

Verbundwerkstoffe mit Gedächtnis : auf dem Weg zu intelligenten Strukturen

Autor(en): **Scherrer, Patrick / Gotthardt, Rolf**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **90 (1999)**

Heft 25

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-902032>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Verbundwerkstoffe mit Gedächtnis

Auf dem Weg zu intelligenten Strukturen

Die Entwicklung von intelligenten Werkstoffen, die sich strukturinternen Veränderungen oder wechselnden Umweltbedingungen anpassen können, steckt zwar heute noch in den Kinderschuhen, erste Teilerfolge lassen jedoch auf interessante Anwendungen hoffen. Im Mittelpunkt des Interesses stehen Memory-Legierungen, die auf Grund besonderer thermomechanischer Eigenschaften neue funktionelle Eigenschaften von Verbundwerkstoffen ermöglichen. Dadurch entstehen Bauteile von niedrigem Gewicht, die gleichzeitig Sensor- und Aktorfunktionen übernehmen können.

Inspiziert durch die Natur, insbesondere durch die menschliche Haut, versuchen Forscher Werkstoffe zu kreieren, die sich ihrer Umwelt anpassen, ihren Zustand selbst analysieren, eventuelle interne Schäden diagnostizieren und anzeigen oder sich sogar selbst reparieren können. Zugegeben, was hier mehr nach Science-Fiction als nach handfester Wissenschaft tönt, wird wohl weder morgen noch übermorgen zu unserem Alltag gehören. Es ist jedoch unbestreitbar, dass schon heute erste Schritte in der Entwicklung von sogenannten intelligenten Werkstoffen getan werden. So entstehen zum Beispiel Verbundwerkstoffe, die Sensoren und Aktoren enthalten, mit denen Eigenschaften wie Form, Steifheit, Resonanzfrequenz und andere mechanische Eigenschaften verändert werden können. Die Veränderungen können durch elektromagnetische Felder oder durch Umweltparameter wie beispielsweise die Temperatur gesteuert werden. Diese aktiven Verbundwerkstoffe bestehen aus einer Vielzahl von Materialien, wobei die Sensor- und Aktorfunktionen zumeist von Glasfasern, piezoelektrischen Keramiken, elektro- oder magnetostriktiven Flüssigkeiten oder Memory-Legierungen erfüllt werden. Letztere

faszinieren durch besondere thermomechanische Eigenschaften, die es ihnen erlauben, plastische Verformungen eines Werkstücks durch Temperaturerhöhung rückgängig zu machen. So kann ein gegebenes Werkstück immer wieder seine ursprüngliche Form einnehmen. Die folgenden Beispiele sollen zeigen, wie und zu welchem Zweck Memory-Legierungen in modernen Verbundwerkstoffen eingesetzt werden können.

Was sind Memory-Legierungen?

Memory-Legierungen (engl. Shape Memory Alloys, SMA) sind metallische Werkstoffe, die neben ihrem Formgedächtnis ein sehr hohes Dämpfungsvermögen und eine sehr grosse Elastizität (genannt Superelastizität) aufweisen können. Grundlage für diese Eigenschaften ist die sogenannte martensitische Phasenumwandlung (MP). Bei höheren Temperaturen ist die stabile Struktur des Kristallgitters kubisch und wird Austenit genannt. Kühlt man die Memory-Legierung ab, so entstehen unterhalb einer bestimmten kritischen Temperatur M_s in der austenitischen Matrix inselartige Zonen einer neuen Struktur, der martensitischen Phase. Diese Martensitplättchen vergrössern sich mit abnehmender Temperatur, bis sie beim Erreichen einer bestimmten Temperatur M_f ($< M_s$) die austenitische Struktur fast vollständig verdrängt haben. Die Umwandlung ist umkehrbar (reversibel) und weist eine Temperaturhysterese auf. Umwandlungstemperaturen und Hy-

sterese sind stark von den Legierungskomponenten und deren quantitativer Zusammensetzung abhängig.

Formgedächtnis

Ein Bauteil aus einer Memory-Legierung kann im abgekühlten martensitischen Zustand verformt werden. Wird das Bauteil anschliessend erwärmt, beginnt es sich oberhalb der Temperatur A_s wieder in Austenit umzuwandeln. Beim Erreichen einer spezifischen Temperatur A_f ($> A_s$) ist die Struktur wieder fast vollständig austenitisch, und das Bauteil hat seine ursprüngliche Form wiedererlangt. Lässt man das Bauteil abkühlen, kann der Zyklus von neuem durchlaufen werden. Es handelt sich bei diesem Verhalten um den Einweg-Gedächtnis-Effekt. In diesem Falle ist bei jedem Zyklus eine Verformung des Bauteils durch eine externe (mechanische) Spannung erforderlich.

