

## ■ Immer wieder gut in Form

Wenn Brillen trotz Verbiegens nicht aus der Fassung geraten, sind dafür bestimmte Legierungen verantwortlich, die sich an ihre ursprüngliche Gestalt „erinnern“ können.

1) Videos zu den Formumwandlungen: Draht: <http://mrsec.wisc.edu/Edetc/cineplex/movies/NiTi/NiTiwire.mov>, Brille: [http://mrsec.wisc.edu/Edetc/background/memmetal/images/mike\\_glasses.mov](http://mrsec.wisc.edu/Edetc/background/memmetal/images/mike_glasses.mov)

Bereits seit vielen Jahren sorgt Uri Geller für Furore, indem er – angeblich allein durch übersinnliche Kräfte – Löffel verbiegt. Mit welchen Tricks der Magier arbeitet, lässt sich nur mutmaßen. Physikalisch erklärbar und dennoch verblüffend sind Effekte, die Formgedächtnislegierungen möglich machen: So lassen sich Brillenfassungen aus solchen Memory-Metallen nicht permanent verbiegen, und verdrehte Büroklammern nehmen in heißem Wasser wieder ihre alte Form an – ganz ohne meta-physische Kräfte.<sup>1)</sup>

Entdeckt wurde der Formgedächtniseffekt eher zufällig, als das US Naval Ordnance Laboratory in den 60er-Jahren nach einem Material für U-Boote suchte, das nicht rostet und magnetisch schwer zu orten ist. Als die Arbeiter Platten aus einer Nickel-Titan-Legierung formen wollten und sie dazu erhitzen, kehrten sie in ihre ursprüngliche Form zurück. Für die verwendete Legierung mit einem Nickelgehalt von etwa 50 Atomprozent ist seitdem die Bezeichnung Nitinol üblich, wobei „Niti“ für die beteiligten Metalle steht und NOL für das Naval Ordnance Laboratory.

Formgedächtnislegierungen sind hoch elastisch, korrosionsbeständig



Wie man sie auch dreht oder wendet: Eine verbogene Büroklammer aus einer Nickel-Titan-Legierung „erinnert“ sich an



ihre ursprüngliche Form, wenn sie in heißes Wasser getaucht wird.

www.klangspiel.ch

und biologisch gut verträglich. Daher greift die Medizintechnik häufig auf sie zurück, z. B. für Mikropinzetten, Zahnspangen oder Implantate. Meist bestehen diese Legierungen aus Nickel und Titan, aber auch Cu-Zn-Al- und Cu-Al-Ni-Mischungen zeigen den Memory-Effekt, wenn auch weniger ausgeprägt.

### Metalle mit Gedächtnis

Formgedächtnislegierungen haben abhängig von der Temperatur zwei verschiedene Kristallstrukturen: Bei hohen Temperaturen liegt ein Austenit mit kubisch raumzentrierter Kristallstruktur vor, bei der ein Nickelatom im Zentrum der Einheitszelle von acht Titanatomen umgeben ist (Abb. 1a). Bei tiefen Temperaturen bildet sich ein Martensit, der durch ein hexagonales Gitter dichtester Packung charakterisiert ist, in dem die Atome zickzack-förmig angeordnet sind (Abb. 1b).

Die erstaunliche Verformbarkeit der Formgedächtnislegierungen und die Fähigkeit, sich an ihre Ausgangsform zu erinnern, beruht auf einer sog. martensitischen Umwandlung. Bei dieser bildet sich rein durch Scherdeformationen bei Abkühlung die Martensit-Phase aus. Da die Atome dabei ihren Platz nicht wechseln, ist die martensitische Umwandlung reversibel. Zunächst entstehen in der Legierung unterschiedlich orientierte Platten mit der neuen Kristallstruktur.

