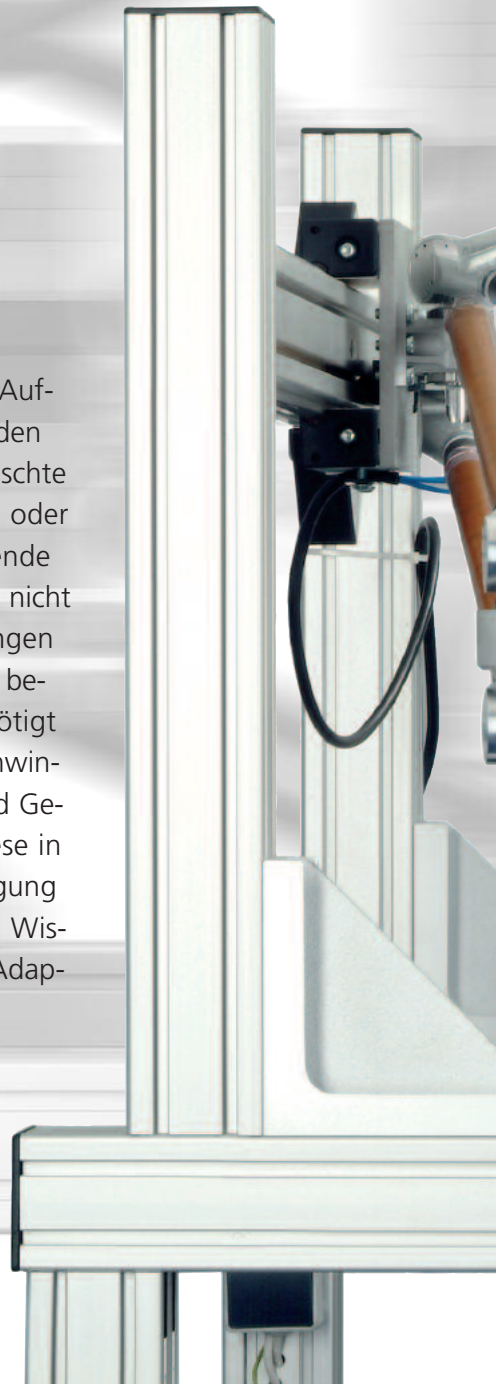


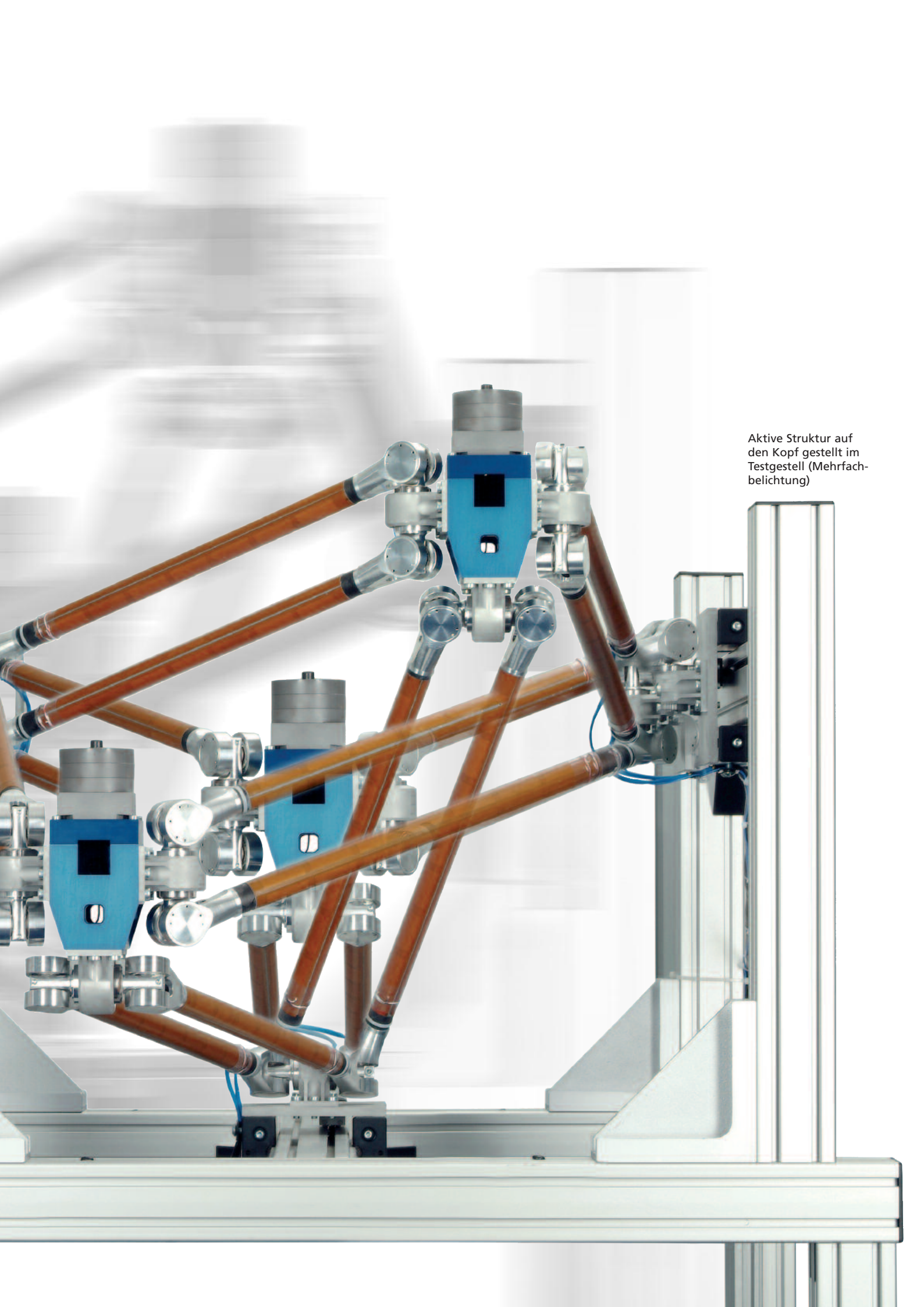
Ohne Ruckeln und Vibrieren

Adaptronik macht Montage-Roboter noch schneller

Von Stephan Algermissen

Das Rattern der vorbeifahrenden Straßenbahn weckt den Städter vor dem Aufstehen, das Rumpeln der Waschmaschine im Bad stört deren Besitzer und den Mieter darunter gleich mit – Schwingungen und Vibrationen sind unerwünschte Nebeneffekte technischer Geräte. Oft nehmen wir das Ruckeln, Klappern oder Surren gar nicht mehr bewusst wahr, denn der Mensch hat gelernt, störende Geräusche auszublenden. Was für den Menschen gilt, trifft auf die Technik nicht zu. Maschinen oder Leichtbaustrukturen können unerwünschte Schwingungen nicht einfach ausblenden. Noch nicht. Wissenschaftler und Konstrukteure bedienen sich der Adaptronik, um Schwingungen einzudämmen. Dazu benötigt man Sensoren, die an oder in einer Maschine angebracht sind, um die Schwingungen dieser zu messen, Regler, die einkommende Signale auswerten und Gegenschwingungen berechnen, sowie Aktuatoren, also Stellglieder, die diese in die Bauteile der Maschine einleiten. Durch die Überlagerung von Schwingung und Gegenschwingung lässt sich diese auslöschen. Das Vibrieren hört auf. Wissenschaftler des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt nutzen die Adaptronik für schwingungsarme Roboter.





Aktive Struktur auf den Kopf gestellt im Testgestell (Mehrfachbelichtung)

Seit 15 Jahren forschen DLR-Wissenschaftler auf dem interdisziplinären Gebiet der Adaptronik. In zahlreichen Anwendungen, sei es in der Luftfahrt oder in der Medizintechnik, gelang es, die Funktionsweise der Adaptronik zu zeigen. Seit acht Jahren erarbeitet das DLR auch Lösungen, mit denen Schwingungen bei Robotern reduziert werden. Als Projektpartner im Sonderforschungsbereich (SFB) 562 „Robotersysteme für Handhabung und Montage“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) ist das DLR zuständig für die Entwicklung und den Bau aktiver Komponenten, für die Regelungstechnik der Adaptronik und für die Erstellung mathematischer Modelle zur Beschreibung der Schwingungseigenschaften von Robotern.