Dies ist beim Zweiweg-Gedächtnis-Effekt nicht notwendig. Dieser Effekt muss dem Bauteil antrainiert werden. Dies geschieht, indem man es verformt und dann bei gleichbleibender Spannung mehreren thermischen Zyklen unterzieht. Dadurch wird verhindert, dass das Bauteil während des Erwärmens zu seiner ursprünglichen Form zurückkehren kann. In Abhängigkeit von der angelegten Spannung (Richtung, Intensität etc.) werden bei der Umwandlung nur ganz bestimmte Martensitvarianten favorisiert, die sozusagen zur Signatur des verformten Bauteils werden. Entfernt man nach zahlreichen Trainingszyklen die Spannung, so reichen nun Temperaturveränderungen aus, um das Bauteil in die eine oder andere Form zu bringen. Beim Abkühlen bilden sich die antrainierten Martensitvarianten, während sich beim Erwärmen wieder Austenit bildet und das Bauteil seine ursprüngliche Form wiedererlangt.

Hohes Dämpfungsvermögen und Superelastizität

Das hohe Dämpfungsvermögen der Memory-Legierungen entsteht durch die grosse Anzahl von mobilen Grenzflächen zwischen martensitischen und austenitischen Phasen innerhalb eines Werkstücks. Durch das Einwirken von externen Kräften bewegen sich diese mobilen Grenzflächen, wobei die so erzeugte

Adressen der Autoren

Dr. Patrick Scherrer, Dr. Rolf Gotthardt
EPFL, Physik-Departement DP-IGA
1015 Lausanne, Rolf.Gotthardt@epfl.ch
dpwww.epfl.ch/Gotthardt

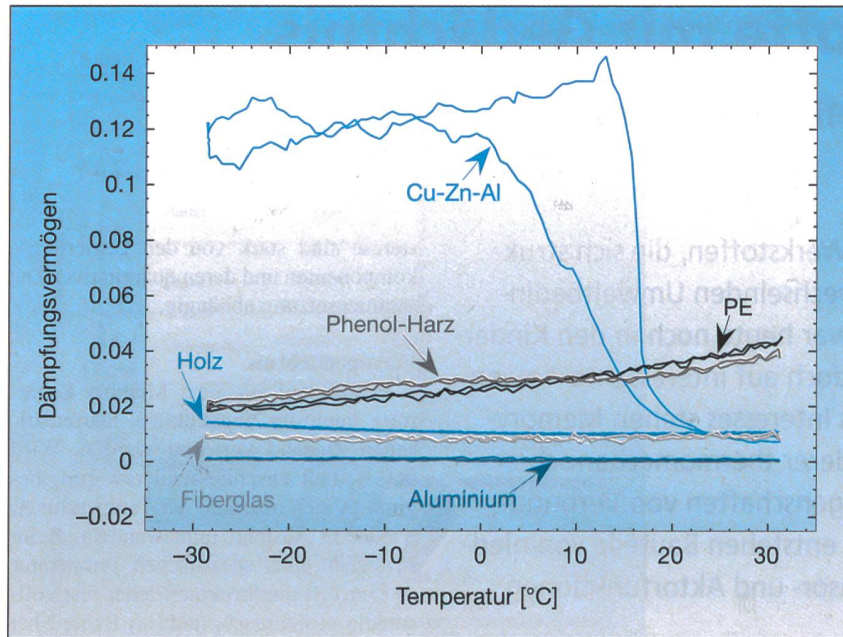


Bild 1 Das temperaturabhängige Dämpfungsvermögen der Skikomponenten (PE = Polyethylen)
 Das Dämpfungsvermögen der Memory-Legierung nimmt mit abnehmender Temperatur zu. Nur Holz hat ein ähnliches, jedoch weniger ausgeprägtes Verhalten.

«Bewegungsenergie» durch das Einwirken von Reibungskräften in Wärme umgewandelt wird. Daher entsteht ein sehr effizienter Dissipationsmechanismus.