Diese Platten schließen sich so zu Gruppen zusammen, dass im Material möglichst geringe innere Verzerrungen und äußere Spannungen auftreten. Das Gitter kann daher unterschiedlich orientiert sein. Mit sinkender Temperatur wachsen diese Platten (sog. Zwillinge) kontinuierlich weiter, bis der Austenit vollständig in die Martensit-Phase übergegangen ist. Die Temperatur, bei der die Phasenumwandlung stattfindet, hängt empfindlich von der Nickelkonzentration ab und lässt sich in einem Bereich zwischen  $-100\text{ °C}$  und  $+100\text{ °C}$  einstellen – meist liegt sie zwischen  $60$  und  $90\text{ °C}$ . Der Nickelgehalt variiert dabei zwischen  $49$  und  $51$  Atomprozent.

Die Gittergrenzflächen zwischen den Platten, die Zwillingsgrenzen, sind hoch beweglich und lassen sich z. B. durch Dehnen oder Verbiegen leicht gegeneinander verschieben. Daher erscheint die Legierung bei tieferen Temperaturen geschmeidiger als im starren Austenit-Zustand.

### Effektvolle Umwandlungen

Am Spannungs-Dehnungs-Diagramm lassen sich die drei Verformungseffekte der Legierung gut ablesen (Abb. 2). Bei Temperaturen weit unterhalb der Umwandlungstemperatur tritt der Einweegeffekt auf (blaue Kurve): Zunächst befindet sich die Formgedächtnislegierung (z. B. eine Nitinol-Feder) in der „verzwillingten“ Martensit-Pha-

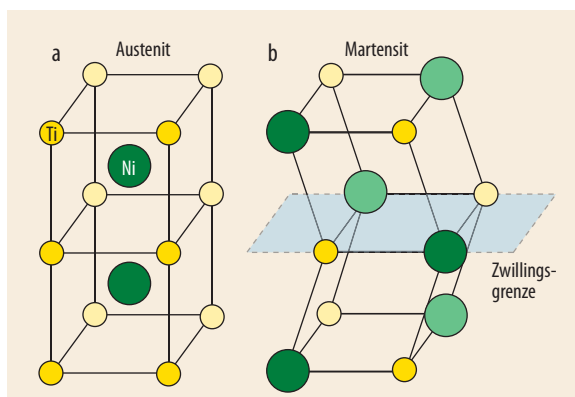
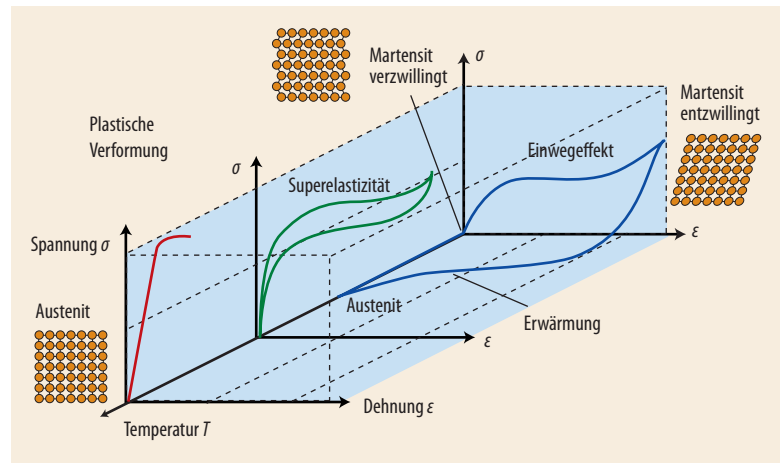


Abb. 1 In der Einheitszelle des Austenit ist das Nickelatom von acht Titanatomen umgeben, die die Eckpunkte eines Würfels bilden (a). Bei Abkühlung entsteht durch Scherung der Gitterebenen die Umwandlung in die Martensit-Phase, in der die Atome zickzack-förmig angeordnet sind (b). An den Zwillingsgrenzen liegen sich die Atome spiegelbildlich gegenüber.

