

# **Formgedächtnislegierungen im Bauingenieurwesen - eine Vision: die besonderen Eigenschaften der "Memory-Metalle" könnten auch im Bauwesen vielfältig eingesetzt werden**

Author(en): **Czaderski, Christoph / Motavalli, Masoud**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Tec21**

Band(Jahr): **129(2003)**

Heft 19: **Adaptive Werkstoffsysteme**

**Persistenter Link: <http://dx.doi.org/10.5169/seals-108747>**

Erstellt am: **Jan 24, 2012**

## **Nutzungsbedingungen**

Mit dem Zugriff auf den vorliegenden Inhalt gelten die Nutzungsbedingungen als akzeptiert. Die angebotenen Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre, Forschung und für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrücke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und unter deren Einhaltung weitergegeben werden. Die Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern ist nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung des Konsortiums der Schweizer Hochschulbibliotheken möglich. Die Rechte für diese und andere Nutzungsarten der Inhalte liegen beim Herausgeber bzw. beim Verlag.

## **SEALS**

Ein Dienst des *Konsortiums der Schweizer Hochschulbibliotheken*  
c/o ETH-Bibliothek, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz

[retro@seals.ch](mailto:retro@seals.ch)

<http://retro.seals.ch>

# Formgedächtnislegierungen im Bauingenieurwesen – eine Vision

Die besonderen Eigenschaften der «Memory-Metalle» könnten auch im Bauwesen vielfältig eingesetzt werden

**Lange Zeit galten sie lediglich als nette technische Spielereien mit Anwendungen vorwiegend in der Unterhaltungs- und Werbebranche. Formgedächtnislegierungen sind aber mehr als nur kuriose Metalle, die je nach Temperatur ihre Gestalt wechseln. Dank neuen materialtechnologischen Entwicklungen ist das Potenzial dieser Werkstoffe mit den speziellen physikalischen Eigenschaften jetzt auch für die Entwicklung von adaptiven Tragkonstruktionen nutzbar.**

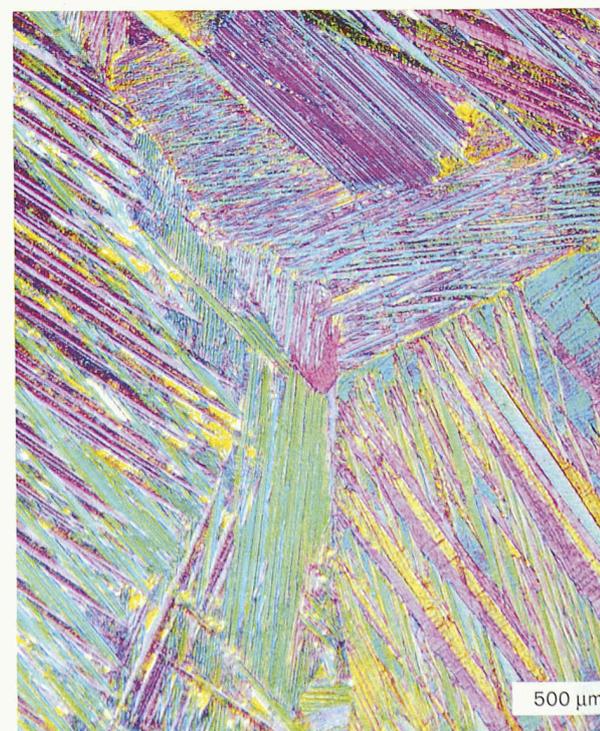
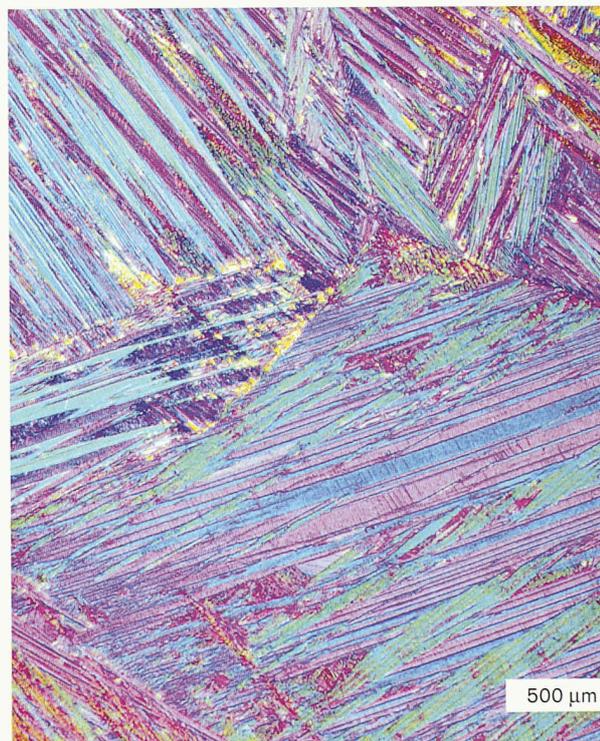
Formgedächtnislegierungen, auch als Shape Memory Alloys (SMA) oder «Memory-Metalle» bekannt, bestehen aus speziellen Legierungen wie zum Beispiel Nickel und Titan (NiTi). SMA sind schon seit Jahrzehnten im Einsatz; gegenwärtig werden sie hauptsächlich in der Medizin, Elektronik, Luft- und Raumfahrt und für Konsumgüter verwendet. Konkrete Umsetzungen finden sich in der Form von medizinischen Implantaten und Instrumenten, Handyantennen, Brillengestellen, Rohrkupplungen usw. Im Bauwesen wird das Material bis heute allerdings nur selten verwendet. Dies wohl aus Unkenntnis, aber auch des hohen Preises wegen. Ein weiterer Nachteil ist der tiefe Elastizitätsmodul.

