

Zeitschrift: Tec21
Herausgeber: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Band: 129 (2003)
Heft: 19: Adaptive Werkstoffsysteme

Artikel: Auf dem Weg zu intelligente Baumaterialien: adaptive Werkstoffsysteme - Eine aktuelle Übersicht
Autor: Meier, Urs
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-108746>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 14.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Auf dem Weg zu intelligenten Baumaterialien

Adaptive Werkstoffsysteme – Eine aktuelle Übersicht

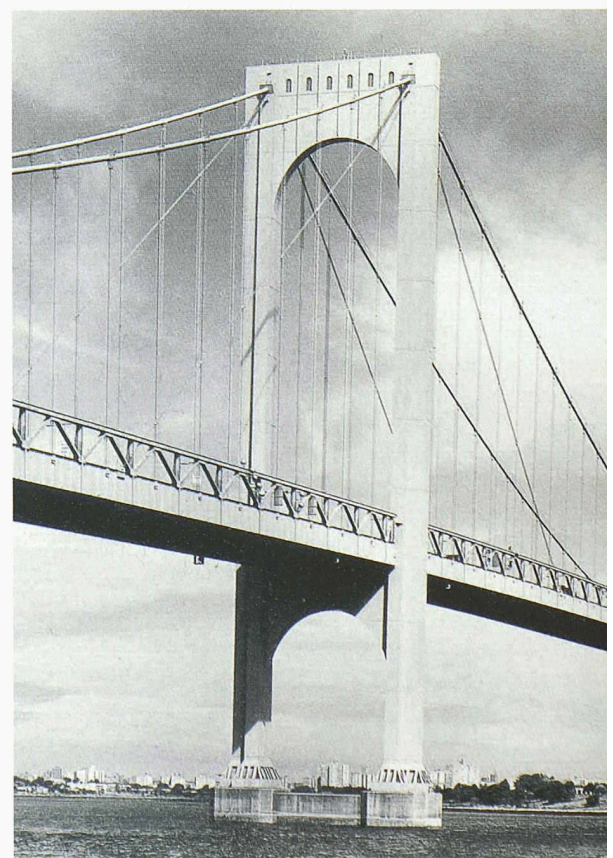
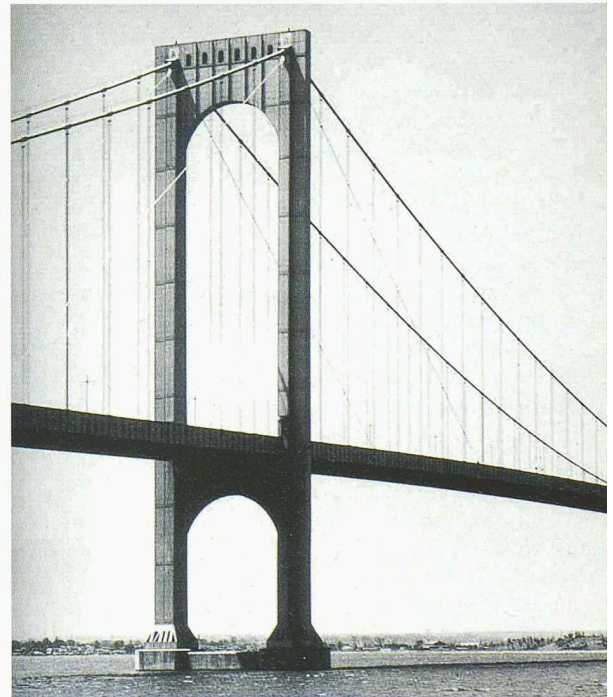
Die Natur macht es seit Hunderttausenden von Jahren vor: Anpassungsfähige, adaptive Systeme sind erfolgreich. Nicht die Härte des Holzes allein sichert das Überleben eines Baumes, sondern auch seine Möglichkeit, die Oberfläche der Blätter an den Wechsel von Temperatur und Sonneneinstrahlung anzupassen. Erst heute beginnt die Technik, von der Natur zu lernen und den Evolutionsschritt vom einmal geformten passiven, «fertigen» Bauteil zum sich wandelnden aktiven, «intelligenten» System anzugehen.

