/s
- Flash memory of 128kWords
- RAM of 18kWords internal, 1MWords external
- Interfaces: CAN, SPI, SCI, PWM, GPIO, IRQ, 1Wire, I2C
- Modes: Idle, Standby, HALT
- Timer: Watchdog, three general purpose 32Bit timer

Die folgenden zwei Bilder zeigen die Vorder- und die Rückseite des DSP-Moduls: Auf der Vorderseite befindet sich der Datenspeicher, auf der Rückseite der Chip des digitalen Signalprozessors mit der notwendigen Zusatzbeschaltung für Taktung, Resetlogik etc.

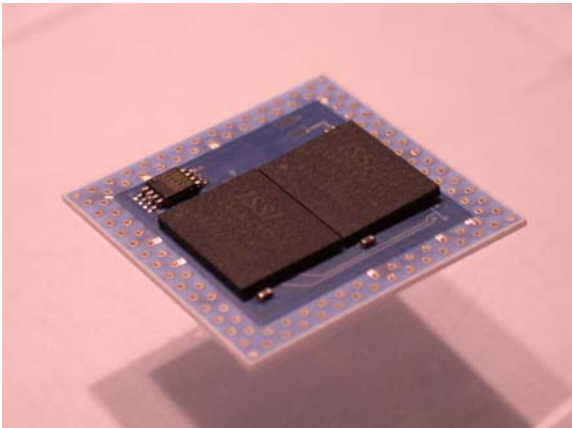


BILD 11. Vorderseite des DSP-Moduls mit 128kWords Flash-Speicher

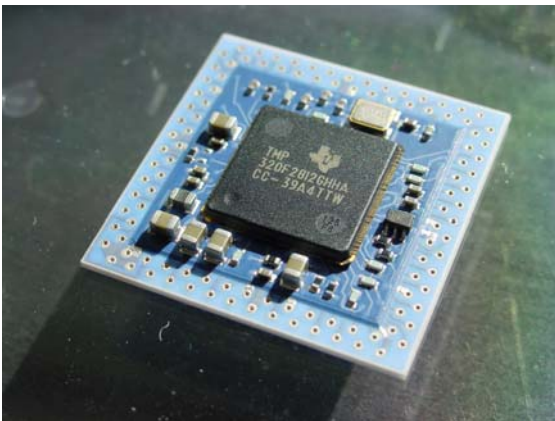


BILD 12. Rückseite des DSP-Moduls mit DSP-Chip und Zusatzbeschaltung

Eine weitere Baugruppe der sensornahen Elektronik, die hier als Beispiel für die Leistungsfähigkeit der Elektronik näher erläutert werden soll, ist der Waveform-Generator. Dieser Modul steuert einen Aktuator mit einer beliebigen synthetisch erzeugten Wellenform an. Diese Wellenform wird digital in einem Speicher (SRAM 512kByte) abgelegt, sie kann aus bis zu 256.000 Stützstellen bestehen. Das heißt, die Wellenform wird an bis zu 256.000 Zeitpunkten abgetastet. Die Amplituden jedes Zeitpunktes werden mit einem 14-bit-Digital-Analog-Converter in Analogsignale umgewandelt, das heißt die

Amplituden können in $2^{14} = 16.384$ Abstufungen ausgegeben werden. Die Ausgabe an den Aktuator erfolgt über einen Leistungsverstärker für kapazitive Lasten, der eine Spitzenspannung $38V_{pp}$ bei einem maximalen Strom von 1A abgibt. Signalfrequenzen von bis zu 5 MHz können erzeugt werden.

Die folgenden Bilder zeigen die Vorder- und Rückseite der Baugruppe „Waveform-Generator“.