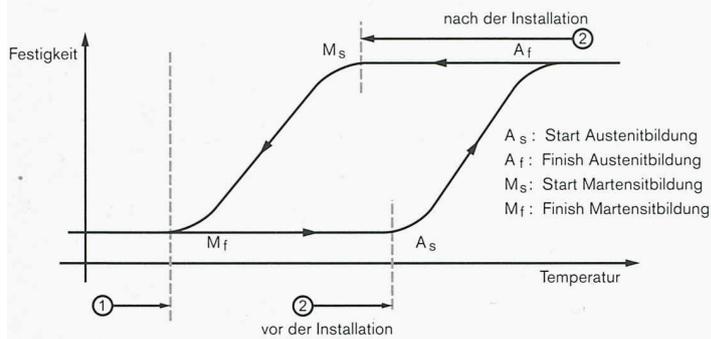
Im Bauwesen werden SMA heute hauptsächlich für dynamische Zwecke eingesetzt, d. h. zur Dämpfung von Erdbebenschwingungen. Auf Grund ihrer mannigfaltigen Eigenschaften eröffnen sich jedoch noch ganz andere Anwendungsgebiete. Im Folgenden werden die Eigenschaften des Materials erklärt und die potenziellen Einsatzgebiete von SMA im Bauwesen beschrieben. Von Interesse sind die folgenden Anwendungen:

- geregelte Vorspannung
- Superelastizität mit hoher Energiedissipation
- fixe Vorspannung, Verbindung oder Verstärkung
- Einsatz als Sensor

## **Eigenschaften des Materials**

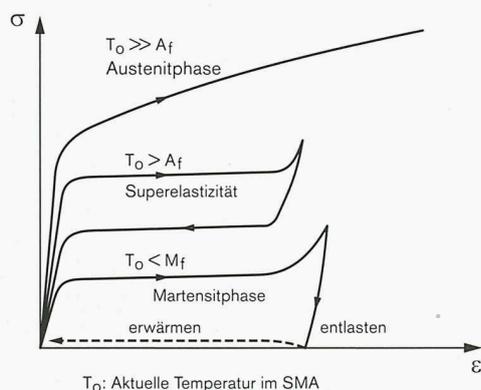
Die wichtigsten der vielen sehr interessanten Eigenschaften von SMA werden nachfolgend beschrieben (siehe beispielsweise auch<sup>1)</sup>).





3

**Schematisches Hystereseverhalten bei den Phasenumwandlungen und Gebrauchstemperaturbereiche Nr. 1 und 2 für verschiedene Anwendungszwecke (Bild: Empa Dübendorf)**



4

**Schematisches Spannungs(σ)-Dehnungs(ε)-verhalten von SMA bei verschiedenen Temperaturen T<sub>0</sub><sup>2</sup>**  
**Martensit: Kristallgitterstruktur der Legierung im Tieftemperaturzustand**  
**Austenit: Kristallgitterstruktur der Legierung im Hochtemperaturzustand**  
**M<sub>s</sub>, A<sub>s</sub>, M<sub>f</sub>, A<sub>f</sub>: Start- und Endtemperaturen (Finish) der Martensit- bzw. Austenit-Abbildung (siehe auch Bild 3).**  
**(Bild: Empa Dübendorf)**

**Aktuelle mechanische Eigenschaften von NiTi<sup>3</sup>**

Elastizitätsmodul Martensit:	ca. 23–41 GPa
Elastizitätsmodul Austenit:	ca. 70–80 GPa
Plateauspannung Martensit:	70–200 MPa
Plateauspannung Austenit:	200–650 MPa
Zugfestigkeit kaltverfestigt:	bis zu 1900 MPa

Die Plateauspannung ist diejenige Spannung, bei der bei gleich bleibender Spannung (σ) die Dehnung (ε) zunimmt (siehe Bild 4).