Superelastische Memory-Legierungen weisen eine sehr hohe elastische Dehnbarkeit auf. Wird ein Bauteil aus einer superelastischen Memory-Legierung in austenitischem Zustand einer grösseren mechanischen Spannung ausgesetzt, so kann partiell die martensitische Struktur induziert werden. Dies führt zu einer makroskopischen Verformung des Bauteils, die, obwohl sie bis zu 8% betragen kann, vollständig reversibel ist.

Adaptive Vibrationsdämpfung in Alpinskiern

Die Gleitfähigkeit und Manövrierbarkeit eines modernen Alpinski werden in bedeutender Weise durch sein Dämpfungsverhalten beeinflusst. Während der Fahrt auf einer Skipiste werden die Skiflächen einer grossen Anzahl von sehr kleinen bis grösseren Unebenheiten ausgesetzt. Dabei wird der Ski zu Vibrationen angeregt. Die Vibrationsfrequenzen hängen von der Beschaffenheit der Schneeoberfläche, vom Skityp und vom Fahrstil ab und bewegen sich zumeist im Niederfrequenzbereich von 10 bis 100 Hz. Auf lockerem, weichem Pulverschnee trägt das Medium, in dem sich der Ski bewegt, selbst zur schnellen Vibrationsdämpfung bei. Auf sehr kalten, harten oder sogar vereisten Pisten ist dies kaum mehr der Fall. Die Vibrationen

haben dann ein Abheben von Teilen der Skifläche und der Skikanten zur Folge. Dieser Kontaktverlust verursacht eine Störung oder sogar einen Abriss der seitlichen Fliesskräfteverteilung am Ski. Daraus resultierende Drehmomente reissen den Ski aus der Spur und müssen vom Skifahrer mit erhöhtem Kraftaufwand kompensiert werden. Werden die Vibrationen nicht durch die Skistruktur gedämpft, so übertragen sie sich auf den Fahrer und beeinträchtigen den Fahrkomfort.

Dämpfungssysteme

Diesem bei tiefen Temperaturen erhöhten Dämpfungsbedarf genügen Werkstoffe, deren Dämpfungsvermögen mit abnehmender Temperatur steigt. Vergleiche zwischen verschiedenen im modernen Skibau eingesetzten Materialien haben gezeigt, dass das Naturprodukt Holz diese Anforderung besonders gut er-

füllt. Daraus resultiert das in den letzten Jahren neu entstandene Interesse an Alpinskiern mit Holzkern. Im Bereich des Wettkampfsports zeigt sich jedoch, dass dies noch nicht ausreichend ist. Mehrere Skihersteller haben zusätzliche Dämpfungssysteme entwickelt, die jedoch meistens den Nachteil aufweisen, dass sie nicht in der Skistruktur integriert sind, sondern auf der Skioberfläche oder zwischen Ski und Bindung montiert werden. Diese Systeme passen sich daher nur ungenügend der Schneetemperatur an und verursachen oft ein nicht zu unterschätzendes Mehrgewicht.

Dämpfungselemente aus Cu-Zn-Al

Zusammen mit der Firma Stöckli Ski hat das Physik-Departement der EPFL die Möglichkeit erforscht, das temperaturabhängige, hohe Dämpfungsvermögen von Memory-Legierungen zu nutzen. Vergleiche zwischen verschiedenen Legierungen haben ergeben, dass eine Legierung aus Kupfer, Zink und Aluminium (Cu-Zn-Al) die physikalischen und technischen Anforderungen ebenso erfüllt wie die Kostenanforderungen. Die Vorteile liegen in der Kombination von temperaturabhängigem Dämpfungsvermögen* (bis $1,2 \cdot 10^{-1}$ bei -30°C) und der grossen Steifheit ($50 \text{ GPa} < E < 60 \text{ GPa}$) des Materials. Hochdämpfende Polymere scheiden meistens wegen ihrer geringen Steifheit aus. Die Herstellungskosten von Cu-Zn-Al liegen darüber hinaus im Rahmen von anderen handelsüblichen Legierungen. Andere weitverbreitete Memory-Legierungen wie Nickel-Titan erweisen sich bei gleicher Wirkung um ein mehrfaches teurer.