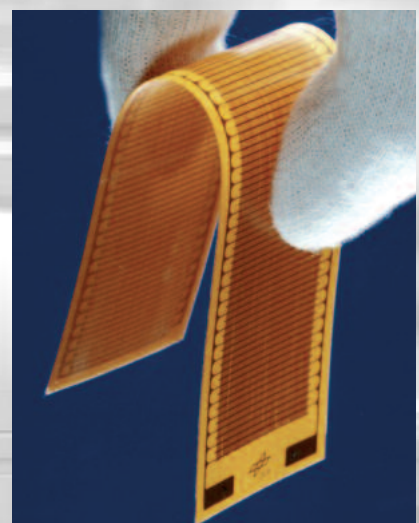
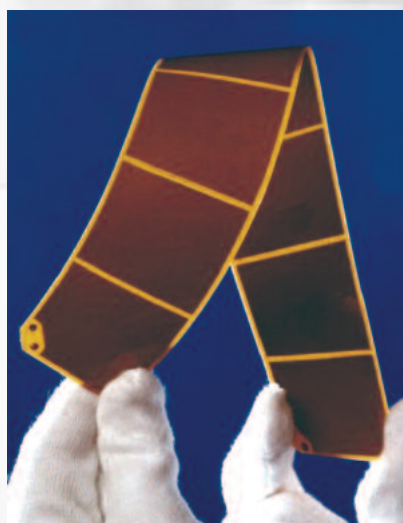
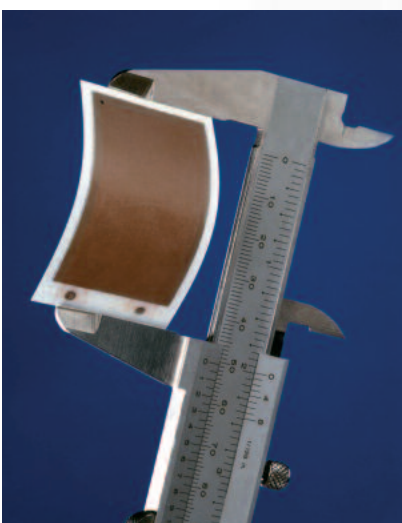
Spezielle Spezies Parallelroboter

Es sind ganz spezielle Roboter, um die es dabei geht, so genannte Parallelroboter. Sie unterscheiden sich von den weiter verbreiteten seriellen

Robotern, wie sie aus der Automobilindustrie bekannt sind. Deren Aufbau ähnelt typischerweise dem menschlichen Arm und besitzt sich abwechselnde Glieder und Antriebe. Bei Parallelrobotern jedoch sind sämtliche Antriebe im Gestell des Roboters fixiert. Bewegt sich der Roboter, so bewegen sich nur Glieder und Gelenke. Antriebe müssen nicht mitgenommen werden. Das mitzubewegende Gewicht ist somit deutlich geringer. Dieser wichtigste Unterschied der Robotertypen befähigt die Parallelroboter, eine Nutzlast schneller von einem Ort zu einem anderen zu befördern, als ein vergleichbarer serieller Roboter das kann. Das prädestiniert den Parallelroboter für Einsatzfälle, in denen schnell und präzise Bauteile bewegt werden müssen, wie etwa bei der Montage von Mobiltelefonen.

