



We are Nitinol.™

## Metalle erinnern sich

Stoeckel

Bild der Wissenschaft  
2/1990  
pp. 15-20

1990

---

[www.nitinol.com](http://www.nitinol.com)

47533 Westinghouse Drive Fremont, California 94539 t 510.683.2000 f 510.683.2001

## **Werkstoffe mit Gedächtnis kommen in die Anwendung.**

Der Effekt galt zuerst nur als technische Kuriosität: Das Metall nimmt – wie von Zauberhand gebogen – wieder seine frühere Form an. Heute sind die „Metalle mit Gedächtnis“ vielfach im Einsatz, zum Beispiel in Brillengestellen, bei Arbeiten am Meeresgrund und im Flugzeug- und Automobilbau.

**D**as gibt es doch nicht! rief der Techniker und ließ vor Schreck fast den Schweißbrenner fallen. Er war gerade dabei, einige gebogene Bleche aneinanderzuschweißen. Daß sich Bleche bei so starker Erwärmung verziehen, ist ganz normal. Aber diese hier wurden nicht einfach irgendwie krumm, sondern streckten sich völlig flach aus, wie frisch aus dem Walzwerk. Woher wußten die Bleche, was „flach“ ist?

Es war keine Zauberei, was sich 1953 bei Schweißarbeiten in einem amerikanischen U-Boot-Werk abspielte, sondern die zufällige Entdeckung des Memory-Effektes – die „Erinnerung“ eines Metalls an seine vorherige Form. Die Bleche waren aus der besonders „erinnerungsfähigen“ Legierung Nickel-Titan, die wegen ihrer hohen Korrosionsbeständigkeit für die Rumpf-Beplankungen von Unterseebooten verwendet wird.

Zum ersten Mal beobachtet – aber nicht weiter verfolgt – wurde der Formgedächtnis-Effekt 1932: Chinesische Forscher fanden in Amerika bei der Untersuchung von Gold-Kadmium-Legierungen ein „ungewöhnliches, gummiartiges Verhalten“. Wissenschaftlich untersucht wurde der Effekt jedoch erst 1953 im Anschluß an die „Wiederentdeckung“ durch die U-Boot-Schweißer.

Die eigenartige Fähigkeit bestimmter Legierungen, sich bei Erwärmung wieder in die frühere Form zurückzuverwandeln – im Englischen unter Shape-Memory, Formgedächtnis, bekannt –, beruht auf me-

chanischen und thermischen Veränderungen im Kristall-Gefüge dieser Metalle, wenn eine bestimmte Temperatur überschritten wird. Oberhalb dieser kritischen Temperatur ist die Struktur hart und heißt Austenit, unterhalb der Umwandlungs-Temperatur – als Martensit – ist sie weich. Beide unterscheiden sich durch die unterschiedliche Anordnung der Atome im Kristallgitter.

Ein Material, das nur durch Erwärmung eine bestimmte gewünschte Form annimmt, schreit geradezu nach Anwendung in der Technik. Dazu kommt, daß diese Formänderung große Kräfte entwickelt. So ließen die Ideen der Techniker nicht lange auf sich warten.

- Um Rohrenden fest miteinander zu verbinden, werden kurze Rohrstücke fest aufgeschrumpft. Diese Technik hat sich beim Flugzeugbau, in Autos und am Meeresgrund bewährt.

- In der Elektronik sorgt der Memory-Effekt dafür, daß Steckverbindungen leicht zusammengeführt werden, dann aber fest und zuverlässig halten.

- In der Medizin pressen Memory-Klammern die Bruchflächen an Knochen fest zusammen, Zahnspangen brauchen nicht nachgezogen werden.

- Temperaturwechsel können zum Schalten genutzt werden, zum Beispiel für verschiedene Funktionen im Auto.

Das älteste und bisher erfolgreichste Anwendungsgebiet sind Rohrverbindungen. Im einfachsten Fall sind dies Rohrabstürze oder Hohlzylinder aus einer Formgedächtnis-Legierung (meist Nickel-Titan), deren Innendurchmesser bei Raumbeziehungsweise Betriebstemperatur kleiner ist als der Außendurchmesser der zu verbindenden Rohre.

Für diese Verbindungselemente werden Legierungen verwendet, deren Umwandlungstemperaturen weit unter der Betriebstemperatur liegen. Die Zylinder werden in flüssigem Stickstoff (minus 196 Grad Celsius) abgekühlt. Sie sind dann martensitisch und können leicht aufgeweitet werden: Normalerweise wird einfach ein konischer Dorn durch das Element gepreßt.

Die eigentliche Installation dauert nur wenige Minuten und erfordert keine besondere Erfahrung: Das Rohrstück wird dem Kältebad entnommen und über die beiden zu verbindenden Rohrenden geschoben. Bei der Erwär-

mung über die Umwandlungstemperatur schrumpft es auf den ursprünglichen Durchmesser zurück und sitzt nun bombenfest auf den beiden Rohrenden.