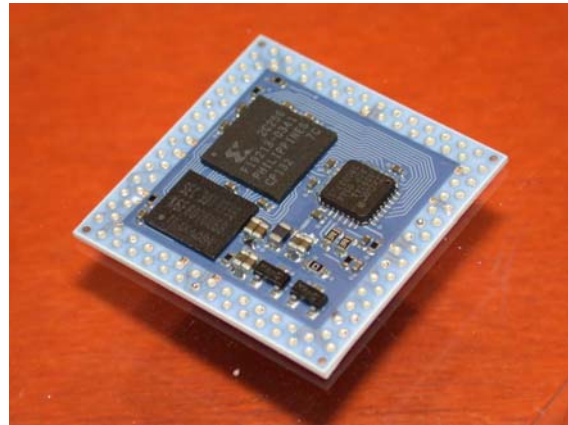


BILD 13. Vorderseite der Baugruppe „Waveform-Generator“ mit SRAM 512kByte und 14-Bit-DAC

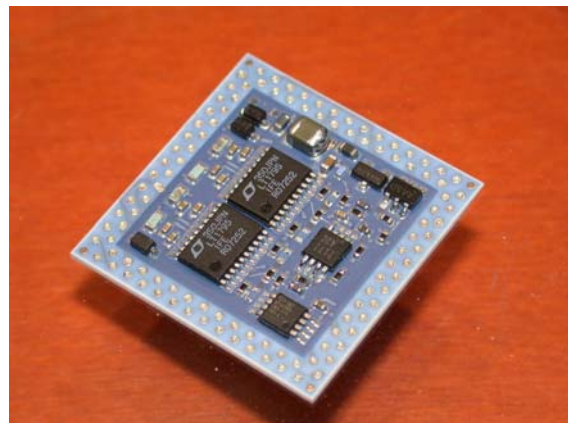


BILD 14. Rückseite der Baugruppe „Waveform-Generator“ mit Leistungsverstärker für kapazitive Lasten, $38V_{pp}$, 1A, 5MHz

Weitere Baugruppen, die das System komplettieren, sind diverse Sensoreingangsstufen mit einstellbarem Verstärker (VGA) und einstellbaren Filterfunktionen. Hierbei ist anzumerken, dass jeder Sensortyp eine etwas andere Eingangsstufe benötigt. Es würde den Rahmen dieser Veröffentlichung sprengen, wenn die technischen Daten jeder Sensoreingangsstufe detailliert erläutert würden.

Eine weitere stets benötigte Baugruppe ist die Stromversorgung, die aus einer Rohspannung von 9V bis 28V alle im System benötigten Versorgungsspannungen generiert.

Erweiterungsbaugruppen für das System betreffen einerseits Massenspeicher zur Ablage von Messwerten. Zum Einsatz kommt hier die DiscOnChip-Technologie mit einer Speichergröße von bis zu 2 Gigabit.

Andererseits können neben dem standardmäßigen (drahtgebundenen) CAN-Bus-Interface auch telemetrische Interfaces appliziert werden. Dazu wurde eine Bluetooth 1.1 kompatible Baugruppe entworfen und realisiert, die eine Datenrate von bis zu 700kBit/s drahtlos übertragen kann. Telemetrische Interfaces anderer Standards (beispielsweise ZigBee) sind zurzeit in Vorbereitung.

Üblicherweise werden die einzelnen Module zu einem Stapel zusammengefügt und gemeinsam mit Steckverbindungen auf einer Leiterplatte platziert. Bild 15 zeigt die Applikation eines solchen Systems auf einer Platte aus faserverstärktem Kunststoff mit einer Piezoscheibe als Sensor (rechts). Bemerkenswert ist, dass der CAN-Bus-Steckverbinder (im Bild 15 links) wesentlich größer ist als die im blauen Würfel befindliche Auswerteelektronik.



BILD 15. Sensorauswerteelektronik gestapelt IZFP-D, RHe

Die einzelnen Module der Sensorauswerte-Elektronik können auch durch flexible Leitungen miteinander verbunden werden. Dies erhöht auf der einen Seite die Zuverlässigkeit der elektrischen Verbindungen. (Sensoren und sensornahe Elektronik, die dauerhaft an der zu überwachenden Struktur verbleiben, müssen zumindest die gleiche prognostizierte Lebensdauer wie diese aufweisen. Das bedeutet für Luftfahrt-Applikationen, dass Sensorik und Elektronik ca. 30 Jahre zuverlässig arbeiten müssen. Der Einsatz der in Bild 16 gezeigten Flexleitungen ist hierzu ein erster Schritt.)