Damit die Parallelroboter eine höhere Nutzlast tragen können, ersetzt man metallische Strukturkomponenten durch Bauteile aus carbonfaserverstärktem Kunststoff (CfK). Dieser Werkstoff hat den Vorteil gleicher

Steifigkeit der Komponenten bei geringerem Gewicht. Durch die Kombination von Parallelarbeitsweise und Leichtbau entsteht eine neue, sehr leistungsfähige Klasse von Robotern, die im Betrieb sehr hohe Geschwindigkeiten und Beschleunigungen erreicht. Das hohe Bewegungstempo, insbesondere beim Abbremsen vor der Platzierung eines Bauteils, regt allerdings die Roboterstruktur durch die wirkenden Massenkräfte zu starken Schwingungen an. Die Schwingungen brauchen eine gewisse Zeit, um wieder abzuklingen. Erst danach kann das Bauteil positionsgenau platziert werden. Der gewonnene Zeitvorsprung durch die höhere Geschwindigkeit wird durch die Wartezeit wieder zunichte gemacht. An dieser Stelle kommt die Adaptronik ins Spiel: Wie lassen sich die Schwingungen messen? Wie leitet man die Gegen-schwingungen ein, und wie sehen diese überhaupt aus? Mit diesen Fragestellungen haben sich Wissenschaftler im DLR beschäftigt und Konzepte zur Schwingungsreduktion bei Parallelrobotern erforscht. Das Er-



Piezofolienmodule sind in der Lage, Schwingungen von Strukturen anzuregen oder auch zu messen. Sie können in verschiedensten Formen hergestellt und aufgrund ihrer Flexibilität auf gekrümmte Oberflächen aufgebracht werden.

Sonderforschungsbereich (SFB) 562 „Robotersysteme für Handhabung und Montage“

Das DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik befasst sich gemeinsam mit sieben Instituten der TU Braunschweig im Rahmen des SFB mit der Erarbeitung von methoden-, komponenten- und systembezogenen Grundlagen für die Entwicklung hochdynamischer Parallelroboter mit adaptronischen Komponenten. (www.tu-bs.de/sfb562)

gebnis dieser Arbeit konnte an einem realen Roboter umgesetzt und erfolgreich getestet werden. Der aktuelle Versuchsträger des Sonderforschungsbereichs 562 ist der Parallelroboter TRIGLIDE. Sein Endeffektor, also der Ort, an dem der Greifer für die Bauteile angebracht ist, kann in allen drei Raumrichtungen bewegt werden. Drei Linearantriebe beschleunigen ihn auf einen Spitzenwert von 10 g, dem zehnfachen der Erdbeschleunigung.

Dabei muss die Regelung in der Lage sein, Störungen in geeigneter Art und Weise zu beurteilen. Dazu werden die Schwingungen des Endeffektors gemessen, weil dort das Bauteil gehalten wird. Zu diesem Zweck ist ein Be-

schleunigungssensor direkt innerhalb des Endeffektors angebracht. Er ist in der Lage, die Schwingungen in drei Raumrichtungen zu erfassen.

Keramik erzeugt Schwingungen

Um die Schwingungen einer Struktur aktiv zu beruhigen, muss man die Struktur zunächst zu Schwingungen anregen können. Denn ob sich die Schwingungen wirklich reduzieren lassen, ist eine Frage des richtigen Zeitpunkts der Anregung. Das Ziel ist die Überlagerung von Schwingung und Gegenschwingung, sodass sie sich am Ende auslöschen. Doch wie kann man überhaupt eine Struktur

zu genau bestimmten Schwingungen anregen, ohne dass große Motoren oder Getriebe an die Roboterstruktur gebaut werden müssen?