Solche Rohrverbindungen mit sogenannten cryogenen Shape-Memory-Elementen sind vor allem dort interessant, wo beengte Platzverhältnisse oder Brand- beziehungsweise Explosionsgefahr Schweiß- oder Lötarbeiten nicht zulassen. Dies gilt zum Beispiel für den Flugzeugbau, wo zusätzlich höchste Zuverlässigkeit verlangt wird. Es sind inzwischen über 1,5 Millionen solcher Rohrverbinder in Flugzeug-Hydrauliksystemen im Einsatz.

Ein weiteres Beispiel: Für Schweißarbeiten in Lackierstraßen bei Automobilherstellern muß die gesamte Anlage stillgelegt, explosive Gase beziehungsweise entflammare Stoffe müssen abgesaugt werden. Das bedeutet lange Stillstandszeiten. Rohrreparaturen mit Shape-Memory-Verbindern sind dagegen nahezu ohne Beeinträchtigung des Produktionsablaufes möglich.

Im Januar 1978 wurden erstmals Gasleitungen auf dem Grund der Nordsee mit Shape-Memory-Rohrverbindungen repariert. Schweißen am Meeresgrund ist besonders schwierig und langwierig. Durch die Verwendung von Formgedächtnis-Elementen konnten die Tauchzeiten erheblich verkürzt und enorme Summen eingespart werden.

In letzter Zeit wurden Nickel-Titan-Legierungen entwickelt, die zwar ebenfalls bei tiefer Temperatur verformt (gedehnt, expandiert) werden müssen, jedoch bei Raumtemperatur gelagert und transportiert werden können. Elemente aus diesen neuen Legierungen stehen seit ungefähr zwei Jahren kommerziell zur Verfügung. Sie werden nach Erwärmen auf etwa 150 Grad Celsius – zum Beispiel mit Heißluftgebläse – installiert. Danach bleiben sie im hochfesten Zustand, auch wenn sie auf Temperaturen um minus fünfzig Grad Celsius abgekühlt werden.

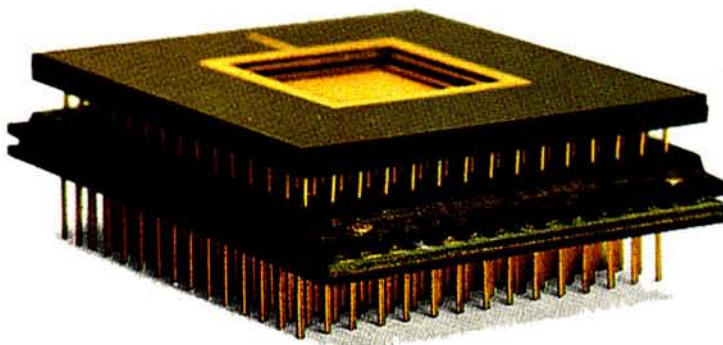
Befestigungs- und Verbindungselemente aus diesen Legierungen werden sich in Zukunft vermutlich auch auf dem Verbrauchersektor durchsetzen, da nun das relativ umständliche

Hantieren mit flüssigem Stickstoff entfällt.

Erste kommerzielle Anwendungen zeichnen sich in der Montagetechnik, bei Sensoren und in der Kraftfahrzeugtechnik ab, wo man bereits heute Schrumpfringe aus den wärmeschrumpfenden Nickel-Titan-Legierungen für hochbelastete Verbindungen einsetzt.

Diese Verbindungen werden aber nicht nur zur Durchmesserverkleinerung eingesetzt. Elemente aus Formgedächtnis-Legierungen können sich auch im Durchmesser vergrößern. Zur Behebung von Korrosionsschäden der Wärmeaustauscher-Rohre von Kraftwerken werden zum Beispiel Zylinder aus Formgedächtnislegierungen in die beschädigten Rohre eingeführt. Die Elemente werden zuvor im martensitischen Zustand komprimiert, so daß ihr Außendurchmesser kleiner als der Innendurchmesser der auszubessernden Rohre ist. Im beschädigten Rohr wird das Reparaturolement erwärmt, wobei es sich ausdehnt und sich mit hoher Kraft an die Innenoberfläche des Rohres anlegt und damit Leckstellen verschließt.

So wurde bereits 1980 mit Hilfe von Shape-Memory-Dehnelementen in



Die vielen „Beine“ von integrierten Schaltkreisen können leicht in die zugehörigen Löcher gesteckt werden. Anschließend halten durch das Metall-Gedächtnis ausgelöste Kräfte die Beine kontaktsicher fest.

Saudi Arabien die Innenoberfläche von Pipelines im Bereich der Schweißnähte mit Korrosionsschutzschichten belegt.

In der Elektronik konnte ein altes Problem durch die Verwendung von Shape-Memory-Elementen auf elegante Weise gelöst werden: Hochzuverlässige Steckverbindungen sollen einerseits eine niedrige Einsteckkraft, andererseits aber den größtmöglichen Kontaktdruck aufweisen. Die Forde-

rung nach niedriger Einsteckkraft ist verständlich, wenn man die zunehmende Zahl der Anschluß-Beinchen elektronischer Bauelemente betrachtet.

