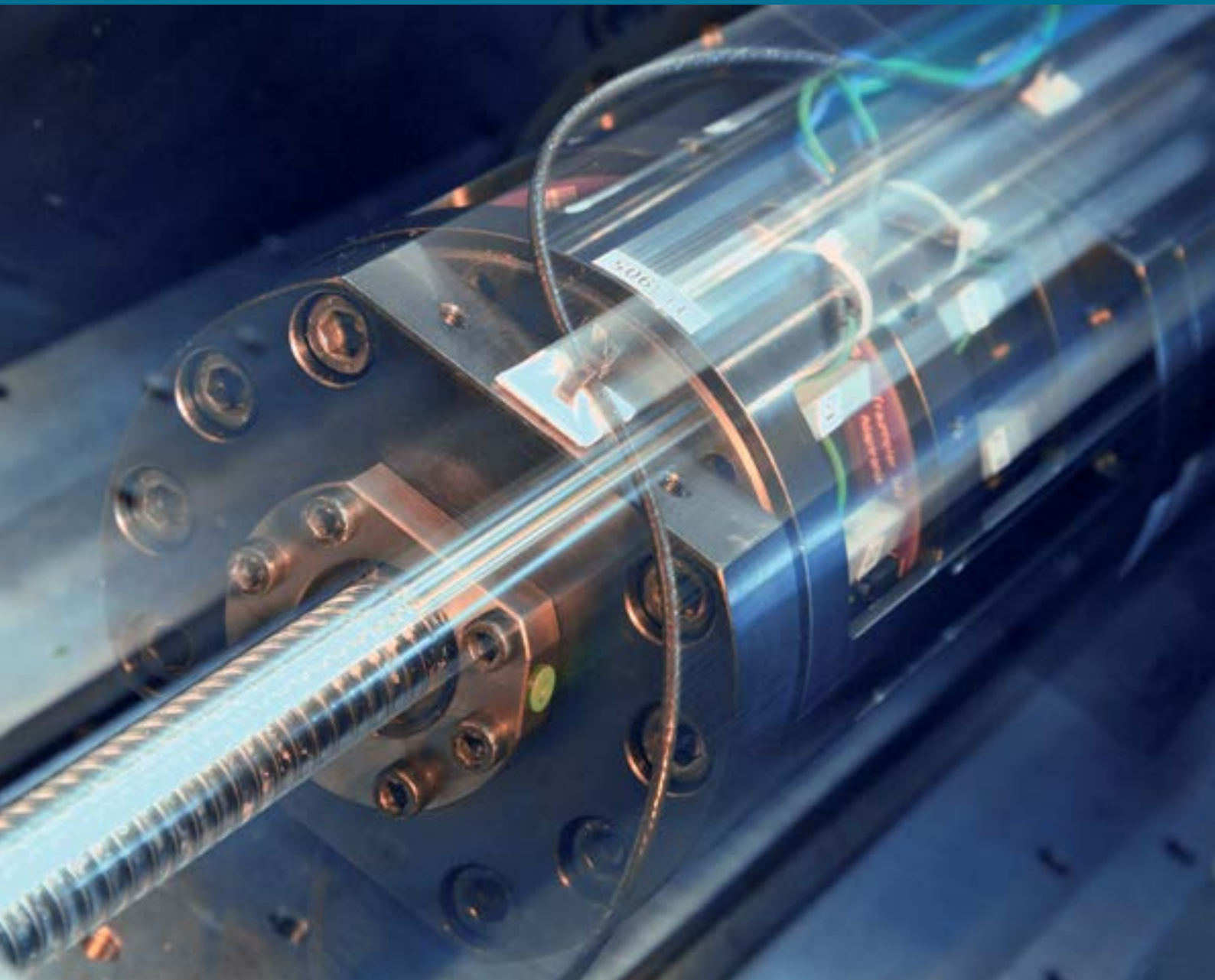
