



Johnson Matthey

since 1817

Nitinol - November 2007

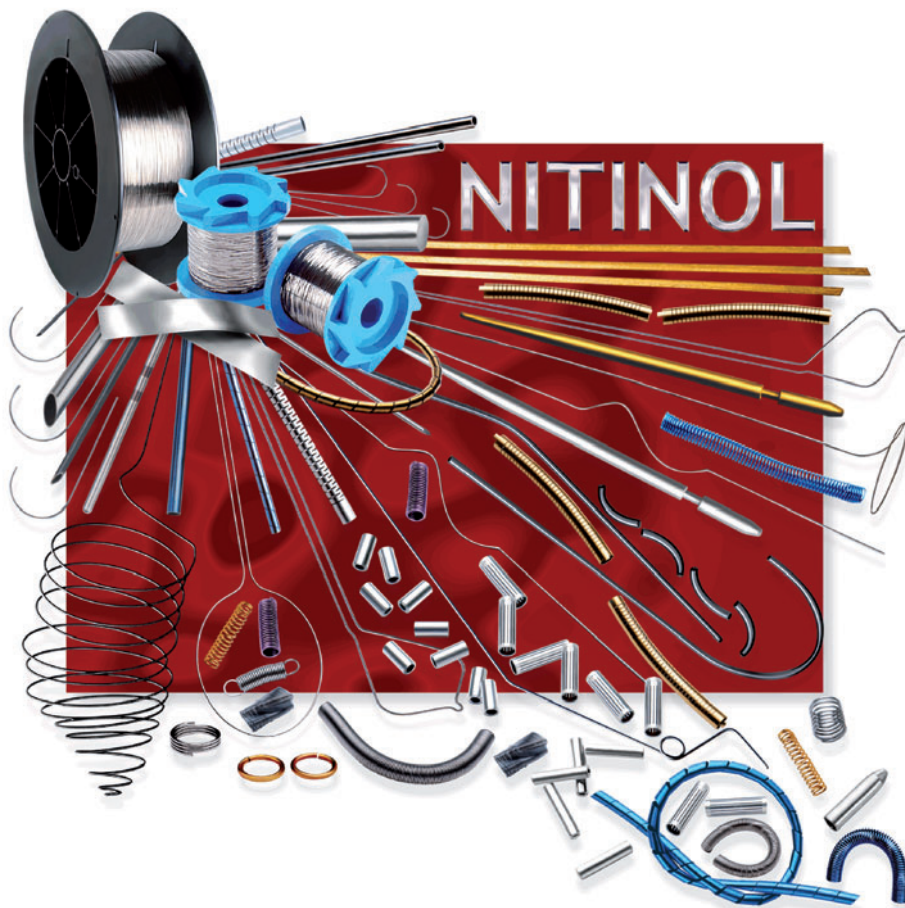
JMB OVERVIEW

Metal
Joining

Jewellery
& Watches

Chemicals
& Noble Metals

Refining



Geschichte

Seite 2

Eigenschaften

Seite 4

Anwendungen

Seite 9

Bearbeitung

Seite 14

GESCHICHTE

Formgedächtnis ist eine Materialeigenschaft, die schon früh von Tonkrügen her bekannt war. Wurde bei deren Herstellung ein Fehler, wie z.B. eine Eindellung, gemacht, dieser aber im plastischen Zustand noch korrigiert, so half das wenig. Nach dem Brennen war der Fehler wieder vorhanden.

Dass Metalllegierungen einen vergleichbaren Effekt zeigen können, wurde erst im letzten Jahrhundert beobachtet. Die Gefügetransformation, die letztlich die Formgedächtniseigenschaften (Memory-Effekt) bewirkt, wurde 1932 an einer Gold-Cadmium-Legierung gefunden. Ebenso wurde eine solche Transformation 1938 bei einer Messinglegierung beobachtet. Aber erst 1951 wurde der Memory-Effekt selbst an einem Barren einer Gold-Cadmium-Legierung von Read und Mitarbeitern¹ festgestellt.

Am Naval Ordnance Laboratory (**NOL**) wurde 1962 eine Nickel-Titan-Legierung von Buehler et al.² gefunden, die ebenfalls den Memory-Effekt zeigte. Durch Variation des Nickelanteils konnte die Temperatur, bei der die Gefügetransformation stattfand, im Bereich von unter 0 °C bis 100 °C eingestellt werden. Diese Gruppe der **Nickel-Titan**-Legierungen wurde nach den Elementsymbolen sowie nach der Abkürzung für das Institut **NiTiNOL** genannt.