se. Wird die Feder bei konstanter Temperatur gedehnt, wächst im Material die Spannung  $\sigma$  linear mit der Dehnung  $\epsilon$  und bleibt dann – ähnlich wie Gummi – weitgehend konstant. Dies lässt sich damit erklären, dass die mechanische Spannung in diesem Bereich die Zwillingsgrenzen im Martensit so verschiebt, dass sich die energetisch günstigste Orientierung einstellt. Die mit dieser „Entzwilligung“ verbundene Dehnung des Nitinol bleibt bei mechanischer Entlastung erhalten. Erst durch Zufuhr von Wärme kehrt der Martensit in die Austenit-Phase zurück, und die Feder entspannt sich. Den Einwegeffekt nutzen Bauteile, die als Stellenelemente in vielen Bereichen der Mess- und Regelungstechnik zum Einsatz kommen. Und auch die verbogene Büroklammer nimmt dank des Einwegeffekts in heißem Wasser ihre ursprüngliche Form wieder an.

Oberhalb der Umwandlungstemperatur (grüne Kurve) lässt sich die Phasenumwandlung rein durch äußere Belastung induzieren. Wird die Nitinol-Feder gedehnt, bleibt auch hier über einen weiten Bereich die Spannung konstant. Allerdings findet die Phasenumwandlung nicht über den Umweg des verzwilligten Martensits statt, sondern durch eine Scherdeformation, aus der direkt der energetisch günstigere, entzwilligte Martensit entsteht. Da die Austenit-Phase thermodynamisch stabiler ist, geht das Material bei Entlastung augenblicklich in diese Form über, und



**Abb. 2** Abhängig von der Temperatur zeigt Nitinol im Spannungs-Dehnungs-Diagramm drei Effekte: Bei tiefen Temperaturen kommt es zum Einwegeffekt (blau); der Martensit kehrt nur durch Er-

wärmung in die Austenit-Phase zurück. Bei der Superelastizität (grün) führt äußere Belastung zur Phasenumwandlung. Bei hohen Temperaturen liegt Nitinol ausschließlich als Austenit vor (rot).

die Feder entspannt sich. Dieser Effekt findet z. B. in Brillenfassungen Verwendung, die nach dem Verbiegen spontan in ihre alte Form zurückkehren.

Weit oberhalb der Umwandlungstemperatur kommt es nicht zur Phasenumwandlung (rote Kurve). Eine Dehnung der Feder führt dann zu einer linear wachsenden Spannung, bis sie bei hohen Belastungen irreversibel plastisch verformt ist.

#### Kleine Alltagswunder

Da Formgedächtnislegierungen bei der Formänderung große Kräfte entwickeln können, gelten sie als heiße Kandidaten für Sensoren, Aktoren und Regler. Eine pfiffige Anwendung, die eine aufwändige Mess- und Steuerungstechnik ersetzt, findet sich bereits in einigen

Geschirrspülern: In einem Sensor, der regelmäßig den Kalkgehalt des Wassers misst, zieht sich ein Memory-Draht durch einen geringen Stromstoß zusammen und öffnet ein Ventil, damit das Spülwasser aus dem Sensor fließt und sich für eine neue Messung füllen lässt.

Auch in der Medizin leisten die Memory-Metalle Erstaunliches. So helfen sie z. B. dabei, Löcher in der Herzscheidewand zu schließen. Dafür wird ein kleines, gefaltetes Doppelschirmchen aus Nitinol in einem Katheter zum Herz transportiert. Sobald das Implantat aus dem Katheter geschoben wird, erwärmt sich das Nitinol auf Körpertemperatur und entfaltet sich dadurch. Dabei öffnet sich das Doppelschirmchen und verschließt perfekt beide Seiten des Lochs.

Katja Bammel

Dr. Katja Bammel,  
science & more  
redaktionsbüro,  
kb@science-and-  
more.de