

Aktive Deformationskontrolle anhand einer Dreibeinstruktur eines Raumfahrtteleskops

Autor: E. K. Pfeiffer, C. Kaiser, T. Ernst; HPS GmbH, Braunschweig
 C. Schöppinger; INVENT GmbH, Braunschweig
 A. Reutlinger; Kayser-Threde GmbH, München
 P. Wierach; DLR Institut Strukturmechanik, Braunschweig
 M. Müller; TU München, Lehrstuhl für Leichtbau, München

Diese Veröffentlichung präsentiert die Ergebnisse einer ESA-finanzierten Studie namens „Structural Deformation Control“. Anhand einer Dreibeinstruktur, wie sie typischerweise bei Weltraumteleskopen verwendet wird, wurde eine mikrometergenaue Positionierung mittels Zusammenspiel von aktiven Piezo-Folien und einem faseroptischen Sensornetzwerk demonstriert. Die Herausforderung dieser Studie bestand darin, unterschiedliche und neue Technologien miteinander zu kombinieren.

Hintergrund

Im Rahmen der zweijährigen Studie „Structural Deformation Control“ wurde die HPS GmbH beauftragt, die Leistungsfähigkeit von präzisen, aktiven Strukturen im Raumfahrtbereich zu untersuchen sowie deren Herstellungstechnik zu verbessern. Unterauftragnehmer von HPS waren INVENT GmbH (Fertigung), Kayser-Threde GmbH (Faseroptische Sensorik), das DLR Institut für Strukturmechanik (Herstellung aktiver Elemente) und der Lehrstuhl für Leichtbau der TU München (Test).

Anwendung in der Raumfahrt

Bisher wurden aktive Strukturen in der Raumfahrt wenig realisiert, obwohl in vielen Bereichen Verbesserungen mittels solcher Strukturen denkbar sind. Als Anwendungsbeispiel wurde bei vorliegender Studie eine Teleskopstruktur gewählt. Optische Instrumente (z.B. eine Kamera) werden dabei oft auf einem Dreibein montiert.

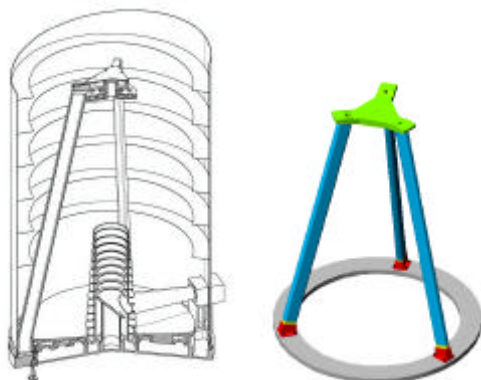


Bild 1: Dreibein in einem Weltraumteleskop (links) und Demonstrator-Design eines aktiven Dreibeins (rechts)

Durch mechanische oder thermische Belastungen im Weltall kann sich jedoch die Ausrichtung der Plattform auf dem Dreibein (siehe Bild 1) aus der perfekten Lage bewegen. So entsprechen z.B. die am Dreibein auftretenden thermischen Dehnungen etwa einer mechanischen Last von 100 kg auf der Erde. Mittels aktiver Strukturen kann dieser negativen Auswirkung entgegen gesteuert werden. Die Stäbe sind jeweils 1,4 m lang und haben einen Querschnitt von 80 mm x 40 mm.

Die genauen Tripod-Anforderungen wurden von optischen Analysen abgeleitet, um die Ergebnisse mit möglichst realistischen Bedingungen vergleichen zu können.

Stabdesign

System und Struktur

Die aktiven Stäbe sind aus CFK Material hergestellt. Als Lagenaufbau wurde $[\pm 45^\circ_2, 90^\circ, 0^\circ_2]_s$, gewählt. Um den verschiedenen Einbettungsaufgaben (Sensorik und Aktuatorik) zu genügen, wurde mit einer Kombination aus Wickel- und Prepregtechnologie gearbeitet. Materialauswahl und Wandstärke basieren auf der Optimierung zwischen Steifigkeit und möglicher Verformung durch die Aktuatorik. In jede Stabseite wurden drei Aktuatorenpakete integriert. Die Positionen der Piezoaktuatoren sind im Bild 2 dargestellt.