Obwohl inzwischen einige Formgedächtnislegierungen (FGL) gefunden wurden, blieb Nitinol diejenige, die die grösste Verbreitung und Anwendung fand. Dies liegt daran, dass die Legierung aus gut verfügbaren und bezahlbaren Komponenten besteht, aber auch daran, dass Nitinol einen deutlich ausgeprägteren Memory-Effekt zeigt als andere Formgedächtnislegierungen. Gleichzeitig ist sie robuster gegen Überhitzung und kann ein Vielfaches mehr an Verformungszyklen mitmachen, ohne dass hierbei ein Verlust der Effektgrösse auftritt.

Tabelle 1:

Eigenschaften technisch und wirtschaftlich wichtiger Formgedächtnislegierungen

Parameter	NiTi	CuZnAl	CuAlNi
Dichte [g/cm ³]	6.4 ... 6.5	7.8 ... 8.0	7.1 ... 7.2
Zugfestigkeit [Mpa]	800 ... 2000	400 ... 700	700 ... 800
Zulässige Spannung σ_{zul} [Mpa]	250	75	100
Bruchdehnung [%]	40 ... 50	10 ... 15	5 ... 6
Maximale A ₅ -Temp. [°C]	120	120	170
Überhitzbarkeit [°C]	400	160	300
Einweg max. ϵ_1 [%]	8	4	5
Zweiweg max. ϵ_2 [%]	4	1	1.2
Zahl der Zyklen [n]	100000	10000	1000
Verminderung der Effektgrösse [%]	0	ca. 10	ca. 10

¹ L.C. Chang and T.A. Read, Trans. AIME, 1951, v. 191, p. 47

² W.J. Buehler, J.V. Gilfrich, R.C. Wiley, J. Applied Physics, v. 34, 1963, p. 1475

Innerhalb von wenigen Jahren nach der Entdeckung von Nitinol wurden weitere Legierungen gefunden, die einen Memory-Effekt zeigen. Wie aus Tabelle 2 ersichtlich, bestehen diese teilweise aus teuren oder exotischen, manchmal sogar toxischen Metallen. So sind lediglich die kupferhaltigen Legierungen neben Nitinol kommerziell interessant.

Tabelle 2: Formgedächtnislegierungen

Legierung	Zusammensetzung	Transformations- temperaturbereich [°C]	Transformations- Hysterese [°C], ca.
AgCd	44 ... 49%-at. Cd	-190 ... -50	15
AuCd	46.5 ... 50%-at. Cd	30 ... 100	15
CuAlNi	14 ... 14.5%-gew. Al 3 ... 4.5%-gew. Ni	-140 ... 100	35
CuSn	ca. 15%-at. Sn	-120 ... 30	
CuZn	38.5 ... 41.5%-gew. Zn	-180 ... -10	10
CuZnX (X = Si, Sn, Al)	wenige%-gew. X	-180 ... 200	10
InTl	18 ... 23%-at. Tl	60 ... 100	4
NiAl	36 ... 38%-at. Al	-180 ... 100	10
NiTi	49 ... 51%-at. Ni	-50 ... 110	30
FePt	ca. 25%-at. Pt	ca. -130	4
MnCu	5 ... 35%-at. Cu	-250 ... 180	25
FeMnSi	32%-gew. Mn, 6%-gew. Si	-200 ... 150	100

Vor allem in den Jahren 1960–1970 erschmolzen viele Firmen Nickel-Titan-Legierungen. Oft jedoch mit nur mässigem Erfolg. Es kam zu einer Vielzahl von Patentanmeldungen für mögliche Produkte, jedoch kamen die meisten nie zur Anwendung. Die wohl erste kommerzielle Anwendung kam von der Foxboro Instruments Company, die einen Stift-Aktuator für einen Bandschreiber entwickelte. Im Jahr 1969 entwickelte Raychem Corporation of Menlo Park ein Produkt, welches bis heute die Anwendung für Nitinol blieb: Cryofit[®], eine Kupplung für Hydraulikleitungen.

Viele Millionen dieser Kupplungen kamen zum Einsatz, ohne dass es zu Ausfällen kam. Etwa zur gleichen Zeit kam Nitinol auch in der Zahntechnik zum Einsatz, da es aufgrund seiner superelastischen Eigenschaften hervorragend für Zahnspannen geeignet war. In den achtziger Jahren stiegen Japan und Russland in die Entwicklung von Nitinollegierungen ein. Vor allem die superelastischen Eigenschaften wurden für neue Produkte vermarktet. Bis in die frühen neunziger Jahre gab es immer mehr Firmen, die Nitinolprodukte lieferten. Shape Memory Applications Inc., im Jahr 2001 von Johnson Matthey akquiriert, produziert eine breite Palette von Nitinollegierungen, die in vielen verschiedenen Formen oder als Teile lieferbar sind. Hauptsächlich wird für medizinische Anwendungen produziert, doch auch andere Industrien haben mittlerweile Nitinol für sich entdeckt.