Die von der Firma UMS/Swissmetal gelieferte Cu-Zn-Al-Legierung wurde zu 0,5–0,7 mm dicken Platten gewalzt und anschliessend auf eine Grösse von $400 \times 40 \text{ mm}^2$ zugeschnitten. Die so entstandenen Dämpfungselemente wurden dann einer geeigneten Hitzebehandlung unterzogen, um die austenitische Phase zu induzieren. Mit einem Dämpfungsver-

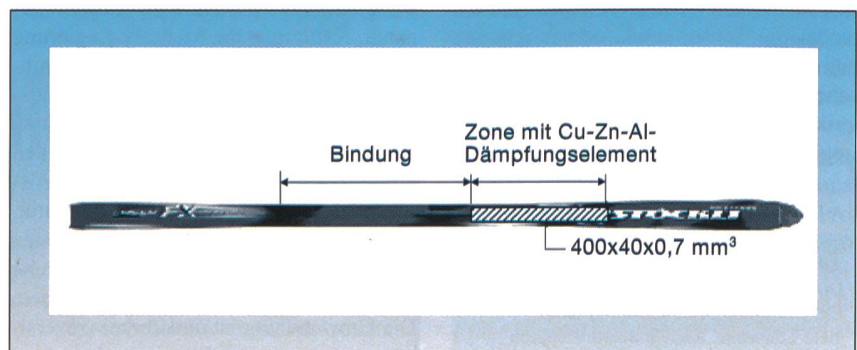


Bild 2 Die Dämpfungselemente aus Memory-Legierung werden vor der Bindung in die Skistruktur eingebaut.

mögen dieser Elemente von 10^{-1} schneidet die Memory-Legierung fünf- bis zehnmal besser ab als andere in Skiern verarbeitete Materialien (Bild 1).

Ein Dämpfungselement wird an der Stelle des Skis eingebaut, wo sich am meisten Energie aufstaut. Beim Ski ist dies die Zone, die sich vor der Bindung befindet (Bild 2). Bei einem Querschnitt durch die Skistruktur werden die verschiedenen Werkstoffschichten sichtbar. Da das Dämpfungsverhalten massgeblich durch die Scherkräfte bestimmt wird, baut man das Dämpfungselement mit möglichst grossem Abstand von der neutralen Fläche des Skis entfernt ein. Dabei muss beachtet werden, dass die direkt an das Element angrenzenden Schichten nicht allzu unterschiedliche mechanische Eigenschaften aufweisen, da die Effizienz des Dämpfungsmechanismus sonst erheblich herabgesetzt wird.

Verbessertes Dämpfungsvermögen

Die modifizierten Skier wurden in einer Kühlkammer Vibrationstests unterzogen und mit dem Standardski verglichen. Die Testfrequenz von 13 Hz entspricht der fundamentalen Resonanzfrequenz der Skier. Das generelle Dämpfungsvermögen konnte durch den Einbau des Dämpfungselements bei Raumtemperatur um 20% erhöht werden. Bei tiefen Temperaturen (bis -30°C) ist im Vergleich zum Standardski eine Verbesserung von bis zu 40% möglich (Bild 3). Es ist daher gelungen, durch den Einbau von Elementen aus einer Memory-Legierung eine adaptive Skistruktur zu kreieren. Die Sensorfunktion (Temperaturmessung) wird dabei vom adaptiven Element selbst übernommen.

SMA-Verbundwerkstoffe

Insbesondere bei Transportmitteln wie Flugzeugen, Eisenbahnen und Kraftfahrzeugen werden grossflächige und damit vibrationsanfällige Bauteile eingesetzt. Um die Anregung von Vibrationen zu verhindern, werden die Bauteile versteift, was jedoch mit zusätzlichem Gewicht, einem höheren Energieverbrauch und geringerer Nutzlast erkauft wird. Es scheint deshalb besonders interessant, einen Werkstoff zu entwickeln, der in der Lage ist, seine Steifheit und seine Resonanzfrequenzen zu verändern (Bild 4). Dies kann mit Hilfe von Memory-Legierungen realisiert werden. Dazu werden gedehnte

* Unter dem Dämpfungsvermögen versteht man das Verhältnis von aufeinanderfolgenden Schwingungsamplituden. Der Wert von 10^{-1} bedeutet also, dass die Amplitude in jeder Schwingungsperiode auf ein Zehntel abfällt.