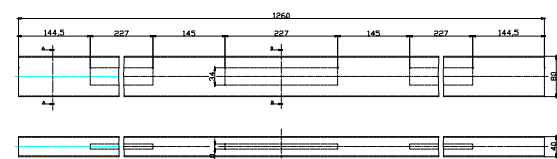


Bild 2: Dimensionen und Orte der einlaminierten Piezo-Module eines aktiven Stabes

Sensorik

Je eine optische Sensorfaser der Firma Kayser-Threde wurde an den zwei breiten Seiten des Stabes mit je acht Meßstellen in den Verbundwerkstoff eingebettet:

- Fünf Meßstellen auf den Aktuatoren
- Zwei Meßstellen auf den passiven Stellen um zwischen den unterschiedlichen Spannungsinformationen zu unterscheiden (Dehnungen aus externer Last durch Aktuatorik)
- Eine Meßstelle als Temperatursensor

Die Meßstellen sind sogenannte „Bragg Gitter“, die in größerer Zahl (hier acht) entlang eines Lichtwellenleiters verteilt sind. Bragg Gitter werden mittels Laser in den Kern der Faser geschrieben und simultan von einer Auswerteeinheit ausgelesen. Aus einer breitbandigen Lichtquelle filtern die einzelnen Bragg Gitter ein schmales Wellenband heraus. Lasten am Bragg Gitter verändern diese Filtereigenschaften, die proportional zur anliegenden Last sind. Faser und Auswerteeinheit haben eine maximale Auflösung von $< 2\mu\text{m/m}$.

Aktuatorik

Als Aktuatorik wurden Funktionsmodule des DLR Instituts für Strukturmechanik gewählt. Jedes besteht aus vier einzelnen piezokeramischen Folien vom Typ PIC255 von PI-Ceramic mit Abmessungen von $50 \times 30 \times 0,2\text{mm}$ bzw. $50 \times 8 \times 0,2\text{mm}$. Neben der mechanischen Stabilisierung der Folien, gewährleisten die Funktionsmodule eine elektrische Isolierung und zuverlässige Kontaktierung und sind mit vorkonfektionierten elektrischen Anschlüssen versehen. In diesem Fall wurden mit Polyamid isolierte Kabel verwendet, die während des Integationsprozesses aus dem Laminat herausgeführt wurden. Die Aktuatormodule hatten eine Gesamtlänge von 227 mm und eine Breite von 34 mm bzw. 10 mm. Die piezokeramischen Folien waren mit Oberflächenelktroden zur Nutzung des piezoelektrischen Quereffektes (d31-Effekt) versehen. Basierend auf dem Elektrodenabstand, der durch die Dicke der Keramiken definiert wird, konnten die Aktuatoren in einem Spannungsbereich von -80 V bis +400V betrieben werden.

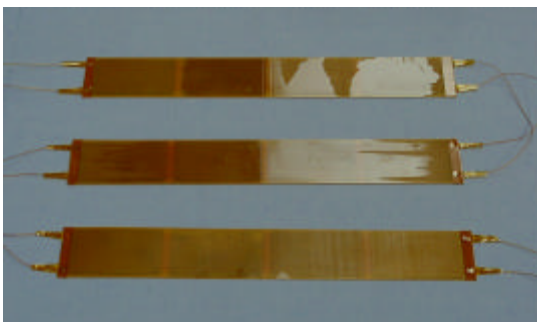


Bild 3: Drei miteinander verkabelte Piezo-Module

Auf jeder Stabseite wurden die Module seriell miteinander verkabelt. Die Kabelenden laufen am Ende der Stäbe heraus. Mittels einer thermographischen Aufnahme sind Piezos und deren Kabelführung sichtbar (Bild 4).