Cryofit[®]-Kupplungen

EIGENSCHAFTEN VON NITINOL

Tabellen 1 und 2 geben eine knappe Zusammenfassung mechanischer Eigenschaften von NiTi-Legierungen. Die herausragenden Eigenschaften sind aber der Formgedächtniseffekt und die Superelastizität dieser Werkstoffe. Was steckt hinter diesen Effekten, wodurch lassen sie sich erklären?

Der Formgedächtniseffekt

Grundlage für das Auftreten dieses Effektes sind Umwandlungen in der Gitterstruktur des Metallgefüges. Bei normaler Temperatur liegt das Metallgefüge in der sogenannten Martensit-Struktur vor. Bei erhöhter Temperatur findet eine Phasenumwandlung in die Austenit-Struktur statt. Diese Art der Phasenumwandlung findet man bei verschiedenen Metallen und Metallegierungen. Aussergewöhnlich bei Nitinol, bzw. bei FGL, ist jedoch, wie diese Umwandlungen stattfinden. Zum einen sind sie reversibel, d.h. umkehrbar ohne dass plastische Defekte auftreten, und sie verlaufen diffusionslos, d.h., die Atome in der Gitterstruktur wechseln nicht ihre Plätze. Ausserdem verlaufen martensitische Umwandlungen ohne Volumenänderung, ganz im Gegensatz zu Stahl, bei dem eine deutliche Volumenänderung auftritt. Grund für das gleichbleibende Volumen während der Phasenumwandlung ist, dass sich die neuen Gitterstrukturen durch reine Scherdeformation bilden können. Damit einher geht eine wohlgeordnete Zwillingsanordnung der Elementarzellen.

Nochmals festgehalten: Der Formgedächtniseffekt beruht auf der diffusionslosen, reversiblen Phasenumwandlung der Austenit- in die Martensitstruktur, wobei keine Volumenänderung stattfindet, sondern vielmehr die Atome in der Elementarzelle durch reine Scherdeformation eine geordnete Zwillingsanordnung einnehmen.

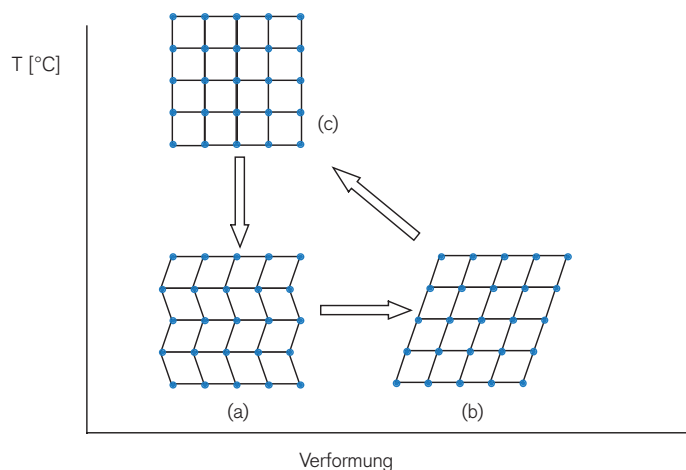


Abbildung 1: Gefügeveränderungen bei FGL

Wird nun ein Teil, z. B. ein Draht, der in einer geraden Form mit oben beschriebenem Gefüge vorliegt (Abb. 1[a]) verbogen, so wird lediglich die Zwillingsanordnung einzelner Kristalle umgeordnet (Abb. 1[b]). Dafür sind keine grossen Kräfte notwendig und die Deformation ist scheinbar bleibend. Man spricht auch von Pseudoplastizität. Erwärmt man nun diesen verbogenen Draht, so findet ab einer bestimmten Temperatur (meist deutlich unter 100°C) die Umwandlung in das Austenitgefüge statt (Abb. 1[c]). Da dieses praktisch die gleichen makroskopischen Abmessungen

hat wie die ursprüngliche Zwillingsform, nimmt das Material auch wieder seine ursprüngliche Form ein. In diesem Beispiel richtet sich also der Draht wieder gerade aus. Die Kraft, mit der die Rückverformung stattfindet, ist dabei beträchtlich. Kühlt der Draht ohne äussere Spannung ab, so findet die Gefügeumwandlung in den Martensit statt, ohne Formänderung und unter Ausbildung der geordneten Zwillingsstruktur (Abb.1[a]). Man steht also wieder am Anfang des Zyklus.