Bild 3 Vergleich des temperaturabhängigen Dämpfungsvermögens zwischen Standardski und modifiziertem Ski

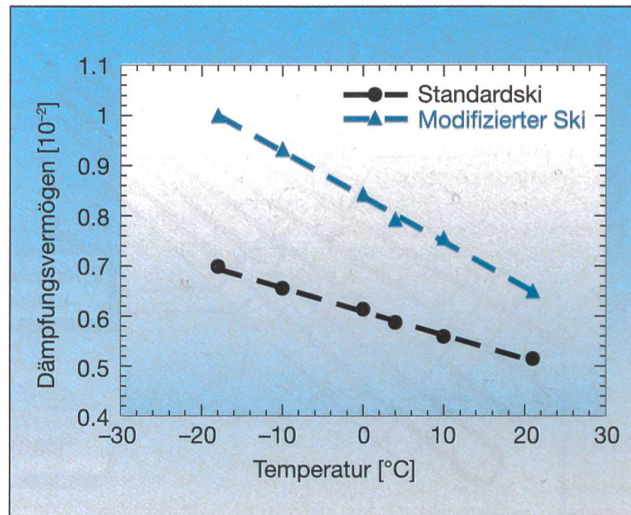
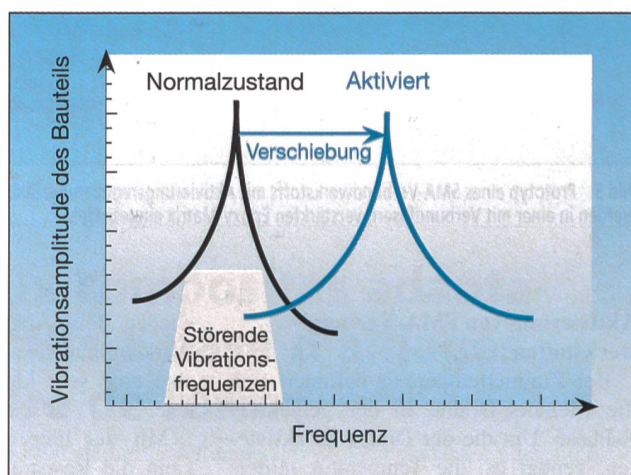


Bild 4 Tuning der Eigenfrequenz: durch die Aktivierung des Werkstoffs kann die Eigenfrequenz gegenüber den störenden Vibrationsfrequenzen verschoben werden.



Drähte einer Memory-Legierung in eine Epoxy-Matrix eingebettet. Wenn nun die Temperatur erhöht wird, können sich die Drähte nicht auf ihre ursprüngliche Länge verkürzen. Deshalb bauen sich Kräfte (engl. Recovery Forces) auf, die die Matrix komprimieren und die Struktur versteifen.

R-Phase in Nickel-Titan

In einigen Memory-Legierungen wie dem binären Nickel-Titan erfolgt die Umwandlung des Austenits in Martensit nicht direkt, sondern über die Zwischenstufe der sogenannten R-Phase. Die Umwandlung von Austenit in die R-Phase kann als eine spezielle martensitische Phasenumwandlung angesehen werden, die sich von der gewöhnlichen Form der Umwandlung durch eine 2,5mal höhere Krafrate ($d\sigma/dT=15,6 \text{ MPa}/^{\circ}\text{C}$) auszeichnet. Sie führt daher bereits bei kleinen Temperaturveränderungen zu vergleichsweise grossen Umwandlungskräften. Zusätzlich garantiert die kleine Temperaturhysterese (2°C) eine präzisere Aktivierung, und die kleine Umwandlungsverformung (0,6%) vermindert die Spannungen an den Grenzflächen

zwischen den Memory-Drähten und der Matrix. Allzu hohe Spannungen könnten mit der Zeit zu Rissen und zur Ablösung der Drähte von der Matrix führen. Diese Eigenschaften erweisen sich allesamt als sehr vorteilhaft für die Verwendung von Drähten aus Nickel-Titan in Verbundwerkstoffen.

Plattenförmige Elemente mit Memory-Drähten

Die zur Konzeptprüfung hergestellten plattenförmigen Elemente bestehen aus einer Epoxy-Matrix, in der Drähte aus Nickel-Titan (50,17 Atomprozent Nickel) mit einem Durchmesser von 0,3 mm eingebettet werden. Nach einer geeigneten Hitzebehandlung der Drähte ist die R-Phase die stabile Struktur bei Raumtemperatur. Die Drähte werden um 2,5% gedehnt und in eine Giessform gespannt. Anschliessend wird das flüssige Epoxyharz in die Form gegossen und im Ofen bei 80 beziehungsweise 140°C gehärtet. Die fertigen Elemente ($150 \times 10 \times 0,7 \text{ mm}^3$) enthalten je 5 Drähte aus Nickel-Titan (Bild 5). Dies entspricht 5% des Gesamtvolumens eines Elements aus SMA-Verbundwerkstoff.