VLSI Logic Chips zum Beispiel können heute schon mehrere hundert Pins (Anschlußbeinchen) haben. Geht man von nur einem Newton Einsteckkraft pro Bein für einen konventionellen Stecksockel aus, so sind leicht Kräfte bis zu ein Kilonewton für das Stecken eines hochintegrierten Bauteiles erforderlich, das entspricht etwa dem Gewicht von hundert Kilogramm. Diese Kraft kann nur durch pneumatische oder hydraulische Pressen aufgebracht werden.

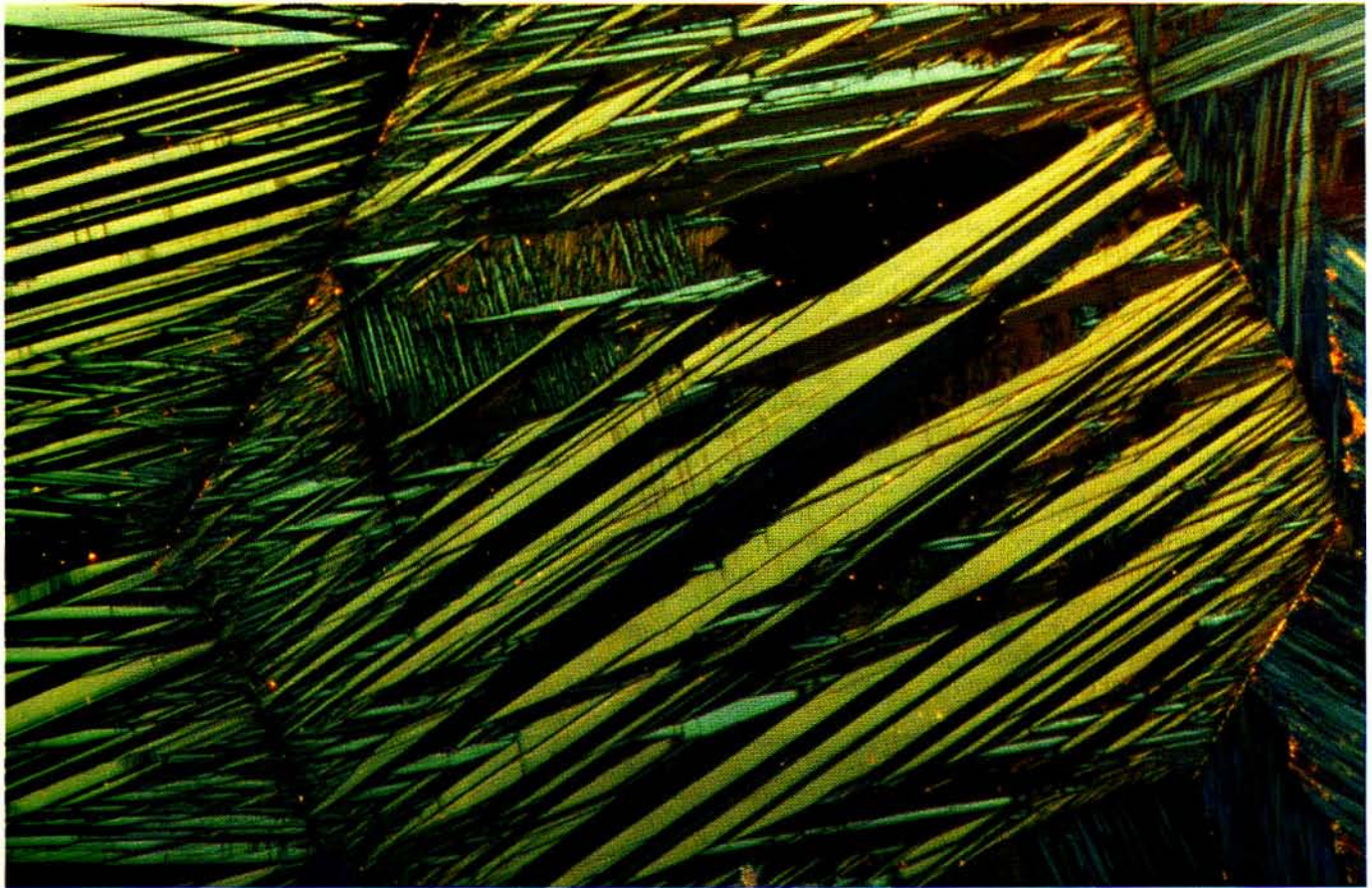
Die Forderung nach hoher Haltekraft (Kontaktkraft) bei gleichzeitig guter Steckbarkeit kommt vor allem aus der Luft- und Raumfahrt, wo mit starken Beschleunigungen und Vibrationen gerechnet werden muß, zum Beispiel während der Startphase eines Flugzeuges oder einer Rakete.