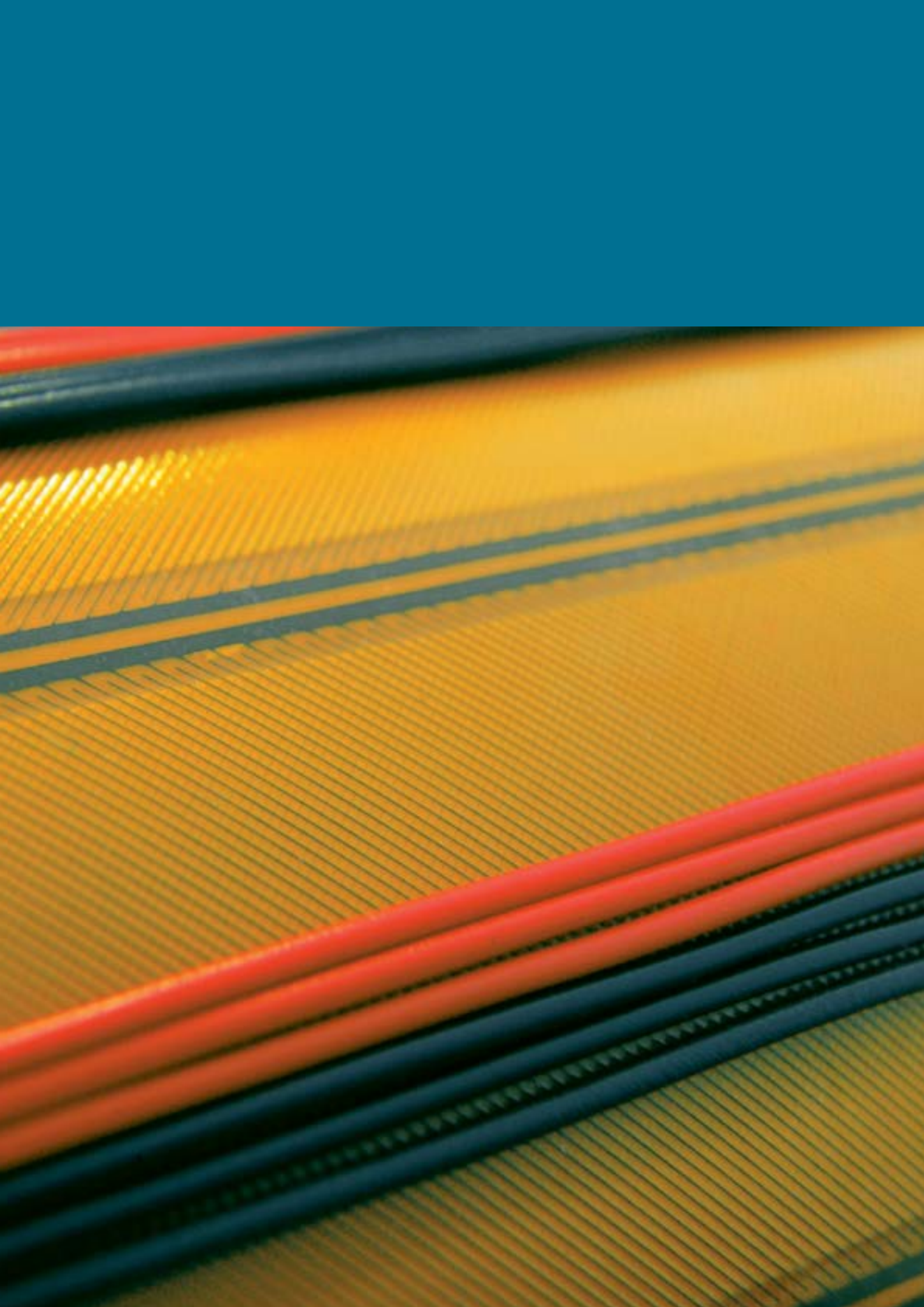