1 + 2

**Gefügeaufnahmen einer rekristallisierten Kupfer-Zink-Legierung Cu<sub>30</sub>Zn mit Zwillingskörnern. Die Länge des weissen Balkens entspricht 500 Mikrometern (0,5 mm)**  
**(Bilder: Empa Thun)**

- Entsprechend der Temperatur ändern sich Steifigkeit (Elastizitätsmodul) und Festigkeit (Fließgrenze) der SMA (Bild 4).
- Plastische Verformungen können durch Erwärmen rückgängig gemacht werden, d. h. die ursprüngliche Form kann wieder hergestellt werden (Memory-Effekt; Bild 4). Falls dies durch Zwang verhindert wird, entstehen Zwangsspannungen, die sich für eine geregelte oder feste Vorspannung nutzen lassen.
- Im Zustand der Super- oder Pseudoelastizität übertrifft die Elastizität der SMA diejenige der konventionellen Metalle um ein Vielfaches (Bild 4). In diesem Zustand hat das Material auch sehr gute Dämpfungseigenschaften.

Diese Effekte beruhen auf der Tatsache, dass das Material in zwei verschiedenen Phasen mit unterschiedlichen Kristallgitterstrukturen, entweder in der Tieftemperatur-Martensitphase (Bilder 5 und 6) oder in der Hochtemperatur-Austenitphase, vorliegt (Bild 7). Die Phasenumwandlung findet entweder durch mechanische Einwirkung (Superelastizität), durch Änderung der Temperatur oder durch eine Kombination beider Einwirkungen statt. Die Umwandlungstemperaturen weisen ein Hystereseverhalten auf (Bild 3). Durch Wahl der Legierung sowie der Nachbehandlung kann die Hysteresekurve auf der Temperaturachse verschoben und ausserdem die Breite der Hysteresese gewählt werden. Somit kann je nach Anwendungszweck das Hystereseverhalten ausgenutzt und optimiert werden (Bild 3).

SMA werden in verschiedenen Formen, z. B. als Drähte mit unterschiedlichen Durchmessern, hergestellt. Bisher werden Nickel-Titan-Legierungen am häufigsten verwendet (siehe Kasten). Formgedächtnislegierungen sind aber auch auf Kupfer- oder Eisenbasis möglich (Bilder 1–2 und 5–7). Vor allem aus Kostengründen wären Eisenbasislegierungen wie der in den Bildern 5 bis 7 gezeigte FeNiCoTi-Versuchswerkstoff für das Bauwesen interessant.

**Anwendungen**

**Geregelte Vorspannung**

Bis anhin werden die Querschnitte einer Tragstruktur (beispielsweise einer Brücke aus vorgespanntem Stahlbeton) so dimensioniert, dass alle möglichen Spannungszustände aus den äusseren Lasten (Verkehrslast, Wind, Eigengewicht usw.) sowie die inneren Spannungszustände aus der Vorspannung über die gesamte Lebensdauer einer Brücke abgetragen werden können. Wenn nun die Vorspannung je nach Beanspruchungszustand verändert werden kann, lassen sich unerwünschte Spannungen, Verformungen und Risse aus der permanenten Vorspannung verhindern. Auch das Betonkriechen und damit die Spannungsverluste im Vorspannkabel werden vermindert. Es resultieren schlankere und leichtere und somit billigere und nachhaltigere Strukturen. Eine geregelte Vorspannung ist somit zur Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit wünschenswert. Dabei muss die Tragsicherheit der Struktur in jedem Fall auch ohne die Wirkung der geregelten Vorspannung gewährleistet sein (Ausfall der Regelung). Die Idee der geregelten Vorspannung be-