Steckverbinder aus Shape-Memory-Legierungen haben sich hier bereits seit einigen Jahren in großem Umfang bewährt. Sie verfügen über einen Gabelkontakt aus einem Federwerkstoff, dessen Zinken von einer ringförmigen Shape-Memory-Klammer zusammengedrückt werden. Bei tiefer Temperatur kann die Klammer durch die Federkraft der Kontaktzinken leicht gedehnt werden. Der Kontaktspace ist geöffnet, und der Stecker wird ohne Kraftaufwand eingeführt. Bei Erwärmung auf normale Temperatur (oberhalb der Umwandlungstempera-

tur) kehrt der Ring in seine ursprüngliche Gestalt zurück: Ein eingesteckter Pin wird nun mit erheblicher Kraft festgehalten.

Der Memory-Werkstoff Nickel-Titan verträgt sich ausgezeichnet mit Körperflüssigkeiten und Geweben. Deswegen ist auch die Medizintechnik ein wichtiges Anwendungsgebiet. Shape-Memory-Elemente aus diesen Legierungen eignen sich besonders gut für Knochenklammern und Implantate.

Um Frakturen ruhigzustellen, werden häufig krampfenartige Klammern, die den Frakturspace überbrücken, in den Knochen eingeschlagen. Mit



Klammern aus den üblichen Kobalt-Chrom-Legierungen ist es schwierig, den Frakturspalt so fest zusammenzudrücken, wie es für die Heilung günstig wäre. Shape-Memory-Klammern dagegen komprimieren die Frakturstelle ohne großen Aufwand: Bei einer von Krupp entwickelten Version des Krampens biegen sich die Klammerschenkel gleichzeitig in Richtung auf den Knochenspalt zurück.

Ein weiteres Gebiet der Medizin, in dem sich der Memory-Effekt in großem Umfang durchgesetzt hat, ist die Zahnregulierung. Hier werden Nickel-Titan-Drähte verwendet. Dazu wird eine Sonderform des Shape-Memory-Effekts ausgenutzt, die sogenannte Superelastizität.

Superelastizität ist eine Sonderform des Formgedächtnis-Effekts. Sie wird bei Shape-Memory-Legierungen gefunden, deren Umwandlungstemperatur knapp unterhalb der Raumtemperatur liegt. Sie sind im „Normalfall“ austenitisch – zumindest solange sie nicht mechanisch belastet sind.

Wird eine solche Legierung aber mechanisch belastet, wandelt sie sich in Martensit um, und zwar um so mehr, je mehr sie belastet wird.

Da der Shape-Memory-Martensit leicht verformbar ist, kann eine solche Legierung ohne nennenswerten Kraftaufwand – wie Gummi – bis zu acht Prozent gedehnt werden. Das bleibt zunächst so. Bei Entlastung verschwindet der Martensit, das heißt, er wandelt sich zurück in Austenit, da die Legierung bei Raumtemperatur eigentlich austenitisch ist. Sie kehrt damit auch automatisch in ihre Ausgangsform zurück. Wissenschaftlich wird dies „Spannungsinduzierung des Martensits“ genannt.

**S**uperelastische Nickel-Titan-Legierungen können etwa zehnmal stärker gedehnt werden als konventionelle Werkstoffe, wie zum Beispiel Stähle.

Die bei der Zahnregulierung bisher üblichen, sogenannten orthodontischen Bogen aus Stahl oder Chrom-Nickel-Legierungen müssen während der Regulierungsphase wiederholt nachgespannt werden, denn falls sich die Zähne verschieben, läßt die Spannung im Draht nach. Bogen aus Nickel-Titan dagegen üben immer eine nahezu konstante Kraft aus: Sie müssen nicht nachgespannt werden, und

Ein Mikroskop-Blick auf ein Memory-Gefüge. Benachbarte Bezirke haben überall denselben Winkel zueinander: die für das Gedächtnis verantwortlichen „Zwillinge“.

die Behandlungsdauer ist wesentlich kürzer. In den USA werden jährlich etwa fünf Millionen dieser Bögen hergestellt.

Die Memory-High-Tech-Produkte haben auch in der Damenmode Einzug gehalten, allerdings meist versteckt: Große Mengen der „superelastischen“ Drähte werden heute in Büstenhaltern verwendet. Gegenüber gewöhnlichen Stahldrähten bieten sie höheren Tragekomfort und lassen sich nach Verbiegungen mit heißem Wasser wieder leicht in die Ursprungsform zurückholen. Es ist jedoch ein absolut unbestätigtes Gerücht, daß sich ein Shape-Memory-Büstenhalter an längst vergangene Zeiten und Formen erinnert.

Mit Federn, die sich aufgrund des Memory-Effekts bei Temperaturwechseln verkürzen oder verlängern, lassen sich auf elegante Weise „thermische Stellelemente“ verwirklichen, die Sensor und Antrieb in sich vereinen, zum Beispiel bei automatischen

Fensteröffnern für Gewächshäuser oder Schweineställe. Ohne Zufuhr elektrischer Energie und damit unabhängig von Stromversorgungssystemen öffnen solche Stellelemente die Fenster, sobald die Temperatur im Inneren des Gebäudes einen bestimmten Wert überschreitet.

Die Anwendungen thermischer Stellelemente sind vielfältig: von Klimaanlage, Heizungs- und Brandschutzregelungen bis zu Ventilen in Teekesseln, eine „besonders englischen“ Anwendung.