Innovative Produkte helfen Märkte sichern, ausbauen oder erschliessen. Wenn es um die Reduktion von Schwingungen, um Nano-Positionierungen (Positionierungen im Bereich von wenigen Millionsteln eines Millimeters) oder generell um die Optimierung physikalischer Zustände geht, sind adaptive Werkstoffsysteme für die zukünftige Produktentwicklung von herausragender Bedeutung. Die Empa will mit ihrem Innovationsprogramm «Adaptive Werkstoffsysteme» innerhalb der kommenden zwei Jahre ein Kompetenzzentrum im Bereich der adaptiven Werkstoffe, Strukturen und Systeme aufbauen. Dieses soll die Umsetzung von modernen Entwicklungen und Erkenntnissen in die Praxis fördern und der Industrie für anwendungsorientierte Forschung und anspruchsvolle Dienstleistungen zur Seite stehen.

Was sind adaptive Werkstoffsysteme?

Adaptive Werkstoffsysteme (intelligente Werkstoffe, intelligente Strukturen, multifunktionale Werkstoffe, Adaptronics, Smart Materials, wissensbasierte multifunktionelle Werkstoffe etc.) sind in der Lage, während des Einsatzes selbstständig auf Änderungen der Umgebungsbedingungen zu reagieren und ihre Eigenschaften sinnvoll anzupassen. Im allgemeinen Fall sind adaptive Werkstoffsysteme aus folgenden funktionalen Grundelementen aufgebaut:

- Sensoren dienen zur Wahrnehmung bzw. Intensitätsmessung der Umgebungseinflüsse oder inneren Betriebszustände, wie z. B. Druck, Temperatur, Feuchtigkeit oder elektromagnetische Felder. Sie sind

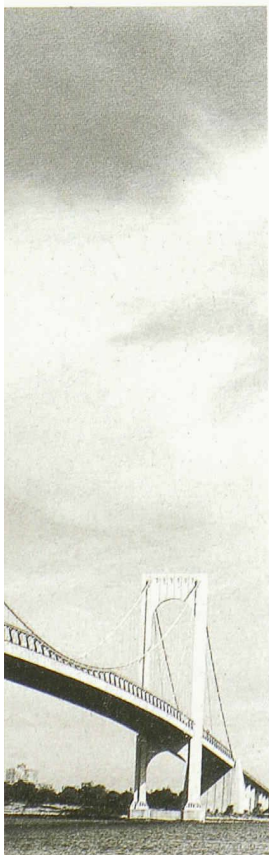
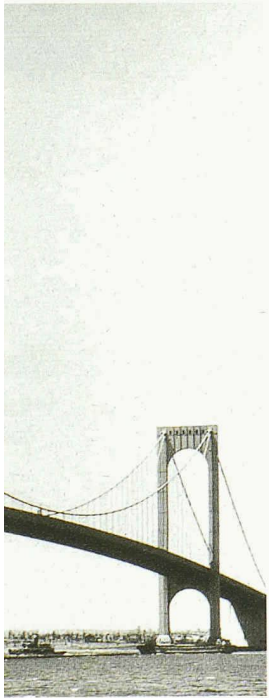


1a

Die Bronx-Whitestone-Hängebrücke von O. Ammann über den East River in New York im Jahre 1941 ohne Versteifungsträger

1b

Die Bronx-Whitestone-Brücke im Jahre 1946. Der Einsturz der Tacoma-Brücke im November 1940 infolge aerodynamischer Instabilität veranlasste den Eigentümer, die Bronx-Whitestone-Brücke mit Versteifungsträgern ausrüsten zu lassen (Bilder: Empa Dübendorf)



entweder in den Werkstoff bzw. in die Struktur eingebaut oder auf der Oberfläche aufgebracht.