Auf der anderen Seite können durch die Flexleitungen andere Formfaktoren – beispielsweise flächige Anordnungen – realisiert werden. Bild 16 zeigt eine solche Zusammenschaltung der Sensorauswerteelektronik, die in neueren Applikationen bereits zum Einsatz kommt.

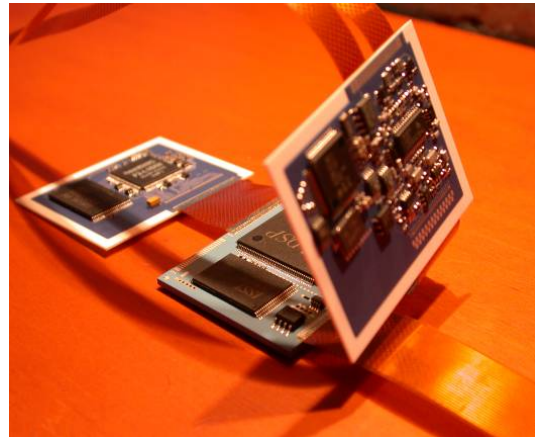


BILD 16. Sensorauswerteelektronik mit Flexleitungen, IZFP-D, RHe

5. APPLIKATIONEN UND AUSBLICK

Mit den beschriebenen Wandler-Systemen und Elektronik-Baugruppen wurden zunächst umfangreiche Laboruntersuchungen durchgeführt. Dazu wurden acht Piezofaserwandler in eine ebene Platte aus glasfaser-verstärktem Kunststoff (GFK) einlaminieren. An diese Piezofaserwandler wurden gestapelte Sensorauswerteelektroniken angeschlossen.

Mit dieser Messanordnung wurden zunächst passive Schallemissionsmessungen durchgeführt. Dabei konnten über Laufzeitmessungen die Lage und die Intensität von Impacts bestimmt werden.

In einem weiteren Versuch wurde eine künstliche Schädigung in Form einer Bohrung in die Platte eingebracht. Diese Bohrung wurde mit aktiven Ultraschallmethoden vermessen. Dies geschah dadurch, dass einer der Wandler eine Plattenwelle ausgesandt hat und die anderen Wandler die ankommenden akustischen Plattenwellen ausgewertet haben. Auf diese Weise wurde jeder Wandler einmal als Aktuator verwendet. Dieser Versuch wurde mit größer werdender Bohrung wiederholt. Sowohl die Lage, als auch die Größe des künstlich eingebrachten Fehlers konnten so reproduzierbar bestimmt werden.

Bild 17 zeigt die Versuchsanordnung im Labor.

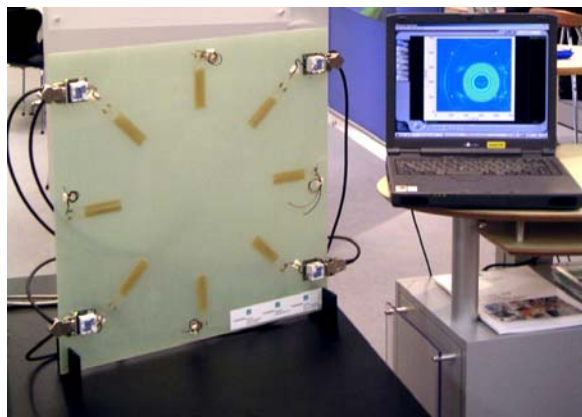


BILD 17. Versuchsanordnung mit einlaminieren Faserwandlern

In einem weiteren Versuch wurden vier Piezofaserwandler in ein Höhenleitwerkssegment eines Sportflugzeuges einlaminieren. Die Auswerteelektronik wurde im Inneren des Flügels platziert. Mit dieser Anordnung konnten ebenfalls Impact-Ereignisse in ihrer Lage und Intensität bestimmt werden. Bild 18 zeigt diesen Demonstrator, der gemeinsam mit den Fraunhofer Instituten ISC und LBF realisiert wurde.