In der Automobiltechnik wird intensiv über die Verwendung thermischer Shape-Memory-Stellelemente für Lüfterkupplungen, Gemischregler, Öldruckregler sowie für verschiedene Thermoventile nachgedacht. Mercedes-Benz zum Beispiel setzt Shape-Memory-Federn zur temperaturabhängigen Regelung des Schalldrucks von Automatik-Getrieben ein. Toyota verwendet ähnliche Federn in

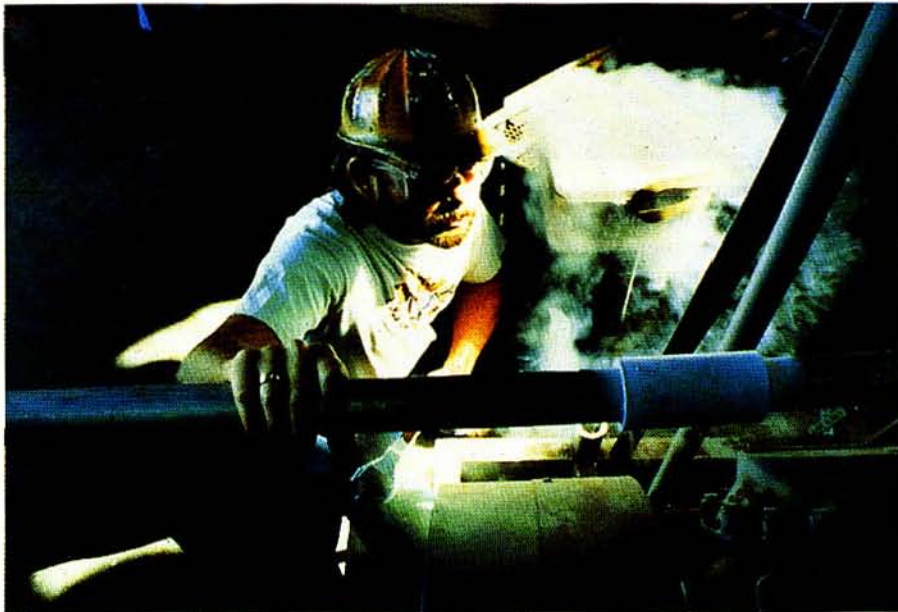
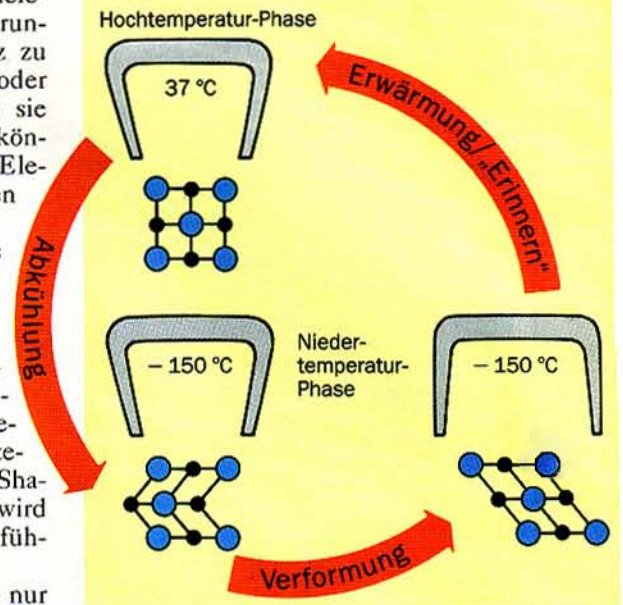
feder die Rückstellung der Shape-Memory-Feder: Die Lamellen schließen sich.

Elektrische Antriebe und Stellelemente aus Formgedächtnis-Legierungen stehen somit in Konkurrenz zu herkömmlichen Stellmotoren oder Magnetantrieben. Diese werden sie allerdings kaum völlig ersetzen können. Vielmehr werden die neuen Elemente ihre eigenen Marktlücken finden, die sie ausfüllen werden.

Da vorgedehnte Drähte aus Formgedächtnis-Legierungen sich bei Stromdurchgang zusammenziehen können – ähnlich wie Muskelfasern –, nennt ein japanischer Hersteller dünner Nickel-Titan-Drähte sein Produkt BioMetal. Er bietet einen kleinen Roboterarm an, der ausschließlich durch Shape-Memory-Drähte angetrieben wird und mehrere Bewegungsarten ausführen kann.

Dieser „Roboter“ ist allerdings nur

## WIE FUNKTIONIERT DAS GEDÄCHTNIS?



Entlüftungsventilen und zur Kompensation der thermischen Ausdehnung unterschiedlicher Werkstoffe im Automobil.