- Aktoren (Stellelemente) ermöglichen die aktive Beeinflussung von strukturellen oder funktionalen Eigenschaften, wie z. B. eine Veränderung von Geometrie, Steifigkeit oder Farbe.
- Steuermechanismen setzen die Sensorinformationen in Signale zur Regelung des Aktors um. Dies geschieht entweder gemäss einem dem System eingprägten festen funktionalen Zusammenhang oder in Form eines extern eingebrachten Steueralgorithmus.
- Eingebaute Datenübertragungsmechanismen sind zur Kommunikation zwischen Sensor, Aktor und Steuerung erforderlich.
- Das zugrunde liegende Trägermaterial bestimmt die strukturellen Basiseigenschaften des Systems.

Würden wir eine umfassende Klassifikation adaptiver Werkstoffsysteme vornehmen, kämen wir typischerweise auf eine Tabelle mit 7 Spalten und rund 15 Zeilen¹. In dieser Übersicht wollen wir uns auf wenige repräsentative Gruppen konzentrieren.

Piezoaktive Materialien

Zu den wichtigsten adaptiven Werkstoffen zählen die so genannten piezoaktiven Materialien. Bei einigen kristallinen Werkstoffen, nämlich Keramiken und Polymeren, werden bei mechanischer Verformung durch Zug oder Druck an der Oberfläche elektrische Ladungen erzeugt, so dass ein linearanaloges Spannungssignal entsteht. Dieser direkte piezoelektrische Effekt ist umkehrbar, d. h. bei Anlegen einer Spannung erfährt der Körper eine proportionale Dicken- oder Längenänderung (inverser piezoelektrischer Effekt).

Der bekannteste kristalline piezoaktive Werkstoff ist Quarz. Allerdings weist Quarz eine geringe Dehnungseffizienz auf. Den grössten Dehnungseffekt findet man bei der piezoelektrischen Keramik Blei-Zirkonat-Titanat (PZT), die daher meist als Aktor und Sensor verwendet wird. Insbesondere für sensorische Anwendungen interessant sind piezoelektrische Polymere als Folien wie Polyvinyliden-Fluorid (PVDF). Die Piezoelektrizität basiert auf den polaren Eigenschaften des Polymers, die bei der Herstellung durch ein starkes elektrisches Feld eingestellt werden.

PZT-Keramiken können zurzeit mechanische Spannungen von bis 30 MPa umsetzen. Der direkte und der inverse piezoelektrische Effekt werden dabei sowohl einzeln wie auch gemeinsam technisch angewendet.

Piezoelektrische Fasern

Herstellung und Integration von piezoelektrischen Fasern, deren Durchmesser kleiner als 30 Mikrometer (30×10^{-6} m) ist, stehen am Anfang einer Entwicklung, die zu einem neuen Typ adaptiven Leichtbaumaterials führen soll. Die Funktionen des Sensors und des Aktors übernehmen die piezoelektrischen Keramikfasern, die im Faserverbundwerkstoff ansteuerbar sind. Sie lassen sich so beispielsweise als integrierte Druck- bzw. Biegesensoren nutzen. Wirtschaftlich interessante Anwendungsfelder sind die passive und die aktive Vibrationsdämpfung, die Schadenserkennung oder die

Geometriekontrolle. Dünne PZT-Fasern erlauben auch die Konstruktion neuartiger Ultraschallsonden.