ADAPTRONIK

Passive Strukturen zum Leben erwecken





Adaptronik ist das Synonym einer Technologie für intelligente Strukturen mit einem hohen Integrationsgrad. Erste nennenswerte Entwicklungen gab es Mitte der 1980er Jahre in den USA und Japan auf dem Gebiet der Luft- und Raumfahrt sowie im Bereich militärischer Anwendungen. Anfang der 1990er Jahre wurde diese Technologie auch in Europa und Deutschland zunächst ebenfalls im Luft- und Raumfahrtsektor aufgegriffen. Seit der Jahrtausendwende beschäftigen sich namhafte Forschungseinrichtungen wie die Fraunhofer-Gesellschaft, das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt oder die Leibniz-Gemeinschaft mit Anwendungspotenzialen der Adaptronik auch in zivilen Branchen.

Bei der Adaptronik werden sensorische und aktorische Funktionen zum integralen Bestandteil einer lasttragenden Struktur, die sich selbstständig an sich verändernde Randbedingungen anpasst. Dafür werden aktive Werkstoffe, sogenannte »smart materials« eingesetzt, deren Aktivierung durch elektrische, magnetische oder thermische Felder erfolgt. Aktive Werkstoffe im Sinne der Adaptronik sind insbesondere Piezokeramiken, magnetostriktive Legierungen, magnetische und thermische Formgedächtnislegierungen sowie elektro- und magnetorheologische Fluide. Ihr Kennzeichen ist die Umsetzung einer Feldgröße in eine mechanische Wirkung bzw. die Veränderung der Werkstoffeigenschaften unter Feldeinwirkung. Essentieller Bestandteil eines adaptronischen Gesamtsystems ist neben der Sensor- und Aktoreigenschaft des Werkstoffs eine ebenfalls strukturintegrierte, echtzeitfähige und energieautarke Ansteuerungs- und Regelungstechnik.

Die Adaptronik ist anerkanntermaßen eine der zentralen Schlüsseltechnologien für innovative Produkte in den Marktfeldern Mobilität, Energie und Gesundheit. Als Anwendungsszenarien kommen alle Baugruppen und Komponenten in Frage, bei denen aktiv das Schwingungsverhalten, die Schallabstrahlung, die Kontur- und Geometrieigenschaften oder auch die Schadenstoleranz beeinflusst werden sollen. Der zu erwartende Performancezuwachs erscheint in den Branchen Automobilbau, Energietechnik, Maschinen- und Anlagenbau, Schienenfahrzeugbau, Medizintechnik sowie Bau- und Haustechnik besonders hoch.

Im Bereich der Fertigungsanlagen und -technologien werden Systeme benötigt, die ein hohes Maß an Präzision erfordern, gleichzeitig aber durch die hohe Dynamik der Prozessbedingungen und eine erhebliche Beeinflussung durch die Umgebung gekennzeichnet sind. Da sich adaptronische Komponenten optimal an veränderliche äußere Bedingungen und die jeweilige Fertigungsaufgabe anpassen, lassen sich Maschinen und Maschinenkomponenten wesentlich dynamischer, genauer, robuster und flexibler gestalten – ein Parameterfeld, das sich sonst in der klassischen Entwurfsmethodik häufig konträr gegenübersteht.

Am Fraunhofer IWU wird seit vielen Jahren aktiv auf dem Gebiet der Adaptronik geforscht. Der Dresdner Institutsteil bietet auf einer Fläche von 600 m² optimale Bedingungen für die Bearbeitung von Forschungsprojekten vom aktiven Werkstoff bis hin zur Erprobung prototypischer Baugruppen. Werkstoffwissenschaftler, Technische Mechaniker und Konstrukteure, Regelungs- und Automatisierungstechniker sowie Messtechniker bearbeiten Projekte der Adaptronik in ihrer gesamten Komplexität.

Auf einer Kardanwelle applizierte Macro-Fiber-Composite-Aktoren in 45°-Ausrichtung reduzieren störende Biege- und Torsionsschwingungen.

AKTIVE WERKSTOFFE – EINE AUSWAHL

Es gibt zahlreiche aktive Werkstoffe mit unterschiedlichsten Wirkmechanismen. Die Abteilung Adaptronik des Fraunhofer IWU beschäftigt sich vorrangig mit Piezokeramik, magnetischen und thermischen Formgedächtnislegierungen sowie elektro- und magnetorheologischen Fluiden.