Eine erfolgreiche Anwendung ist auch der Antrieb von Steinschlag-Schutzlamellen bei Nebelscheinwerfern: Eine Nickel-Titan-Feder liegt im Stromkreis der Lampe. Wird der Scheinwerfer eingeschaltet, fließt der Lampenstrom über die Feder und erwärmt sie innerhalb sehr kurzer Zeit. Die Feder zieht sich zusammen und öffnet dabei die Schutzlamellen. Beim Ausschalten übernimmt eine Gegen-

In explosionsgefährdeten Räumen ist Schweißen verboten. Die Rohrenden können aber genauso fest miteinander verbunden werden, wenn man ein Rohrstück aus einer Memory-Legierung über sie schiebt, das bei Erwärmung zurückschrumpft.

zu Demonstrationszwecken verwendbar. Dagegen wurde von Hitachi ein funktionsfähiges Modell einer Shape-Memory-Roboterhand vorgestellt. Der Einsatz von Nickel-Titan-Drähten für diese Hand soll das Gewicht und das Volumen um neunzig Prozent gegenüber herkömmlicher Technik mit Stellmotoren reduziert haben.



Krampe aus der Memory-Legierung Nickel-Titan werden bei tiefen Temperaturen aufgeweitet und anschließend in einen gebrochenen Knochen geschlagen. Bei Erwärmung ziehen sie sich zusammen und schließen damit den Knochenspalt.

Besonders dieses Beispiel verführt dazu, den Memory-Legierungen ein „echtes“ Gedächtnis zu unterstellen. Was läuft denn wirklich im Metall ab, wenn es sich „erinnert“?

Anfangs, bei Temperaturen oberhalb der Umwandlungstemperatur, im austenitischen Zustand, sind die Atome der beteiligten Legierungsbe-

Bei hoher Temperatur sind die Atome einer Formgedächtnis-Legierung in einem regelmäßigen kubischen Gitter angeordnet. An die Form, die das Material in dieser „Hochtemperaturphase“ hat, wird es sich später „erinnern“.

Wenn man nun abkühlt, ändern die Atome ihre Plätze nicht, jedes behält immer die gleichen Nachbarn. Aber die Bindungen zwischen ihnen knicken ein. Die vorher gestreckten Ketten von abwechselnden Nickel- und Titan-Atomen werden nun zur Zickzack-Kette. Das Material ist in der martensitischen Tieftemperatur-Phase angelangt.

Die Abstände ändern sich geringfügig, makroskopisch aber bleibt alles gleich, denn die unmerklichen Längenänderungen in den einzelnen Kristalliten gleichen sich gegen-

seitig aus. Es gibt keine Platzwechsel, keine Diffusion.

Wenn man nun eine Kraft anlegt, das heißt das Material streckt, staucht oder einfach biegt (plastische Verformung), dann liegt jeweils eine der Zickzackrichtungen in der Krafrichtung, die andere liegt quer dazu. Alle Bindungen, die in der Krafrichtung liegen, werden verstärkt. Diese Bereiche wachsen, und die anderen klappen Atom für Atom so lange in diese Richtung um, bis alles wieder regelmäßig angeordnet ist, in lauter gleichgerichteten Rhomben.

Aus den ursprünglichen Würfeln wurde so über die verzwilligten Rhomben-Ketten ein gleichmäßiges Rhombengitter – man nennt diese Struktur „verformter Martensit“.

Weil die Atome ihre Plätze nicht gewechselt, sondern sich

nur seitlich etwas verschoben haben, ist es für die rhombische Anordnung beim Erwärmen ein Leichtes, einfach in die Hochtemperatur-Phase zurückzuklappen, also in die ursprüngliche austenitische kubische Ordnung.

So ergibt sich der Zyklus:

- Ausgangslage. Entspannte Hochtemperatur-Phase, kubisch.

- Abkühlung. Das Material wandelt sich, ohne daß man irgendetwas davon sieht, in eine Zickzackanordnung um, die leicht verformbar ist, man braucht keine großen Kräfte.

- Verformung. Umklappen der Zwillinge, verformter Martensit.

- Erwärmung. Alles geht in die Ausgangssituation zurück.

Praktisches Beispiel: Man biegt einen abgekühlten Draht zu einem Kreis. Erwärmt man

ihn nun, wird er wieder gerade wie am Anfang.

Es gibt nur wenige, ganz spezielle Legierungen, die über die für den Gedächtnis-Effekt notwendige Kombination von Eigenschaften verfügen. Stähle durchlaufen zwar ebenfalls eine martensitische Umwandlung, aber bei ihnen ist der Martensit nicht weich, sondern sogar besonders hart.

Das wesentliche ist die geordnete kubische Anordnung in der Hochtemperatur-Phase, und die leichte Verformbarkeit des Martensits.

Man kann den Shape-Memory-Martensit allerdings auch nicht beliebig verformen, sondern nur so lange, bis alle Zwillinge sich in der neuen Richtung eingestellt haben. Eine weitere Verformung würde Versetzungen und damit „Gedächtnis-Schwund“ bewirken.

standteile geordnet auf bestimmten Gitterplätzen verteilt: Austenit besteht aus einer dreidimensionalen Aneinanderreihung von Würfeln, in deren Ecken und Zentren die Atome angeordnet sind (sogenannte kubisch-raumzentrierte Struktur).