Glasfasern

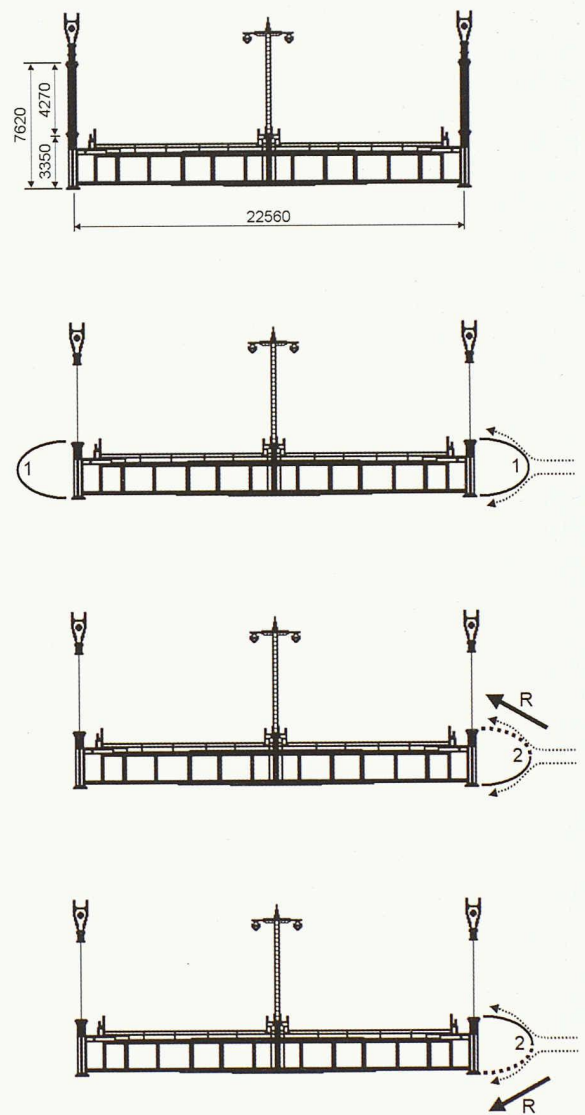
Neben ihrer Funktion als Lichtwellenleiter entwickeln sich Glasfasern immer mehr zu einem vielseitigen Sensormaterial. Dabei reicht die Sensorfunktion von einfachen binären Aussagen (z. B. Unterbrechung des Lichtdurchganges durch Faserbruch) bis zu quantitativen Messungen einer Reihe von Grössen wie Temperatur, Druck oder Spannungen/Dehnungen und die Transmissionsbedingungen des Lichtes (Intensität, Polarisation, Phase).

Das grosse Potenzial der Glasfasern für die Nutzung von adaptiven Werkstoffsystemen liegt in der einfachen Integration in Faserverbundstrukturen. Die faseroptischen Sensoren werden während des Herstellungsprozesses in den Werkstoff (z. B. Polymermatrix) implantiert und bleiben während der Nutzungsphase intakt und für Abfragen erreichbar. Eine weitere interessante Nutzungsoption bieten Glasfasern bereits während der Fertigungsphase eines faserverstärkten Verbundwerkstoffes. Da insbesondere die genaue Kontrolle der Temperatur- und Druckverhältnisse während des Aushärtungsprozesses einen wesentlichen Einfluss auf die Struktureigenschaften hat, werden faseroptische Sensoren zunächst zur Kontrolle des Härtungsprozesses und anschliessend zur Überwachung der strukturellen Integrität eingesetzt. Das Spektrum reicht hierbei von der Schadensentdeckung bei Rissen durch die Unterbrechung der Faser bis zur permanenten Messung der Belastung des Verbundmaterials. Bild 3a zeigt ein Rasterelektronenmikroskop-Bild eines faseroptischen Sensors integriert in einen aus kohlenstofffaserverstärkten Polymeren hergestellten Draht. Die Sensorfaser wurde für die langfristige Überwachung des Bauteils integriert, konnte jedoch bereits bei der Produktionsüberwachung des Drahtes erfolgreich zur Qualitätssicherung eingesetzt werden (Bilder 3b und c).

Ausgewählte Zukunftspotenziale

Das deutsche Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technik (BMBF) hat eine breit angelegte «Vorausschau auf Wissenschaft und Technik» beim Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung der Fraunhofer Gesellschaft in Auftrag gegeben. Mehr als 2300 Experten waren gesamthaft an der Erarbeitung der so genannten Delphi-Studie beteiligt. Im Folgenden werden daraus ausgewählte Thesen zum Thema adaptive Werkstoffsysteme vorgestellt. Die Jahreszahlen grenzen den mutmasslichen Zeitraum der Verwirklichung ein.