Allen aktiven Werkstoffen gemein ist die inhärente Sensor- und Aktorfunktion in einem Werkstoff. Dies qualifiziert diese Werkstoffgruppe sowohl für sensorische als auch aktorische Aufgaben und ermöglicht einen neuen Integrationsgrad sowie eine extreme Funktionsverdichtung. Herkömmliche Konstruktionswerkstoffe wie Stahl, Aluminium oder Faserkunststoffverbunde werden durch Applikation oder Integration aktiver Werkstoffe intelligenter und können als Gesamtkomponente leichter und damit gewichts- und ressourcenschonender dargestellt werden.

Piezokeramik

Die Wirkungsweise dieser Materialien beruht auf der elektromechanischen Wechselwirkung zwischen dem elektrischen und mechanischen Zustand einer bestimmten Klasse von Kristallen. Sie sind in der Lage, elektrische Energie in mechanische Energie umzuwandeln und umgekehrt. So erzeugen Piezokeramiken bei mechanischer Beanspruchung eine elektrische Feldstärke (Sensoreffekt) bzw. verformen sich infolge eines angelegten elektrischen Feldes (Aktoreffekt). Dieser Wirkmechanismus ist auf die ungewöhnliche Perowskit-Gitterstruktur zurückzuführen. Um den piezoelektrischen Effekt auch makroskopisch nutzbar zu machen, werden Piezokeramiken während des Herstellungsprozesses durch Anlegen eines elektrischen Feldes polarisiert.

Diese Polarisierung ist der Grund dafür, dass sich verschiedene Verformungseffekte in Abhängigkeit der Richtung des angelegten elektrischen Feldes sowie der Polarisierungsrichtung ausbilden. Die Indizierung der Effekte gibt Auskunft über die Verformungsrichtung (Index 1) in Abhängigkeit von der Richtung des angelegten elektrischen Feldes (Index 2), zum Beispiel d_{31} . Die Bauformen und Wirkmechanismen piezoelektrischer Aktoren können sehr unterschiedlich sein. Die am weitesten verbreiteten sind die Stapelbauweise und die Streifenbauweise.

Grundlegende Eigenschaften:

- sehr hohe Arbeitsfrequenzen (0,1 Hz bis MHz-Bereich)
- niedrige Dehnungen (bis 0,2 Prozent)
- große Kräfte (bis 4 kN pro cm^2)