Beim Abkühlen wandelt sich der Austenit bei der Umwandlungstemperatur in Martensit um. Es handelt sich hierbei um eine diffusionslose Umwandlung, das heißt, die Atome bleiben auf ihren Gitterplätzen. Die Ordnung wird nicht gestört.

Da der Martensit ungefähr das gleiche Volumen einnimmt wie der Austenit, ist diese Umwandlung nicht mit einer makroskopischen Gestaltsänderung verbunden. Verändert hat sich nur der strukturelle Aufbau.

Martensit hat eine Zickzack-ähnliche Struktur. Diese Zickzack-Anordnung wird von sogenannten Zwillingen gebildet, wobei ein Zwillingpaar aus zwei Gitterbereichen mit der gleichen Struktur, jedoch unterschiedlicher Orientierung, besteht. Die Ebene zwischen den beiden Gitterbereichen ist eine Symmetrie- oder Spiegelebene; der Gitterbereich auf der einen Seite dieser Ebene ist das Spiegelbild des Gitterbereiches auf der anderen Seite.

Verformen bedeutet im Innern ein Verschieben der Zwillingsgrenzen: Die Gitterbereiche, die in Richtung der angreifenden Kraft orientiert sind,

wachsen auf Kosten ihrer Zwillingspartner. Während eine Zwillingshälfte wächst, verschwindet allmählich die andere. Der Martensit wird „entzwillingt“.

Die notwendige Kraft, um den Martensit auf diese Weise zu verformen, ist wesentlich niedriger als die für konventionelle Mechanismen der Metallverformung, wie beispielsweise Versetzungsbewegung und Gleiten.

**D**ie Grenze der Umformung durch „Entzwillingen“ liegt bei etwa acht Prozent, das heißt, ein Stab von einem Meter Länge kann um acht Zentimeter gedehnt werden und behält dann diese Verlängerung bei, auch wenn man die Zugkraft wegnimmt.

Wird der verformte Martensit erwärmt, so wandelt er sich bei der Umwandlungstemperatur in Austenit und damit in die kubische Struktur zurück. Da die Atome bei der Martensitverformung keine Platzwechsel vorgenommen hatten und somit die gegenseitige Ordnung erhalten blieb, finden sie sich auch in der kubischen Struktur wieder auf ihren individuellen Plätzen ein, auf den Ecken und Zentren der Würfel. Damit ist die ursprüngliche Gestalt wieder hergestellt, das heißt, der auf 108 Zentimeter gedehnte Stab schrumpft um acht Zentimeter zurück auf ein Meter Länge.

Wenn man den Stab noch weiter als

um acht Prozent streckte, würde sich das Material nach den vom Stahl her bekannten Mechanismen plastisch verformen. Das „Erinnerungsvermögen“ wäre dadurch außer Kraft gesetzt.

Die Gestaltsänderung bei der Rückumwandlung des verformten Martensits in Austenit ist die eine Besonderheit des Memory-Effekts, die andere sind die enormen Kräfte, die das Material bei der Rückumwandlung entwickelt. Das ist auf den charakteristischen Unterschied im Festigkeitsverhalten des Austenits und des Martensits zurückzuführen.

Ein zehn Millimeter dicker und ein Meter langer Nickel-Titan-Stab zum Beispiel, der im martensitischen Zustand von einer Last von etwa 1000 Kilogramm um fünf Prozent, das heißt um fünf Zentimeter gedehnt wurde, könnte bei Erwärmung über die kritische Temperatur beim Zurück-schrumpfen auf ein Meter ein Gewicht von etwa 4000 Kilogramm um nahezu fünf Zentimeter heben. Es wird somit Arbeit geleistet.

Nickel-Titan, auch unter dem Namen Nitinol (Nickel-Titan-Naval-Ordinance-Laboratory) bekannt, ist inzwischen die technisch wichtigste Formgedächtnis-Legierung. Die wesentlichen Entwicklungsarbeiten wurden in den USA geleistet, wo auch Raychem, der heute größte Hersteller derartiger Legierungen, beheimatet

## GEDÄCHTNIS ALS ANTRIEB

Die Wang-Maschine ist Spielzeug und Demonstration des Memory-Effektes zugleich. Ein endloser Nickel-Titan-Draht läuft über zwei Räder. Wird das kleinere der beiden in warmes Wasser getaucht und die Bewegung von Hand gestartet, so drehen sich die Räder, durch die Drahtschleife verbunden.

In dieser einfachen Form wird die Maschine ausschließlich als Spielzeug oder Demonstrationsobjekt verwendet. Neben dem „Thermobile“ bietet Wang eine mit Shape-Memory-Motor betriebene Eiswürfelschneidemaschine und ein Schiffsmodell für die Badewanne an. In beiden wird die Temperaturdifferenz zwischen Eis und warmem Wasser genutzt.



Die „Wang-Memory-Maschine“ läuft wie von selbst, solange das Wasser am kleineren Rad heiß genug ist.

ist. In Japan gibt es ebenfalls mehrere Hersteller, in der Bundesrepublik dagegen nur einen: Krupp in Essen.