BILD 18. Flügeldemonstrator mit einlaminieren Faserwandlern (Fraunhofer LBF,ISC, IZFP-D)

Erste Messungen konnten auch außerhalb des Labors durchgeführt werden. Bild 19 zeigt eine beim Projektpartner EADS Ottobrunn durchgeführte Messung an einer Fahrwerkskomponente (Double-T-Corner) aus Kohlenstoff-Faser verstärktem Kunststoff (CFK).

Der Prüfling wurde in insgesamt 8 Kraftstufen statisch bis zum Strukturversagen belastet. An den zwei zu überwachenden Bereichen des Prüflings wurden je sechs Wandler angebracht. Die testbegleitende Messung wurde alternierend in den zwei unterschiedlichen Modi durchgeführt:

Messmodus1, passiv: Während der Testphasen, in denen die Last erhöht wurde, wurde die Schallemission, die zum Beispiel aus Faser-Rissen resultiert, aufgezeichnet.

Messmodus2, aktiv: Während der Testphasen mit konstanter Last fungierten einige der Wandler als Sender, andere nahmen die Impulsantwort des Materials als akustische Signatur auf.

Bild 20 zeigt die Auswertung des passiven Messmodus für eines der beiden Test-Volumina. Mit steigender Belastung ist eine deutliche Zunahme der detektierten Schallemissions-Bursts zu beobachten.

Bild 21 zeigt die Auswertung des aktiven Messmodus 2. Mit steigender Belastung ist eine deutliche Abnahme der akustischen Signatur, berechnet aus der Kovarianz und den Varianzen der Zeitsignale, zu verzeichnen. Mit beiden Verfahren konnten – deutlich vor dem Versagen der Gesamtstruktur – Warnsignale detektiert werden.

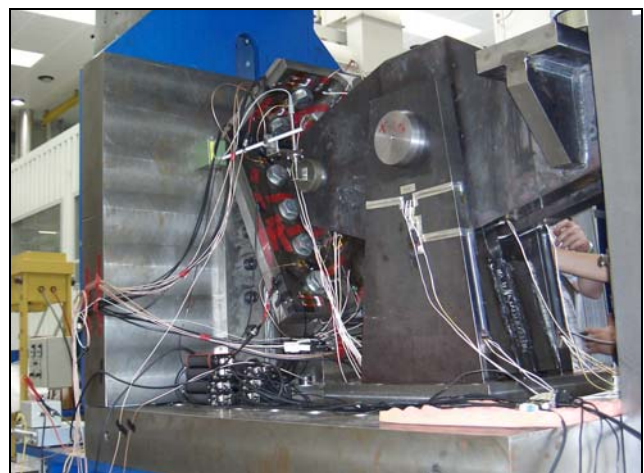


BILD 19. CFK-T-Corner mit applizierten Sensoren (Fraunhofer IZFP-D, EADS Ottobrunn)