Thermische Formgedächtnislegierung

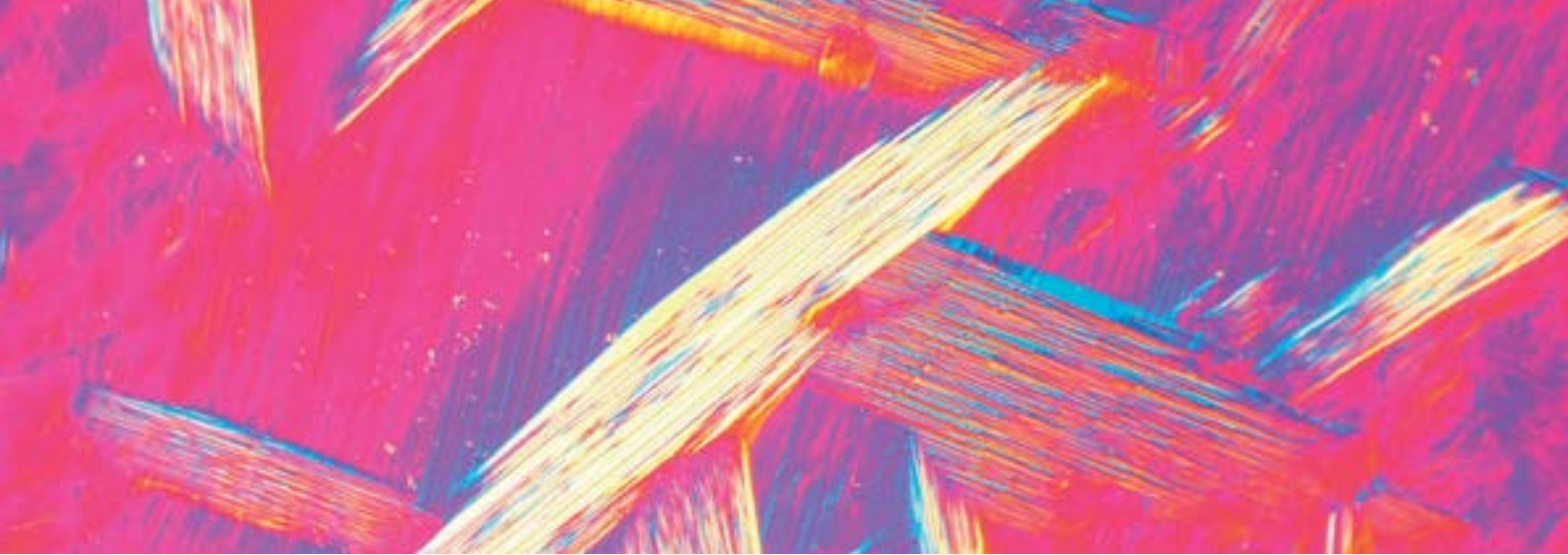
Ausgewählte metallische Legierungen, verschiedene Kunststoffe und Faserverbundwerkstoffe sowie einige chemische Substanzen sind in der Lage, sich an definierte geometrische Formen zu erinnern, wenn eine bestimmte physikalische Indikatorgröße auf sie einwirkt. Dieser Vorgang wird allgemein als Memoryeffekt bezeichnet. Im Fall von thermischen Formgedächtnislegierungen ist diese auslösende Feldgröße die Temperatur. Der Formgedächtniseffekt setzt immer eine spezielle Materialkonditionierung, optimalerweise im Herstellungsprozess des Materials, voraus.

Thermische Formgedächtnismaterialien sind bereits seit längerem Gegenstand der Forschung. Im Bereich metallischer Legierungen sind heute Halbzeuge in Form von Drähten, Stäben, Rohren und Platten bzw. Blechen verfügbar. Thermische Formgedächtnislegierungen haben die besondere Eigenschaft, sich nach einer bleibenden plastischen Verformung unterhalb einer bestimmten Temperatur durch Erwärmung über die Umschalttemperatur wieder an ihre ursprüngliche geometrische Form »zu erinnern« und diese erneut einzunehmen.

Für das Auftreten des Formgedächtniseffekts ist eine reversible austenitisch-martensitische Phasenumwandlung Voraussetzung. Im Idealfall wird die austenitische Phase durch Scherung in die martensitische Phase überführt. Dies führt aufgrund von diffusionslosen Umordnungsvorgängen der Atome zur Änderung der Stapelfolge der Kristallgitterebenen und damit zur Veränderung der Struktur des Kristallgitters. Thermische Formgedächtnislegierungen besitzen aufgrund der Abhängigkeit des elektrischen Widerstands von der Dehnung des Materials gute Sensoreigenschaften, durch die Umwandlung von Austenit in Martensit bei einer bestimmten Umwandlungstemperatur sehr gute Aktoreigenschaften.

Grundlegende Eigenschaften (Beispiel NiTi):

- niedrige Arbeitsfrequenzen (0 Hz bis 20 Hz)
- hohe Dehnungen (bis 8 Prozent)
- sehr große Kräfte (bis 250 N pro mm^2)



Magnetische Formgedächtnislegierung

Die Entdeckung ferromagnetischer Formgedächtnislegierungen liegt erst wenige Jahre zurück. Die MSM-Legierungen weisen analog zu den konventionellen Formgedächtnislegierungen (FGL) das charakteristische martensitische Umwandlungsverhalten, insbesondere aber den Formgedächtniseffekt auf. Der wesentliche Unterschied besteht gegenüber FGL darin, dass der Formgedächtniseffekt nicht durch einen Temperatureinfluss, sondern durch das Anlegen eines magnetischen Feldes hervorgerufen wird. Dadurch kann im Gegensatz zu konventionellen FGL eine wesentlich höhere Wiederholrate bei den Arbeitsvorgängen realisiert werden. Über die Variation der magnetischen Feldstärke ist eine Steuerung des Umwandlungsprozesses möglich.