- 2008–2012: Adaptive Strukturen (Smart Skins, Adaptive Flügel) sind im Flugzeug- und Schiffbau serienmässig im Einsatz. Diese Systeme könnten aber auch für den Brückenbau interessant werden (Bilder 1a, 1b, 2a und 2b). Die Bilder 2c und 2d vermitteln entsprechende Konzepte.
- 2012–2020: Verbundwerkstoffe werden entwickelt, die sich bei Belastung durch Festigkeitsänderungen anpassen, wodurch z. B. bei Autos die Fahrfunktion



2a

Querschnitt der Bronx-Whitestone-Brücke im Zustand 1946 bis 2002 mit Versteifungsträgern

2b

Querschnitt Bronx-Whitestone-Brücke im Zustand Ende 2003. Die Versteifungsträger werden entfernt, um die Hauptkabel zu entlasten, und durch sehr leichte, passive aerodynamische Verkleidungen (1), so genannte Wind Fairings aus glasfaserverstärkten Kunststoffen, «ersetzt»

2c + d

Querschnitt Bronx-Whitestone-Brücke im Zustand 20XX. Die passiven aerodynamischen Verkleidungen werden durch adaptive Oberflächen (2) ergänzt und können entsprechend den Erfordernissen einer optimalen, aktiven Dämpfung des Brückenträgers angesteuert werden. Die Veränderung der Oberflächen kann beispielsweise mit Hilfe von elektroaktiven Polymeren erreicht werden (Bilder: Empa Dübendorf)

nen Fortschritte machen, die Vibrationsbeständigkeit erhöht wird und das Fahrgefühl sowie das Verhalten bei Kollisionen hochgradig verbessert wird.

- 2012–2015: Entwicklung von Innenausstattungs-materialien, in die bereits Sensoren für Raumtemperatur und Luftfeuchtigkeit sowie Kontrollelemente für die Raumatmosfera integriert sind.

- 2008–2017: Sensoren aus stabilen Materialien sind weit verbreitet, die als Implantate die Dosierung lebenswichtiger Medikamente steuern.
- 2005–2010: Es werden Materialien entwickelt, die den Lichtbrechungsindex im elektrischen und magnetischen Feld ausreichend schnell um Faktoren von mehr als 0,1 ändern können.
- 2005–2013: Intelligente Materialien (Formgedächtnislegierungen) werden im Spritzgiess-Formenbau angewendet.
- 2008–2015: Klimatisch «mitdenkende» Baumaterialien gestatten eine weitere Reduktion des Energieverbrauchs, ohne das Wohlbefinden der Menschen in den Gebäuden zu mindern.
- 2007–2011: Durch den Einsatz intelligenter Fenster und Fassadensysteme entfällt der Kühlbedarf für sonneingestrahelte Wärme in Bürogebäuden.
- 2007–2012: Thermotrope und elektrochrome Materialien zur Optimierung der Licht- und Wärmeversorgung in Gebäuden sind weit verbreitet.
- 2012–2028: Baumaterialien und -systeme werden entwickelt, die Funktionen zu Selbstdiagnose und Selbstreparatur besitzen.

Zurzeit gibt es erst wenige praktische Anwendungsbeispiele. Prototypen sind für folgende Applikationen vorhanden:

- Multifunktionale Klappen an Tragflügeln von Verkehrsflugzeugen
- Steuersysteme von Raketen in der Wehrtechnik
- Lärmreduktion an Kreissägen
- Aktive Schwingungskompensation im Fahrzeugbau
- Windkanal mit veränderlicher Geometrie
- Adaptive Antennensysteme