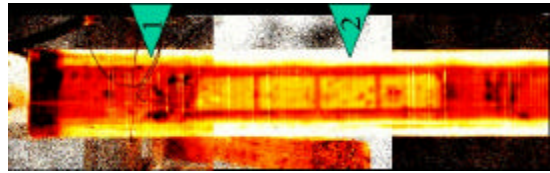


Bild 4: Thermographische Aufnahme eines Stabteils. Die Pfeile zeigen Positionen der FOS Gratings. Deutlich sind die vier Piezo-Folien eines Moduls erkennbar

Analyse

Im Vorfeld der Tests wurde eine Performance Analyse mittels eines ANSYS FE-Modells durchgeführt. Klassische Composite-Schalenelemente wurden benutzt. Um die Wirkungsweise der Piezo-Aktuatoren mit einfachen Mitteln zu modellieren wurde die Analogie zur Ausdehnung durch Temperatur benutzt. D.h. anstatt des Abstandes des Feldes d wurde der Ausdehnungskoeffizient α und anstatt des elektrischen Feld E_{el} wurde der Temperaturunterschied ΔT verwendet. Wenn man nun $\alpha = 0$ für alle passiven Elemente setzt, kann man an den aktiven Stellen im Modell eine Dehnung in Folge des elektrischen Feld durch entsprechende Temperaturänderung erwirken.

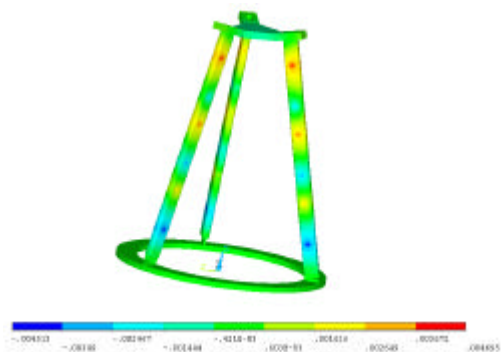


Bild 5: Maximale Kraftwirkung der Piezos, um eine Deformation durch 100kg Masse zu kompensieren

Fertigung

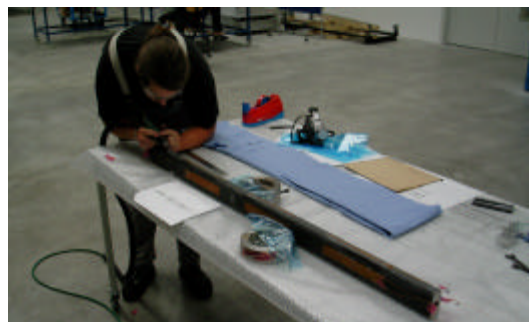


Bild 6: Applikation von FOS-Faser und Piezo-Module

Der Fertigungsprozess erwies sich als so anspruchsvoll wie vorhergesehen. Das Handling und die Applikation von den 250 μm dicken FOS-Fasern in die CFK-Struktur bedurfte genauso einer Optimierung wie die unterschiedlichen Fertigungsabschnitte vor, zwischen und nach Implementierung der Sensorik und Aktuatorik. Letztendlich konnte ein Prozess definiert werden, durch den eine einwandfreie Stabfertigung gewährleistet werden kann. Alle Fertigungsarbeiten hat die Firma INVENT GmbH durchgeführt. Die Wandstärke des Stabes beträgt zwischen 1 mm und 1,5 mm.

Demonstrator Test

Die Demonstrator Tests am Lehrstuhl für Leichtbau der Technischen Universität München wurden jeweils an den einzelnen Stäben (Bild 7) und anschließend am gesamten Dreibein (Bild 8) durchgeführt.