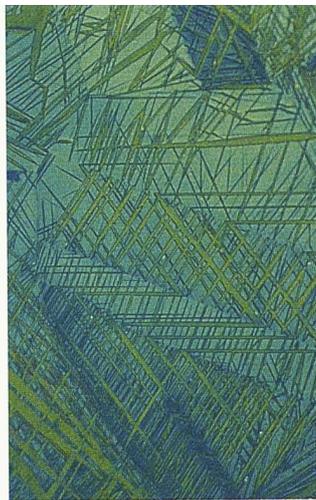
steht also darin, dass die Vorspannung in Biegeträgern aus Stahlbeton, Holz, Stahl, Aluminium oder faserverstärktem Kunststoff wie GFK nur unter Last erhöht wird. Um die prinzipielle Wirkungsweise zu zeigen, wird in den Bildern 8 und 9 ein Beispiel eines GFK-Trägers mit handelsüblichem Querschnitt<sup>4</sup> dargestellt, der mit einer geregelten Vorspannung versehen ist. Bei der Berechnung wurden Einflüsse der Querkraft auf die Verformungen und die Tragfähigkeit vernachlässigt. Auch die konstruktiven Einzelheiten wie Verankerung und Umlenkung wurden nicht im Detail studiert. Bei einer zulässigen Verformung von 15 mm wird klar, dass die Vorspannung nur aufgebracht werden darf, wenn auch eine Last vorhanden ist. Ansonsten würde der Träger eine unzulässige Verformung nach oben aufweisen. Das Aufbringen der Vorspannung erfolgt durch Erhöhung der Temperatur des Spannglieds mittels Durchleiten von elektrischem Strom.

Die geregelte Vorspannung eignet sich vor allem bei Strukturen mit hohem Nutzlast/Eigengewicht-Verhältnis und Materialien mit kleinem Elastizitätsmodul. Vorstellbare Einsatzgebiete sind z. B. Magnetschwebbahnen, bei denen wenig Verformungen zulässig und klar definierte Lasten vorhanden sind. Ebenfalls vorstellbar ist eine belastungsabhängig vorgespannte Kunststoffbrücke: Mittels Bewegungssensoren wird festgestellt, wann eine Belastung durch Fussgänger oder Fahrzeuge erfolgt, und die Vorspannung wird im geeigneten Zeitpunkt durch eine entsprechende Computersteuerung aufgebracht. Bei der geregelten Vorspannung muss die Struktur im Gebrauchstemperaturbereich 1 (Bild 3) liegen oder – anders ausgedrückt – die Materialeigenschaften des SMA müssen an den Gebrauchstemperaturbereich 1 angepasst werden. Für eine geregelte Brücke müsste für den Gebrauchstemperaturbereich 1  $M_f$  so gewählt sein, dass beim Abkühlen trotz Sonneneinstrahlung die «Vorspannung» vollständig zurückgeht.

Eine weitere Einsatzmöglichkeit für geregelte SMA besteht darin, das Stabilitätsversagen wie z. B. Knicken zu verhindern. Sehr kleine allseitige horizontale Kräfte genügen, um das Knicken von vertikalen Stützen zu verhindern. Dies könnte evtl. auch mit innen liegenden geregelten Spannkabeln bewerkstelligt werden. Die horizontalen Kräfte dürfen aber nur bei Bedarf, d. h. nur unter Last, auftreten, weshalb sie geregelt werden müssen.

#### Superelastizität mit hoher Energiedissipation

SMA lassen sehr grosse plastische Verformungen (in der Grössenordnung von mehreren Prozenten) zu, die sich entweder selbstständig zurückverformen (Superelastizität) oder sich durch Erwärmen rückgängig machen lassen. Durch diese Eigenschaft ist es denkbar, dass allfällige Überlasten durch Stösse (z. B. dynamischer Stosszuschlag auf Brücken) oder Explosionen aufgefangen und selbstständig oder auf «Knopfdruck» rückgängig gemacht werden können. Falls es die Gebrauchstauglichkeit und die Tragsicherheit zulassen, wären somit Strukturen (Masten, Konsolen, Brückenseile usw.) nicht auszuschliessen, die z. B. dem Wind



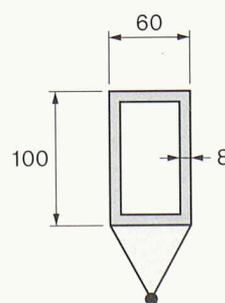
5-7

**Gefügeaufnahmen einer noch in Erprobung befindlichen FeNiCoTi-Eisenbasis-Memory-Metalllegierung. Beim Formgedächtniseffekt pendelt die Atomgitterstruktur beim Erwärmen und Abkühlen zwischen der Tieftemperaturphase Martensit (Bilder 5 und 6) und der Hochtemperaturphase Austenit (Bild 7) hin und her (Bilder: Norbert Jost, FH Pforzheim)**