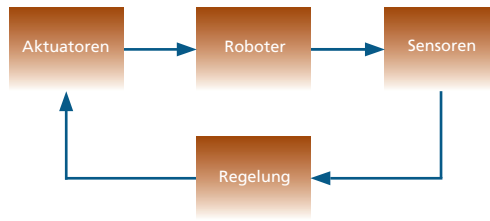
Wissenschaftler des DLR arbeiten seit Langem an innovativen Lösungen zur „Aktivierung“ von Strukturen. Als besonders geeignete Werkstoffe für Aktuatoren haben sich Piezokeramiken erwiesen. Piezokeramiken sind unter anderem bekannt aus Piezofeuerverzeugen, wo durch Druck auf die Keramik eine hohe Spannung erzeugt wird. Entlädt sich diese Spannung über einen Lichtbogen, dann entzündet sich das Gas des Feuerzeugs. Der umgekehrte Effekt wird in den Aktuatoren genutzt: Beim Anlegen einer elektrischen Spannung dehnt sich die Piezokeramik und erzeugt eine Kraft. Bereits Piezoplättchen mit einer Dicke von nur einem halben Millimeter reichen aus, um die Roboterstruktur von TRIGLIDE zu geeigneten Gegenschwingungen anzuregen. Zum besseren Einbau werden die Piezoplättchen in Kunststoff eingekapselt. Die entstehenden Piezofolienaktuatoren werden mit speziellem Klebstoff mit der Roboterstruktur verbunden. So wird es möglich, leichte Aktuatoren direkt auf oder sogar in die zu beruhigende Struktur zu bringen.

Erstmal kräftig durchschütteln ...

Der Parallelroboter sollte nun in der Lage sein, mit den Sensoren die Störungen zu erfassen und mit den Aktuatoren dagegen zu arbeiten. Es fehlt jedoch noch eine Instanz, die Sensoren und Aktuatoren koordiniert. Dieses Verbindungsglied ist die Regelung. Beim TRIGLIDE besteht die Regelung aus einem handelsüblichen Personal Computer mit einem spe-



Gelenkkette des Parallelroboters TRIGLIDE mit zwei aktiven Stäben, die außen mit Piezofolienmodulen beklebt sind



Schematischer Aufbau des Adaptroniksystems

ziellen Echtzeit-Betriebssystem und Modulen zur Ein- und Ausgabe von Signalen. Den Kern der Regelung bildet ein mathematisches Gleichungssystem, das den aktuellen Schwingungszustand der Struktur aus den Sensorsignalen schätzt und auf dieser Basis die auszugebenden Aktuator signale berechnet. Damit ist auch schon die Herausforderung bei der Auslegung einer Regelung beschrieben: Der aktuelle Schwingungszustand kann von dem Regler nur korrekt geschätzt werden, wenn er „weiß“, wie das Schwingungsverhalten der Struktur ist. Es gibt Frequenzen – die so genannten Resonanzfrequenzen –, bei denen der Roboter stärker in Schwingungen gerät als bei anderen. Vor der Auslegung einer Regelung steht somit zunächst der Schritt der Schwingungsanalyse, auch Systemidentifikation genannt. Was liegt näher, als die bereits vorhandenen Sensoren und Aktuatoren zur Analyse zu verwenden. Die Roboterstruktur wird für die Systemidentifikation von allen Piezofolienaktuatoren gleichzeitig für 17 Sekunden von einem Rauschsignal

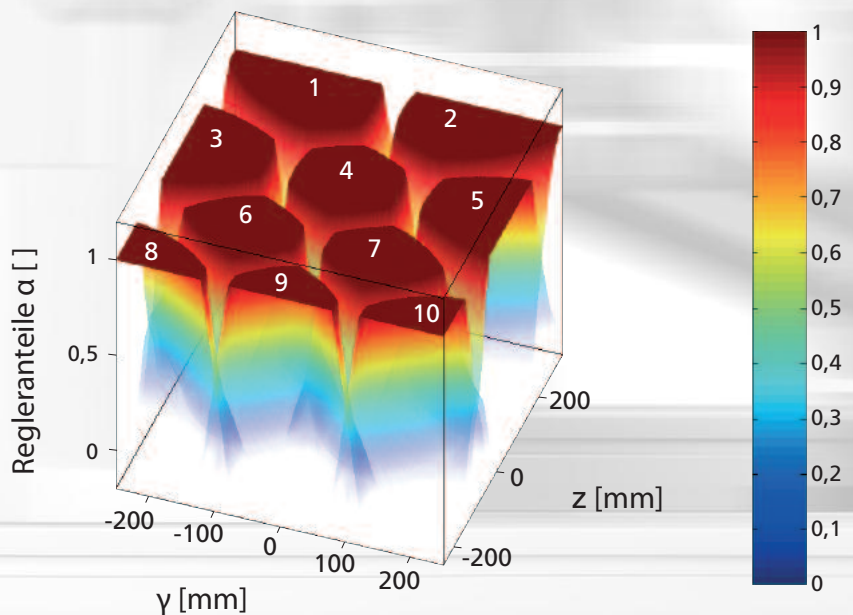
regelrecht durchgeschüttelt. Die Beschleunigungen des Endeffektors in allen drei Raumrichtungen werden vom Regelungssystem zeitgleich aufgezeichnet. Aus den Aktuator- und Sensorsignalen schätzt ein Algorithmus zur Systemidentifikation das Schwingungsverhalten der TRIGLIDE-Struktur und hinterlegt dieses Wissen in Form eines mathematischen Gleichungssystems. Ein weiterer Algorithmus definiert die Reglerauslegung. In ihn fließt die vom Regler zu erfüllende Randbedingung ein, zum Beispiel wie viel Spannung die Aktuatoren maximal erhalten dürfen, ebenso das Wissen über das Schwingungsverhalten.