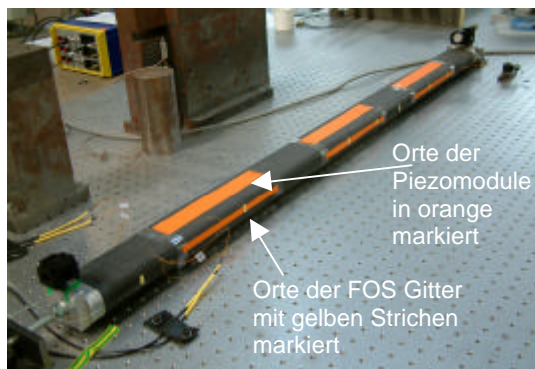
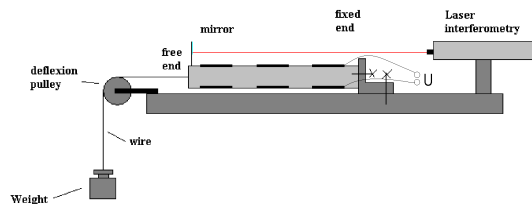


Bild 7: Testaufbau eines einzelnen Stabes



Bild 8: Aktives Dreibein nach den Tests

Die adaptive Steifigkeit sowie die Performance von Sensor und Aktuator in einem Verbund dieser

Technologien konnte verifiziert werden. Die „statische Deformationskontrolle“ durch Aufbringen eines Gewichtes wurde auf zwei Arten nachgewiesen:

- Externes Laserinterferometer
- Eingebetteter FOS-Sensor

Die maximal gemessene Ausdehnung entsprach 24 μm , das einer Kraft („blocking force“) von 210 N entspricht.

Anschließend wurde das Dreibein einer aktiven Deformationskontrolle unterworfen und verschiedene Lasten eingeleitet (Bild 9).

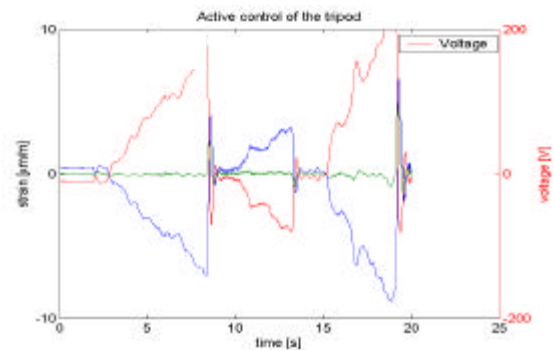


Bild 9: Aktive Deformationskontrolle am Dreibein

Die blaue Linie zeigt die Dehnung, wie sie ohne aktive Kontrolle resultieren würde. Die rote Linie zeigt die aufgebrachte nötige Spannung mit der die Piezos der Kraft entgegenwirken. Die grüne Linie („residual strain“) zeigt den Verlauf der Dehnung des gesamten Dreibeins, nämlich um den 0-Punkt (Auflösung des Meßlasers: 0,2 μm)

Ausblick

Die Ergebnisse der Stabfertigung und Demonstrator Tests ergaben weiteres Optimierungspotential hinsichtlich der Piezo-Folien, Sensoren und Fertigungsprozeduren. Die gesammelten Erfahrungen flossen in den Bau eines zusätzlichen Stabes ein, der Mitte April 2004 zum Testhaus versandt wurde. Es wurden nun insgesamt acht Piezo-Module (anstatt 12) a sechs (anstatt vier) Piezo-Folien appliziert. In den FOS-Fasern wurden insgesamt 15 Gitter eingebracht (Bild 10). Durch diese Anordnung verspricht man sich eine effizientere Performance des aktiven Stabes.

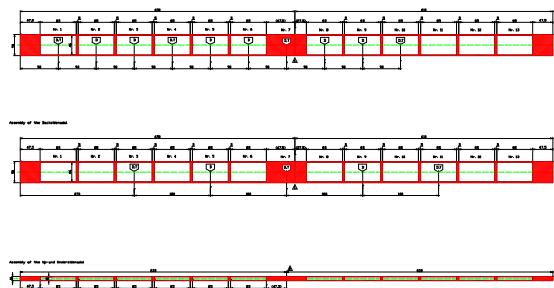


Bild 10: Design des neuen, vierten aktiven Stabes