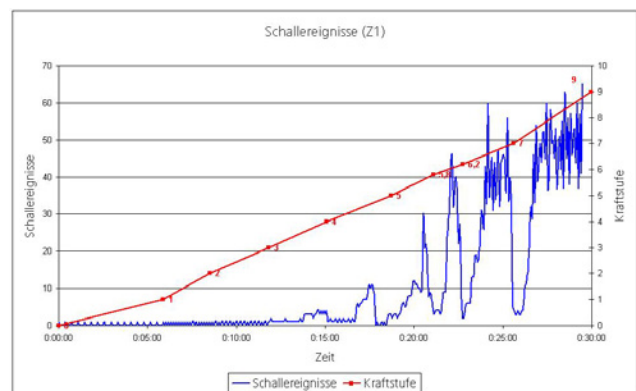


BILD 20. Ergebnis der Schallemissions-Messungen

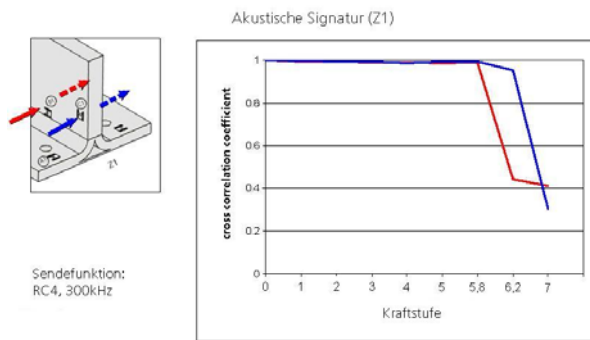


BILD 21. Bild 2: Ergebnis der aktiven akustischen Messungen

Weiterführende Arbeiten des IZFP-D – meist in Zusammenarbeit mit größeren Industriekonsortien – betreffen zum einen die sichere Applikation der Sensoren an den Prüfling beziehungsweise deren Integration in die Struktur selbst. Zum anderen ist die Auswerteelektronik Gegenstand ständiger Weiterentwicklung.

Zur weiteren Erhöhung von Lebensdauer und Zuverlässigkeit der Elektronik werden neue Elektronik-Technologien der Aufbau- und Verbindungstechnik erprobt. Testreihen mit neuen Trägermaterialien, die auch die engere Integration der Sensorik in die Elektronik ermöglichen sollen, werden durchgeführt.

Ein großes Aufgabengebiet für die Zukunft betrifft den kabellosen, energieautarken Sensor, der die für die Verarbeitung der Sensorsignale notwendige Energie aus den mechanischen Schwingungen des Prüflings entnimmt.

Schrifttum

- [1] B. Frankenstein, K.J. Fröhlich, D. Hentschel: Microsystem for signal processing applications. In: SPIE (Hrsg.): Proceedings of 10th SPIE International Symposium 'Nondestructive Evaluation for Health Monitoring and Diagnostics. San Diego, California USA, March 2005, paper 5770-18
- [2] B. Köhler, F. Schubert, B. Frankenstein, „Numerical and experimental investigation of Lamb wave excitation, propagation, and detection for structural health monitoring“, 2nd European Workshop on Structural Health Monitoring, Munich, Germany, July 7-9, 2004.
- [3] B. Köhler, F. Schubert, M. Kehlenbach, R. Bilgram, „Geführte Wellen in Plattenstrukturen und deren Wechselwirkung mit Strukturelementen und Defekten“, DACH-Jahrestagung Salzburg, 17.-19.Mai.2004.
- [4] F. Schubert: Basic Principles of Acoustic Emission Tomography, Journal of Acoustic Emission 22 (2004), S. 147–158.
- [5] Schubert, Hentschel et al. Structural Health Monitoring of a rotor blade during statical load test, DEXA 2007 18th International Conference and Workshop on Database and Expert Systems Applications, Regensburg 3-7. September

2007

[6] Schubert, Hentschel et al. Guided wave based structural health monitoring of industrial piping systems DGZFP-Jahrestagung 2007,

[7] Schubert, Hentschel et al. Simulation, Aufbau und Charakterisierung von Ultraschall-Gruppenstrahlerprüfköpfen für Sampling Phased Array Anwendungen DGZFP-Jahrestagung 2007, Fürth

[8] Meyendorf, Hentschel et al. Monitoring Network for SHM in Avionic Applications In: Proceedings of 9th European Conference on Nondestructive Testing (ECNDT), Berlin, Germany, September 25-29, 2006

[9] Hentschel, Schubert, Frankenstein: Guided waves for SHM application SPIE International Symposium on Smart Structures and Materials and NDE for Health Monitoring and Diagnostics, 26 February - 2 March 2006 San Diego, USA