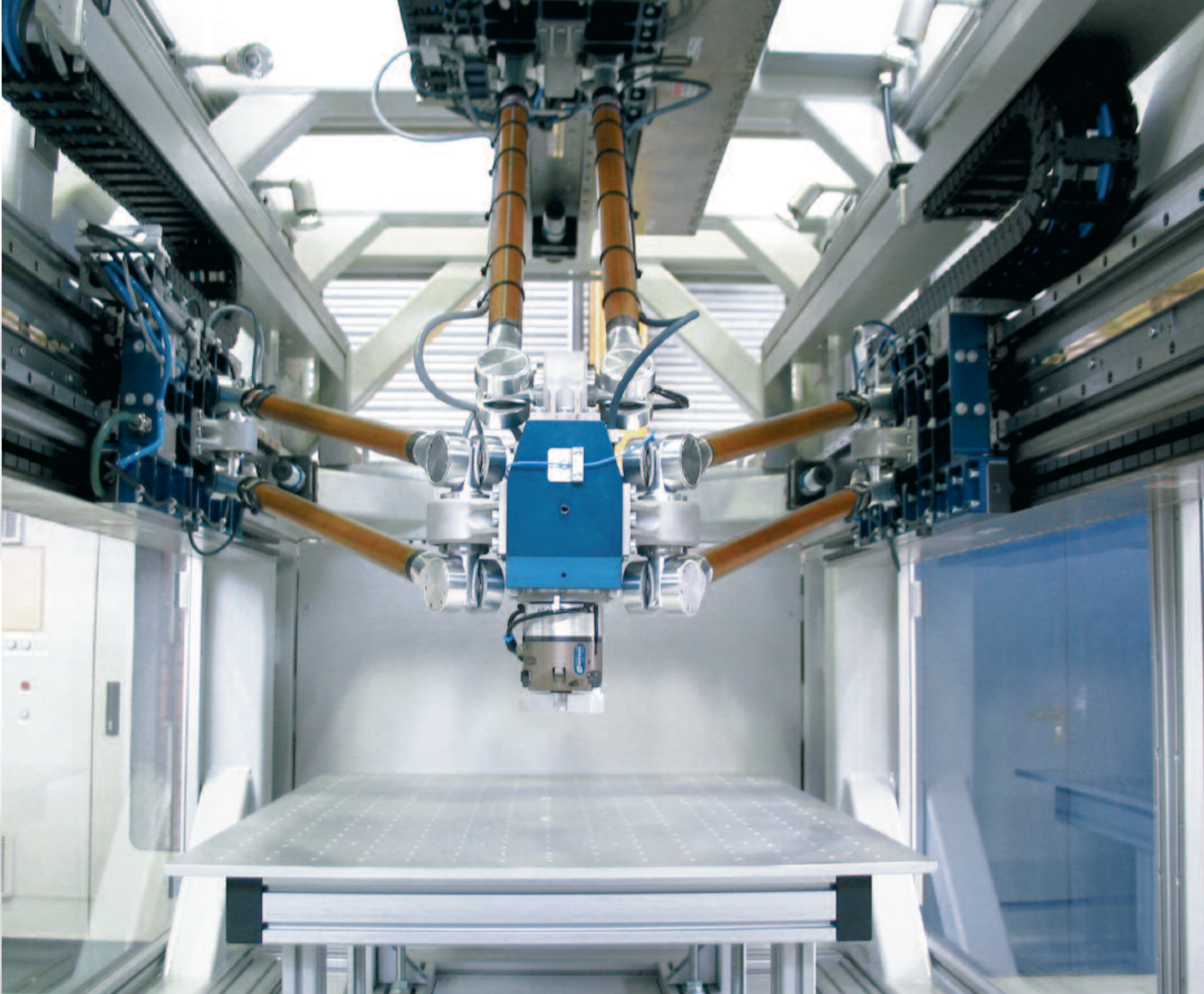
Ein Regler reicht nicht

Würde man den so ausgelegten Regler in den Parallelroboter einbauen, wäre die Schwingungsreduzierung in jener Position am besten, in der das

Schwingungsverhalten bestimmt wurde. Das Schwingungsverhalten von Robotern ist jedoch abhängig von der Position des Endeffektors. Fährt der Roboter in eine andere Position, so verschieben sich seine Resonanzfrequenzen und der Regler ist nicht mehr in der Lage, den Schwingungszustand exakt zu berechnen. Die Folge: Störschwingungen werden nicht in dem Maße reduziert wie gewünscht. Um die Schwingungen dennoch zu mindern, messen die Wissenschaftler das Schwingungsverhalten des Roboters an zehn Positionen des Endeffektors, den so genannten Arbeitspunkten. Zwischen diesen Punkten wird das Verhalten der Struktur aus dem der drei nächstgelegenen Punkte berechnet. Analog dazu müssen zehn Regler gemäß dem Verhalten in den zehn Arbeitspunkten ausgelegt werden. Im Betrieb steht der Parallelroboter natürlich nicht still, sondern bewegt sich auf programmierten Bahnen durch den Arbeitsraum. Das bedeutet, der Regler kann erst wie gewünscht wirken, wenn die Regler aus den nächst-

Für den gesamten Arbeitsraum werden zehn Regler benötigt. Innerhalb ihres jeweiligen Bereiches (Regleranteil = 1) ist ein Regler allein aktiv. In den Übergangsbereichen (Regleranteil < 1) sind die benachbarten Regler gemeinsam aktiv