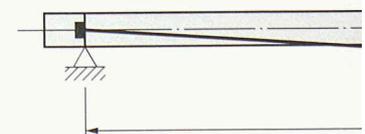
nachgeben, solange er weht, und die anschliessend wieder ihre ursprüngliche Form einnehmen. Die Superelastizität wurde bereits mehrfach zur nachträglichen Erdbebenverstärkung von historischen Gebäuden genutzt, indem Dämpfungseinrichtungen mit SMA installiert wurden (siehe z. B.<sup>5</sup>). Die sehr guten Dämpfungseigenschaften des Materials könnten durch einbetonierte SMA-Bewehrungen zukünftig auch bei Neubauten genutzt werden.

#### Fixe Vorspannung, Verbindung oder Verstärkung

Die Eigenschaft der SMA, sich nach einer plastischen Vorverformung beim Erwärmen *ohne Dehnweg* selber vorzuspannen, könnte auch im Bauwesen genutzt werden. Vorspannkabel könnten ohne Hüllrohr einbetoniert und nach dem Erhärten des Betons gespannt werden, so dass Reibungsverluste entfallen. Das Anbringen von Zwischenabspannungen bei langen Brücken und auch das Nachinjizieren wären nicht mehr nötig. Spezielle Vorspannungen, wie z. B. Umwicklungen zur Druckfestigkeitserhöhung von Stützen oder Schubverstärkungen, sind ebenfalls denkbar. Der Einsatz von SMA könnte auch interessant werden, wenn aus Platz- oder Konstruktionsgründen ein Einsatz von Spannpresen nicht möglich ist. Auch hier erfolgt die Erwärmung des SMA mittels Durchleiten von elektrischem

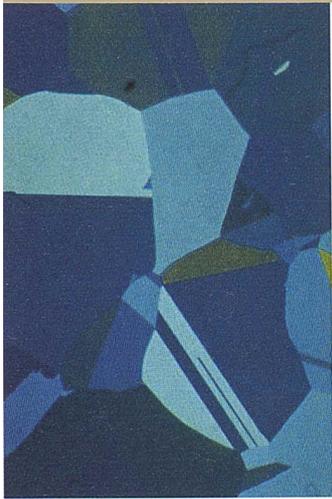


GFK Vierkantrohr 100 x 60 x 8

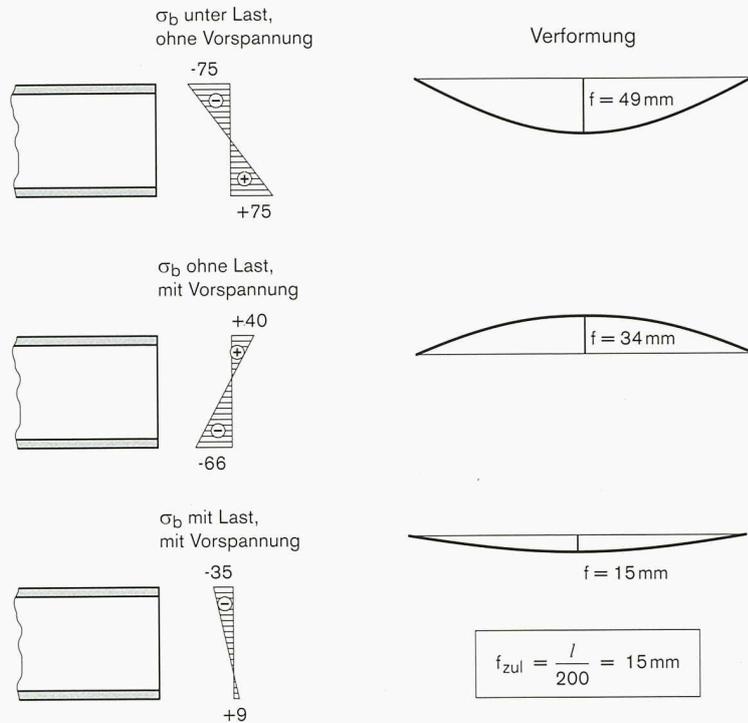


8

**Beispiel eines GFK-Biegeträgers mit geregelter Vorspannung (Bild: Empa Dübendorf)**



9  
**Verhalten eines GFK-Biegeträgers mit einer Einzellast und einer geregelten Vorspannung**  
 (Bild: Empa Dübendorf)