Nickel-Titan ist jedoch nicht die einzige Legierung mit Gedächtnis. Den gleichen Effekt findet man bei Gold-Kadmium, aber auch bei Eisenlegierungen, bei messingartigen Legierungen und anderen. So sind heute Kupfer-Zink-Aluminium-Legierungen nach Nickel-Titan die technisch bedeutsamsten. Sie wurden im wesentlichen von europäischen, vor allem deutschen Wissenschaftlern entwickelt.

Obwohl Produkte aus Nickel-Titan-Shape-Memory-Legierungen in den USA seit über zwanzig Jahren auf dem Markt sind, wird erst seit etwa drei Jahren eine wirkliche Verbreitung dieser Materialien beobachtet. Heute wächst der Markt für Gedächtnislegierungen mit jährlich rund dreißig Prozent. Dies geht im wesentlichen darauf zurück, daß die relativ komplizierte Herstellungstechnik heute viel besser beherrscht wird und ein etwas offener Informationsaustausch stattfindet.

Wie intensiv besonders in Japan auf diesem Gebiet gearbeitet wird, zeigt die Zahl der Patentanmeldungen: pro Jahr etwa 1500 Patente für Anwendungen von Memory-Metallen. Zum Vergleich: In Europa und USA zusammen sind es keine hundert pro Jahr.

Shape-Memory-Elemente können

Temperaturdifferenzen in Bewegung umsetzen. Da liegt – besonders für passionierte Bastler – die Idee nahe, mit diesem Material eine ideale Wärmekraftmaschine zu bauen.

**E**s gibt tatsächlich unzählige Entwürfe für Maschinen, welche die thermisch induzierte Bewegung von Shape-Memory-Elementen zur Gewinnung mechanischer Energie ausnutzen. Alle diese Maschinen haben nur einen geringen Wirkungsgrad (kleiner als fünf Prozent), der durch die auseinanderklaffenden Umwandlungstemperaturen und die hohe Umwandlungswärme bei der Martensit-Austenit-Umwandlung bedingt ist.

Eine überraschend elegante, weil einfach aussehende Lösung ist die Wang-Maschine (nach ihrem Erfinder F. E. Wang benannt). Es handelt sich in der einfachsten Form um eine Schleife aus Nickel-Titan-Draht, die über zwei verschieden große Räder läuft (siehe auch bild der wissenschaft, Heft 8/1986).

Das kleinere der beiden Räder taucht man in heißes Wasser – dazu reicht schon die Tasse Kaffee –, und nun startet man die Bewegung von Hand. Die Räder, durch die Drahtschleife aus einer Memory-Legierung miteinander verbunden, drehen sich sozusagen von alleine weiter, solange eine Temperaturdifferenz zwischen ihnen besteht.

In dieser Form, das heißt als einfache Drahtschleife über zwei Räder, wird die Maschine ausschließlich als Spielzeug oder Demonstrationsobjekt verwendet. So bietet Wang neben diesem „Thermobile“ eine Shape-Memory-Motor-betriebene Eiswürfelschneidemaschine und ein Schiffsmodell für die Badewanne an. Bei beiden wird die Temperaturdifferenz zwischen Eis und warmem Wasser genutzt.

Nach Ansicht des Erfinders kann eine derartige Maschine auch Leistungen von mehreren Watt erzeugen. Es müssen nur entsprechend viele Drahtschleifen zu einer größeren Anordnung zusammengefaßt werden.

Eine technische Anwendung eines Shape-Memory-Motors ist nicht in Sicht, auch wenn an verschiedenen Stellen zum Beispiel an Prototypen für Pumpen oder Nachführantriebe gearbeitet wird. Wegen des niedrigen Wirkungsgrades sowie der noch ungeklärten Lebensdauer bei hohen Zyklenzahlen (über eine Million Temperaturwechsel) ist eine technische Nutzung in absehbarer Zukunft nicht wahrscheinlich.

Seit zwei Jahren stehen Nickel-Titan-Legierungen kommerziell zur Verfügung, die zwar bei tiefer Temperatur verformt werden, doch bei Raumtemperatur lagerbar sind. Diese neuen Legierungen bleiben auch nach dem Erwärmen auf etwa 150 Grad im hochfesten Zustand. Als Befestigungs- und Verbindungselemente könnten sie sich auch im Verbrauchersektor durchsetzen.

Für Memory-Legierungen sind aber noch viele Anwendungsmöglichkeiten denkbar und durchaus realistisch. So könnte eines Tages zum Beispiel der Ärger mit den Dellen im Kotflügel endlich aufhören. Ein Malheur beim Rückwärtsfahren oder Einparken ist dann nicht mehr weiter schlimm: Man schüttet einen Eimer heißes Wasser über die Delle oder erhitzt sie mit dem Fön, und schon verschwindet das Ärgernis – allerdings nur, wenn der Kotflügel nicht aus normalem Stahl, sondern aus einer Formgedächtnis-Legierung besteht.



Prof. Dr. DIETER STÖCKEL, Experte in Memory-Metallen, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Raychem Corporation in Menlo Park, Californien/USA.