Der Parallelroboter TRIGLIDE mit aktiver Struktur

gelegenen Arbeitspunkten kombiniert werden. Die besondere Herausforderung ist die zu gewährende Stabilität beim Umschalten zwischen den drei Reglern. Ein im DLR entwickelter Ansatz lieferte den Nachweis dafür, dass die Stabilität gewährt werden kann. Die Berechnung der Regler findet auf dem Regelungssystem tausendmal pro Sekunde statt.

TRIGLIDE stellt sich selber ein

Das Schwingungsverhalten eines Parallelroboters ist sehr sensitiv gegenüber Änderungen an der Struktur.

Nach größeren Wartungsarbeiten, die zum Beispiel ein Auseinander- und Zusammenbauen erfordern, muss das Schwingungsverhalten neu identifiziert und die Regelung neu ausgelegt werden. Im industriellen Umfeld muss die Adaptronik kontinuierlich laufen, aufwändiges neues Einmessen durch Experten ist nicht praktikabel.

Abhilfe schafft da ein von den DLR-Wissenschaftlern entwickelter automatischer Algorithmus, der es dem System erlaubt, sich selbstständig einzustellen. Dabei sind komplizierte Identifikations- und Auslegungsalgorithmen automatisiert und auf dem

PC von TRIGLIDE hinterlegt. Eine Neukalibrierung der Regelung ist dann für den Roboterbediener ohne großen Zeitaufwand möglich.

Autor

Dipl.-Ing. Stephan Algermissen aus dem DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik ist im Sonderforschungsbereich 562 für die Systemidentifikation und die Regelungstechnik der Adaptronik zuständig.