Folgerungen

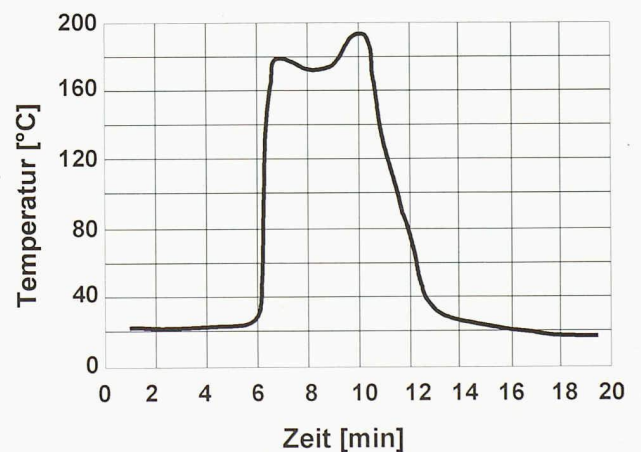
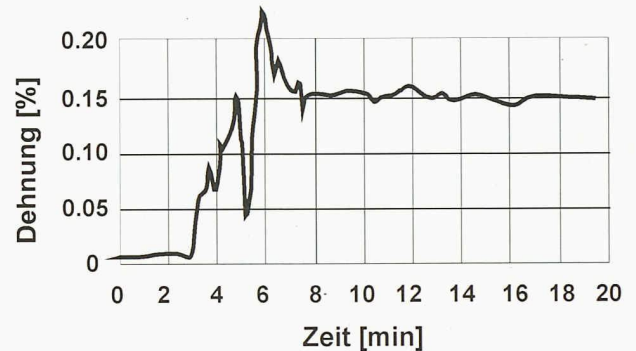
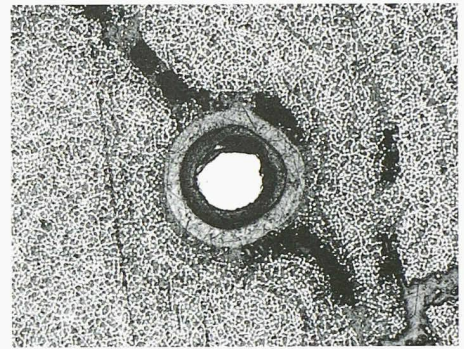
Das Konzept der adaptiven Werkstoffsysteme findet überall dort Anwendung, wo vorhandene konventionelle Lösungen angesichts zunehmend komplexerer werdender Aufgabenstellungen an ihre Grenzen stossen. Diese können einerseits zu aufwändig werden oder zu grosse technische Probleme aufwerfen, so dass einfachere und wirtschaftlichere Alternativen unumgänglich werden. Andererseits eröffnet dieses Konzept ganz neue Nutzungsoptionen, die mit konventionellen Werkstoffen bisher nicht möglich waren.

Auf Grund der in der Delphi-Studie diskutierten Thesen darf generell festgestellt werden, dass Unternehmen in der Schweiz mit ihren fundierten Kompetenzen in den entscheidenden Verfahren, Prozessen und Anwendungsgebieten über ausgezeichnete Mittel verfügen, eine erfolgreiche Zukunft adaptiver Werkstoffsysteme für vielfältige Anwendungen möglich zu machen.

Prof. Urs Meier, Stv. Direktor Empa
Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf
Urs.Meier@empa.ch

Literatur

- 1 Köhnllein, J.: Smart Materials – Intelligente Werkstoffe. Stahlbau 69 (2000), Heft 6, S. 431.



3a

Rasterelektronenmikroskopisches (REM) Bild eines faseroptischen Sensors integriert in einen aus kohlenstofffaserverstärkten Polymeren (CFK) hergestellten Draht. Feine weisse Punkte: Kohlenstofffasern mit 5 Mikrometern Durchmesser. Im Zentrum: Glasfaseroptischer Sensor mit ca. 100 Mikrometern Durchmesser

3b

Online Monitoring der Dehnung während der Produktion des CFK-Drahtes mit dem integrierten faseroptischen Sensor in Bild 1a

3c

Online Monitoring der Temperatur während der Produktion des CFK-Drahtes mit dem integrierten faseroptischen Sensor in Bild 1a (Bilder: Empa Dübendorf)