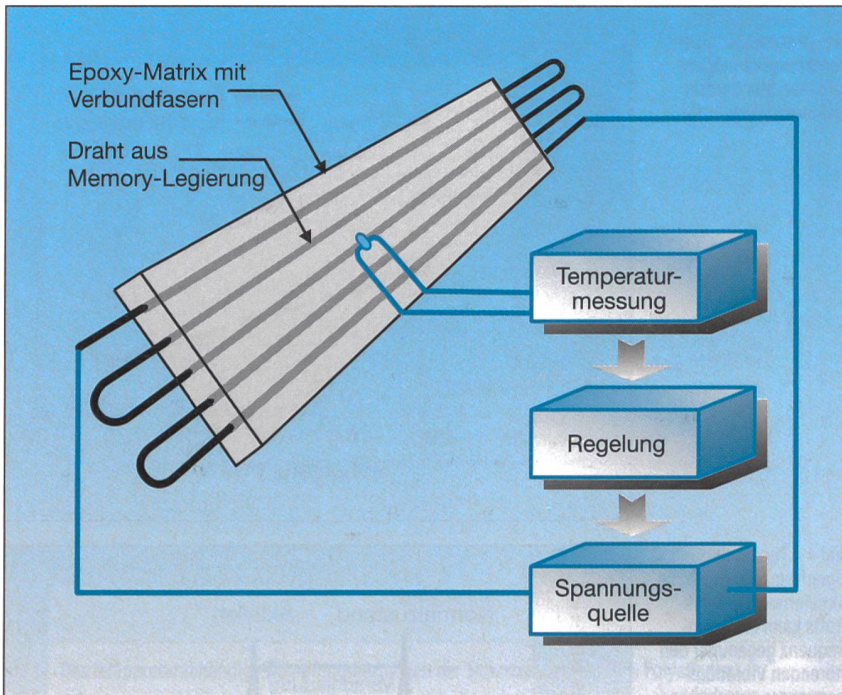


Bild 5 Prototyp eines SMA-Verbundwerkstoffs mit Aktivierungsregulierung: Drähte aus Memory-Legierung werden in einer mit Verbundfasern verstärkten Epoxy-Matrix eingebettet.

Aktivierung von SMA-Verbundwerkstoffen

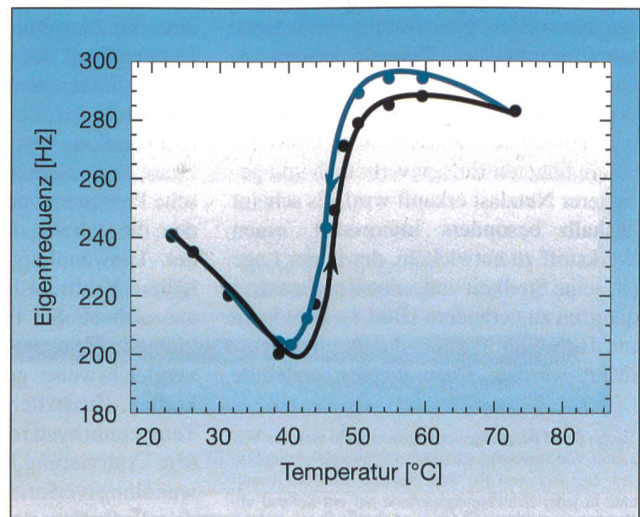
Bei Zimmertemperatur befinden sich die Memory-Drähte in der gedehnten R-Phase. Um die der Drähte zu aktivieren, genügt es, die Temperatur mittels direkten Stromdurchgangs so weit zu erhöhen, bis sich die Legierung in Austenit umwandelt. Da dieser Phasenübergang mit einer Kontraktion der Legierung verbunden ist, die Drähte jedoch fest in einer Matrix eingebunden sind und daher nicht schrumpfen können, entstehen Spannungen im Werkstoff, die zu einer höheren Steifheit und damit zu höheren Resonanzfrequenzen führen.