Grundlegende Eigenschaften

- hohe Arbeitsfrequenzen (0 Hz bis kHz-Bereich)
- hohe Dehnung (bis 10 Prozent)
- niedrige Kräfte (bis 5 N pro mm²)

Optische Formgedächtnismaterialien

Optische Formgedächtnismaterialien sind gegenwärtig in Form lichtintensiver Formgedächtnispolymere verfügbar. Wie bei den thermischen Formgedächtnispolymeren kann der Werkstoff aus einem amorphen Zustand (flexibel und elastisch) in einen kristallinen Zustand (steif) überführt werden. Auslösende Indikatorgröße ist dabei das Licht. Die Lichteinwirkung beeinflusst die Vernetzungsdichte und somit die elastischen Eigenschaften des Materials. Mit einer gezielten Erhöhung der Vernetzungspunkte im Herstellungsprozess wird die aktuelle Form des Materials fixiert. Bei der späteren Auflösung der Fixierung »erinnert« sich das Material wieder an seinen geometrischen Grundzustand.

Grundlegende Eigenschaften:

- hohe Dehnungen
- sehr geringe Kräfte
- kostengünstig in der Herstellung

Elektro- und magnetorheologische Flüssigkeiten

Elektro- und magnetorheologische Flüssigkeiten sind Materialien, die auf die Anwesenheit von elektrischen bzw. magnetischen Feldern mit einer Erhöhung ihrer Viskosität reagieren. Sie bestehen aus einer Basisflüssigkeit, beispielsweise Silikonöl und darin eingebetteten Feststoffpartikeln. ER- und MR-Fluide sind in der Regel sehr dünnflüssig und haben die Eigenschaft, unter Einfluss eines Feldes reversibel in einen festkörperähnlichen Zustand zu wechseln. Dieser Übergang erfolgt innerhalb von Millisekunden.

ERF bestehen aus hoch durchschlagfesten Feststoffpartikeln, die in einem Basisöl verteilt sind. Wird senkrecht zur Fließrichtung ein elektrisches Feld angelegt, so wird dadurch der Widerstand der Flüssigkeit gegenüber dem Fluss erhöht. Als Feststoffpartikel kommen Zellulose, Siliziumverbindungen oder Materialien auf Kohlenstoffbasis in Betracht. Das verwendete Basisöl ist oft ein Silikonöl.

MRF bestehen typischerweise aus 20 bis 40 Volumenprozent Weicheisenpartikeln, die in einer Basisflüssigkeit suspensiert sind. Als Basisfluide kommen Wasser, Silikonöle und auf Kohlenstoff basierte Öle zum Einsatz. Die erreichbare Grenzscherspannung eines MRF hängt im Wesentlichen von der Sättigungsmagnetisierung der verwendeten Feststoffpartikel ab. Verwendung finden hier unter anderem reine Eisenpartikel sowie Legierungen von Eisen und Kobalt.

Grundlegende Eigenschaften ERF:

- maximale Grenzscherspannung 2 bis 5 kPa
- Dichte 1 bis 2 g pro cm³
- Ansteuerung mit 2 000 bis 5 000 V bei 1 bis 10 mA

Grundlegende Eigenschaften MRF:

- maximale Grenzscherspannung 50 bis 100 kPa
- Dichte 3 bis 4 g pro cm³
- Ansteuerung mit 2 bis 50 V bei 1 bis 2 A

INTELLIGENTE LÖSUNGEN FÜR MASCHINENBAU, AUTOMOBILBAU UND MEDIZINTECHNIK

Leistungsfähigkeit, Langlebigkeit, Funktionalität – die Anforderungen an Industrieprodukte sind klar definiert. Im Wettbewerb um Markterfolge sind innovative Ideen und Lösungen gefragt. Die Adaptronik stellt dabei eine Schlüsseltechnologie dar.