Strom. Bereits in grossen Stückzahlen werden SMA als Kupplungen für Rohre eingesetzt<sup>6</sup>. Bei diesem wie auch beim oben erwähnten Einsatzgebiet wird das Material einmal erwärmt und verbleibt dann in der Austenitphase. Somit bleibt die Zwangs-(Vor-)Spannung konstant. Die SMA-Eigenschaften müssen dem Gebrauchstemperaturbereich 2 gemäss Bild 3 angepasst werden. Vor der Installation müsste  $A_s$  so gewählt sein, dass während des Einbaus die Vordehnung nicht verloren geht. Nach der Installation sollte  $M_s$  so gewählt sein (einiges tiefer als  $0^\circ\text{C}$ ), dass auch im Winter die Vorspannung erhalten bleibt.

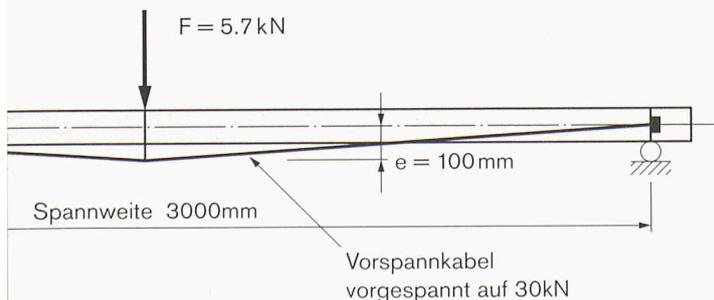
#### Einsatz als Sensor

Anstatt mit dem Material variable Kräfte auf das Bauwerk auszuüben, könnte ein SMA auch als Sensor, der Signale aus dem Bauwerk vermittelt, genutzt werden. Vollständig «intelligent» ist das Material natürlich erst dann, wenn es nicht nur einen Zustand misst, sondern auch selber reagieren kann. Ein gutes Beispiel dafür ist ein Feuermelder, der bei Hitzeentwicklung ein Ventil für das Löschwasser öffnet. Neben dem Messen von Temperaturen könnte das Material aber auch zur Dehnungsmessung eingesetzt werden, da sich der elektrische Widerstand entsprechend der Dehnung ändert<sup>7</sup>.

#### Ausblick

Im Rahmen einer Diplomarbeit befasst sich die Empa zurzeit mit einem Betonträger, der eine Spannweite von etwas mehr als einem Meter besitzt und mit SMA-Drähten bewehrt ist. Es konnte gezeigt werden, dass sich Steifigkeit und Festigkeit des Betonträgers variieren lassen, d. h. das Last-Verformungsverhalten kann verändert werden, und dass auch sehr grosse plastische Verformungen rückgängig gemacht werden können. Weiter beabsichtigt die Empa, die Idee einer adaptiven, d. h. geregelten Vorspannung, wie sie in den Bildern 8 und 9 schematisch dargestellt ist, weiterzuentwickeln.

Christoph Czaderski, dipl. Bauing. FH/ETH/SIA  
 Abteilung Ingenieur-Strukturen, Empa  
 Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf  
 Christoph.Czaderski@empa.ch  
 Dr. sc. techn. Masoud Motavalli,  
 dipl. Bauing. ETH/SIA  
 Leiter der Abteilung Ingenieur-Strukturen, Empa  
 Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf  
 Masoud.Motavalli@empa.ch



#### Literatur

- 1 Klaus Halter: Memory-Metalle: Legierungen mit Formgedächtnis. Ges. für Fachpublikationen der HTA Burgdorf, 1/96, 3-12. info@hta-bu.bfh.ch
- 2 www.sma-inc.com/SMAPaper.html
- 3 www.memory-metalle.de, Infoblatt Nr. 4, Memory Metalle GmbH, D-79576 Weil am Rhein
- 4 Fiberline Konstruktionshandbuch, Maagtechnic, Sonnentalsstrasse 8, 8600 Dübendorf
- 5 Magonette G.: Shape Memory Alloys RF in Civil Engineering with Particular Regard to Old Structures, in Shape Memory Alloys. Advances in Modelling and Applications, ISBN 84-89925-82-8
- 6 Hodgson D. E., J. W. Brown: Using Nitinol Alloys, Shape Memory Applications Inc., San Jose, USA
- 7 Aizawa S. et al.: Case Studies of Smart Materials for Civil Structures, Smart Mater. Struct. 7 (1998) 617-626