Die Messung der thermischen Ausdehnung des Werkstoffs in Abhängigkeit der Temperatur zeigt keinen monotonen Verlauf. Zunächst dehnt sich der Werkstoff auf Grund der Erwärmung der Epoxy-Matrix aus (Bild 6). Sobald die Temperatur 42°C erreicht, beginnt die Umwandlung der Drähte von der R-Phase in Austenit. Dieser Vorgang ist von einer der thermischen Ausdehnung entgegengesetzten Kraft begleitet, die das Verhalten des Werkstoffs wegen ihrer hohen Kraft-rate ($d\sigma/dT$) sogar dominiert und zu einem leichten Schrumpfen führt. Dabei erhöht sich die Resonanzfrequenz schlagartig. Wenn die Umwandlung in Austenit bei rund 60°C vollständig ist, beginnt die thermische Ausdehnung wieder das Verhalten des Werkstoffs zu bestimmen. Dann sinkt auch die Resonanzfrequenz

wieder. Beim Abkühlen verhält sich der Werkstoff annähernd identisch; er zeigt also eine sehr kleine Temperaturhysterese.

Mit der hier geschilderten Technik kann die Resonanzfrequenz des Werkstoffs um bis zu 50% verändert werden, wobei Temperaturvariationen von etwa 20°C notwendig sind. Der so hergestellte Werkstoff vereinigt in seiner Struktur Sensoren und Aktoren, die von aussen geregelt werden können. Man spricht von einer aktiven Struktur. Wird diese mit einer adäquaten Regelungsautomatik ausgestattet, entsteht ein intelligentes System.

Bild 6 Temperaturabhängige Eigenfrequenz eines plattenförmigen Elements aus SMA-Verbundwerkstoff



Das Adapt-Projekt

Die Integration von Memory-Legierungen scheint also einige grundlegende Vorteile zu bieten. Das grosse Interesse an SMA-Verbundwerkstoffen spiegelt sich auch in der steigenden Zahl an Publikationen in der Fachliteratur wider. Meistens handelt es sich dabei um Konzeptstudien, die zeigen sollen, welches Potential in dieser Technologie steckt, sich aber nur sehr lückenhaft mit den physikalischen und technologischen Grundlagen von SMA-Verbundwerkstoffen auseinandersetzen. Der Wissensstandard über ihre Eigenschaften muss demzufolge so weit vertieft und verfeinert werden, dass genügend Entscheidungsgrundlagen für eine allfällige industrielle Anwendung vorliegen.

Mit diesem Ziel vor Augen haben sich fünf europäische Partner aus dem akademischen und industriellen Bereich für ein gemeinsames Forschungsprojekt zusammengeschlossen, das von der Europäischen Kommission mit 1,6 Millionen Ecu finanziert wird. Das Projekt mit dem Titel «Adaptive Composites with Embedded Shape Memory Alloy Wires», kurz Adapt genannt, umfasst ein weitreichendes globales Experimentierprogramm, in dem folgende Bereiche schwerpunktmässig bearbeitet werden: Optimierung der Fabrikationsprozesse für Prototypen von SMA-Verbundwerkstoffen, Verständnis und genaue Quantifizierung der Wirkung von Memory-Drähten in der Matrix, genaue Quantifizierung der funktionellen und thermomechanischen Eigenschaften sowie der Alterung und Abnutzung von SMA-Verbundwerkstoffen, Softwareentwicklung zur Unterstützung beim Design von einfachen Strukturelementen, technische Leitlinien für Design, Herstellung und Anwendung, erste Kosten-Nutzen-

Schätzungen. Jeder der fünf beteiligten Partner kann auf eine langjährige Erfahrung in spezifischen für SMA-Verbundwerkstoffe wichtigen Bereichen zurückgreifen.

Die Koordination des Adapt-Projekts obliegt dem Department of Metallurgy and Materials Engineering (MTM) der Katholischen Universität Leuven (Belgien). Das MTM hat weitreichende Erfahrung in der Charakterisierung, Beschreibung und Modellierung von Memory-Legierungen. Die Departemente für Physik und Werkstoffe der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) zeichnen für Prototypenentwicklung, Produktion und Charakterisierung der funktionalen Eigenschaften von SMA-Verbundwerkstoffen verantwortlich. Das Institute of Chemical Engineering and High Temperature Chemical Processes (Patras/Griechenland) erforscht Kraft- und Verformungsfelder in Verbundwerkstoffen. Von industrieller Seite untersucht Daimler-Chrysler (Deutschland) die Kostenaspekte und führt Vergleiche mit anderen Aktor-Technologien durch, während British Aerospace (England) über das Know-how und die Installationen verfügt, um die Aspekte der industriellen Produktion von SMA-Verbundwerkstoffen zu erforschen. Die für dieses Programm produzierten SMA-Verbundwerkstoffe sind unidirektionale Verbundwerkstoffe, bestehend aus einer im Flugzeugbau verwendeten Epoxy-Matrix mit einem hohen Anteil an Verbundfasern (Aramidfasern) und einem kleineren Anteil an eingebetteten Memory-Drähten. Bei den Legierungen handelt es sich hauptsächlich um Nickel-Titan und Nickel-Titan-Kupfer. Adapt versteht sich als Vorstufe zur Entwicklung von industriellen Applikationen, bei der Grundlagenforschung und angewandte Forschung vereinigt werden.