Adaptronik im Automobilbau

Anwendungen aktiver Systeme auf Basis von »smart materials« im Automobilbau spannen einen Bogen von der intelligenten Produktion des Automobils bis hin zur adaptiven Anpassung der Karosseriestruktur zur Optimierung des Windwiderstands und somit zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs.

So kann zum Beispiel mit einem aktiven Werkzeug auf Basis von Piezoaktoren der Blecheinzug beim Tiefziehen optimiert oder der Blecheinzug mit Hilfe intelligenter Sensorik überwacht und gesteuert werden. Anwendungen auf Basis von Formgedächtnislegierungen erlauben hingegen die Realisierung kostengünstiger und gewichtsoptimierter Stellantriebe als Ersatz für konventionelle Elektroantriebe. Ein weiterer wesentlicher Vorteil eines solchen adaptronischen FGL-Antriebs ist seine absolute Geräuschlosigkeit. Dies ist speziell für Anwendungen im Fahrzeuginnenraum von höchstem Interesse. Zudem ist ein energieautarkes Thermomanagement durch die sowohl sensorischen als auch aktorischen Eigenschaften von FGL möglich. Der Einsatz aktiver Werkstoffe im Automobilbau ermöglicht sowohl die ressourcenschonende Produktion als auch den ressourcenschonenden Betrieb eines Automobils mit vielen zusätzlichen Funktionalitäten.

Adaptronik im Maschinenbau

Die Hersteller von Werkzeugmaschinen stehen vor großen technischen Herausforderungen. Die von ihnen entwickelten Produkte müssen nicht nur produktiver und präziser werden, auch die Erstinvestitionskosten für den Kunden und die Lebenszykluskosten sollen geringer ausfallen, um im weltweiten Wettbewerb bestehen zu können.

Lösungsansätze bietet auch hier die Adaptronik durch den Einsatz hochintegrierter intelligenter Systeme. Im Fokus der Entwicklung und Nutzung adaptronischer Komponenten liegen dabei vor allem Fertigungsanlagen und -technologien, die ein hohes Maß an Präzision erfordern, gleichzeitig aber auch durch eine hohe Dynamik der Prozessbedingungen oder veränderliche Umgebungsbedingungen gekennzeichnet sind.

Eine potentielle Möglichkeit zur Reduzierung von Nebenzeiten ist die Erhöhung der Antriebsdynamik. Erreicht wird das durch konsequenten adaptronischen Leichtbau und intelligente Zusatzkomponenten, die bisher bestehende Dynamikgrenzen aufweiten. Ein konkretes Beispiel sind piezokeramische Sensor-Aktor-Einheiten zur Torsions-, Biege- und/oder Axialschwingungskompensation in Vorschubantrieben von Werkzeugmaschinen. Durch den Einsatz von Adaptronik können jedoch auch bestehende Bearbeitungstechnologien erweitert bzw. völlig neue Technologiebereiche erschlossen werden.

Eine Funktionserweiterung von Werkzeugmaschinen ist unter anderem durch den Einsatz einer adaptiven Spindelhalterung möglich. Ein Beispiel ist die am Fraunhofer IWU entwickelte Hexapod-Kinematik auf Basis von Piezo-Stapelaktoren als Halterung für eine HSC-Motorspindel. Die Bewegungsgrößen ergeben sich aus den Hüben und Anstellwinkeln der Piezoaktoren. Das dezentral gesteuerte Subsystem bestehend aus Aktorik, Sensorik und Reglerstruktur ist in vorhandene Werkzeugmaschinenkonzepte integrierbar.



1



2



3

Die Gewichtsreduzierung von bewegten Massen ist ein wirksamer Weg zur Steigerung der Energieeffizienz in Produktionsprozessen. Dies führt jedoch zwangsläufig zu einer Verringerung der Steifigkeit in den Antriebsachsen. Die Folge sind erhöhte Schwingungen, die aus den auftretenden Prozesskräften resultieren. Die Genauigkeit der Maschine wird verringert. Durch die Subkinematik werden diese Schwingungen exakt erfasst und durch einen dezentralen Regler wirksam bekämpft. Am Fraunhofer IWU wurden unter anderem die Einsatzgrenzen des adaptiven Systems hinsichtlich der quasistatischen Kennwerte einer piezobasierten Baugruppe analysiert und die Bandbreite der aktiven Schwingungsminde- rung des Systems ermittelt. Die aktive Regelung ist bis 250 Hz wirksam und reduziert Resonanzspitzen deutlich.

Eine Schlüsseltechnologie mit hohem Potential zur Erschließung zukünftiger Märkte ist die Mikrotechnologie. So führt zum Beispiel das Einbringen von Mikrotaschen zu einer verbesserten Wirkung von Schmierstoffen und somit zu einer verminderten Reibleistung. Bisher werden Mikrostrukturierungen durch den Einsatz zusätzlicher Prozessschritte erzeugt. Der dazu notwendige Aufwand steht einem breiten Einsatz entgegen. Mit der adaptiven Spindelhalterung können dem eigentlichen Fräsprozess hochdynamische Bewegungen im Mikrometerbereich überlagert werden. Mikrostrukturierte Oberflächen werden somit bereits während der Fräsbear- beitung erzeugt; zusätzliche Prozessschritte entfallen bzw. werden substituiert.

Im Maschinenbau haben aber auch Formgedächtnislegierungen ihre Anwendungsberechtigung. So lassen sich beispiels- weise thermische Verformungen von Maschinenkomponenten und des Maschinengestells durch den Einsatz derartiger Aktoren kompensieren.

Adaptronik in der Medizintechnik

Aktive Werkstoffe wie Formgedächtnismaterialien (Metalle und Kunststoffe) oder Piezokeramik bieten auch im Bereich der medizinischen Gerätetechnik und der Prothetik vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Durch ihr hohes spezifisches Arbeitsvermögen ermöglichen diese Werkstoffe den Aufbau kompakter Aktoren und Sensoren. Sie können daher als alter- native Antriebselemente in vorhandene Lösungen integriert werden, erlauben aber ebenfalls die Entwicklung vollkommen neuer komplexer Systeme mit neuen Funktionalitäten.

Der Einsatz sogenannter »Self-Sensing-Aktoren« auf Basis von Formgedächtnislegierungen ermöglicht zum Beispiel den Aufbau kompakter Greifersysteme. Diese technische Lösung eines sensorlosen Antriebs- und Steuerungskonzepts bietet verschiedene Ansätze zur Ergänzung vorhandener Antriebssys- teme im Bereich der Exoprothetik und Orthetik. Des Weiteren können aktive Elemente auf Basis von »smart materials« den Kraftkontakt an der Knochen-Implantat-Schnittstelle beeinflus- sen und ermöglichen somit aktive Implantate.

- 1 *Auf einer elektrodynami- schen Multiaxial-Schwingprüf- anlage werden Road Simulation Tests durchgeführt.*
- 2 *Eine adaptive Spindelhalterung auf Basis von Piezoaktoren unter- stützt die Schwingungskompensation in Werkzeugmaschinen.*
- 3 *Mit Hilfe eines 3D-Laservibro- meters werden die modalen Pa- rameter eines Beckenknochens bestimmt, die zur Erstellung realitätsnaher Knochenmodelle benötigt werden.*

Herausgeber

Fraunhofer-Institut für
Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU
Reichenhainer Straße 88
09126 Chemnitz

Telefon +49 371 5397-0
Fax +49 371 5397-1404
info@iwu.fraunhofer.de
www.iwu.fraunhofer.de

Abteilung Adaptronik

Dipl.-Ing. André Bucht
Telefon +49 351 4772-2344
Fax +49 351 4772-6-2344
andre.bucht@iwu.fraunhofer.de

Bildquellen

© Fraunhofer IWU

© Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik IWU 2021