Noch ist es nicht soweit

Auf Grund ihrer Eigenschaften scheinen Memory-Legierungen besonders interessante adaptive Werkstoffe zu sein. Sie können als Sensor- oder Aktorele-

mente in komplexe intelligente Werkstoffe integriert werden. Die in diesem Artikel vorgestellten Beispiele solcher SMA-Verbundwerkstoffe illustrieren mögliche Anwendungsbereiche. Memory-Legierungen sprechen auf Temperatur, Kraft und Verformung an. Die Werkstoffe besitzen allerdings einige Nachteile, so zum Beispiel ihre schlechte Energieeffizienz, die durch Erhitzungs- oder Kühlungslimiten begrenzte Temperatur-Bandbreite bei der Anwendung und die zum Teil komplexen Fabrikationsprozesse. Zu den Vorteilen zählen aber ganz eindeutig die Zuverlässigkeit, die Einfachheit der Aktormechanismen, ein sauberes, geräuschloses und funkenfreies Funktionsumfeld, die Funktionsfähigkeit in der Schwerelosigkeit und das grosse Kraft-Gewicht-Verhältnis. Bei der Entwicklung von intelligenten Werkstoffen ist die Integration von Memory-Legierungen also durchaus empfehlenswert,

wenn sie auch eine klare und vorausschauende Festlegung der gewünschten Funktionen erfordert.

Literatur

- [1] C.A. Rogers: Intelligent materials. Scientific American, September 1995.
- [2] W. Elspass: Aktive Funktionsbauweisen. Symposium «Faserverbundbauweisen, von der Forschung zum Produkt», ETHZ, Zürich, 1993.
- [3] J. Van Humbeeck: On the adaptivity of shape memory alloys for use in adaptive materials. Proc. 3rd international Conference on intelligent materials, Lyon, 1996.
- [4] P. Scherrer, J.-E. Bidaux, A. Kim, J.-A. E. Månson, R. Gotthardt: Passive vibration damping in an alpine ski by integration of shape memory alloys. Euromat-Mecat 98, Oxford, 1998.
- [5] J.-E. Bidaux, J.-A. E. Månson, R. Gotthardt: Active stiffening of composite materials by embedded shape-memory-alloy fibres. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 459, MRS, 1997.
- [6] R. Stalmans, V. Michaud, J.-E. Bidaux, R. Gotthardt, J.-A. E. Månson: Adaptive composites with embedded shape memory alloy wires. 4th ESSM and 2nd MIMR conference, Harrogate, 1998.

Matériaux composites adaptatifs et actifs à base d'alliages à mémoire de forme

Le développement de matériaux intelligents qui peuvent s'adapter à des altérations de leur structure interne ou à des variations de paramètres environnementaux est encore au stade préliminaire. Il est cependant indéniable que des premiers succès partiels dans la fabrication de ce genre de matériaux sont déjà une réalité aujourd'hui. Sur la base de deux exemples étudiés aux Départements de Physique et de Matériaux de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), cet article décrit les raisons de l'utilisation d'alliages à mémoire de forme (AMF) et les objectifs fixés pour leur intégration dans des matériaux adaptatifs et actifs. La capacité d'amortissement de vibrations d'un ski alpin peut ainsi être améliorée par l'intégration d'éléments en AMF. La structure modifiée du ski est capable de s'adapter à l'environnement en augmentant sa capacité d'amortissement lorsque la température baisse. Dans un autre domaine, l'intégration de fils à mémoire de forme dans une matrice en époxy renforcée avec des fibres est à l'origine d'un matériau composite et actif. Des éléments de structure fabriqués avec ce composite peuvent adapter leur fréquence de résonance par le biais d'une régulation externe. Le potentiel des AMF comme composants dans de futurs matériaux intelligents semble très grand et fait actuellement l'objet d'une analyse détaillée dans le cadre d'un vaste programme européen de recherche scientifique.