Umwandlungstemperaturen

Wie oben erwähnt findet die Phasenumwandlung von Martensit in Austenit und umgekehrt bei bestimmten Temperaturen statt. Die hierbei wichtigsten sind die Anfangs- und Endtemperatur von Martensit in Austenit, die mit A_s für Austenit-Start und A_f für Austenit-Finish, sowie Temperaturen für die Rückumwandlung von Austenit in Martensit, die mit M_s für Martensit-Start und M_f für Martensit-Finish bezeichnet werden. Die jeweiligen Start- und Finish-Temperaturen unterscheiden sich deutlich, was zu einer thermischen Hysterese führt.

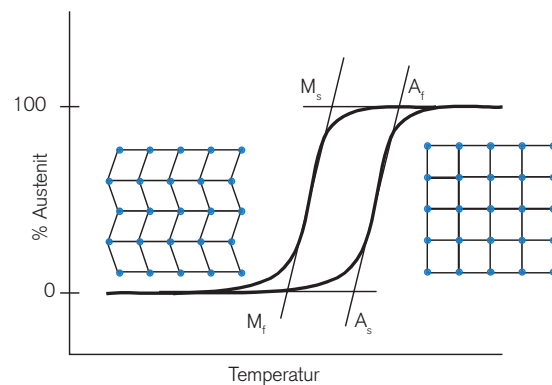


Abbildung 2: Umwandlungstemperaturen und Hysterese

Damit der Formgedächtniseffekt erhalten bleibt, müssen die Umwandlungen diffusionslos stattfinden. Um dies zu gewährleisten, dürfen die Übergangstemperaturen, auch Phasenumwandlungstemperaturen genannt, nicht über 300°C liegen. Wird auf über 400°C erhitzt, verlieren oder verändern FGL ihre Formgedächtniseigenschaft.

Technisch interessant sind oftmals Temperaturen, die im Bereich von flüssigem Wasser, also von 0 bis 100°C , liegen. Eine ebenfalls markante Temperatur ist die Körpertemperatur von 37°C , welche für medizinisch verwendete FGL-Teile von Bedeutung ist, da deren Umwandlungstemperatur unterhalb der Körpertemperatur liegen muss, wenn die Rückumwandlung im Körper stattfinden soll oder eben deutlich darüber liegen, wenn keine Rückumwandlung im Körper stattfinden darf. Ein Beispiel für Ersteres sind chirurgische Instrumente, die mittels eines Katheters im zusammengefalteten Zustand eingeführt werden und sich dann im Körperinnern entfalten sollen.

Die verschiedenen Effekte von FGL

Der Einwegeffekt

Das oben beschriebene Beispiel eines Drahtes, der verbogen wird und nach Erwärmung wieder seine ursprüngliche Form einnimmt, entspricht dem Einwegeffekt.

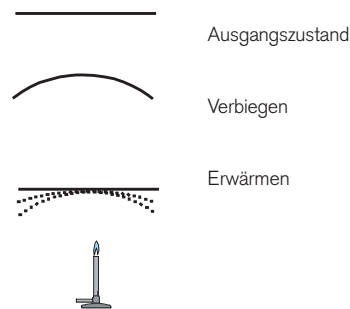


Abbildung 3: Einwegeffekt (schematisch)

Die relevanten Schritte hier sind

- Material liegt in der Martensitphase mit einer verzwilligten Gitterstruktur vor.
- Durch Verformen wird eine Martensitstruktur erzwungen, die entzwilligt ist.
- Durch Erwärmen findet die Phasenumwandlung in den Austenit statt, die ursprüngliche Form wird eingenommen.
- Beim Abkühlen entsteht wieder die Martensitphase mit ihrer typischen Zwillingsstruktur.

Der Zweiveffekt

Beim Einwegeffekt wird die beim Verformen aufgebaute Spannung durch Erwärmen und Phasenumwandlung wieder abgebaut. Nun kann aber auch durch innere Spannungen eine selbständig ablaufende Verformung erreicht werden. Durch geschicktes Ausnutzen innerer (intrinsischer) und äußerer (extrinsischer) Spannungen (z. B. Rückstellfeder o.ä.) kann das Material trainiert werden und es kommt zu einem Phänomen, welches als Zweiveffekt bekannt ist.

Dies äußert sich derart, dass beim Erwärmen eine bestimmte Form eingenommen wird, beim Abkühlen aber eine andere Form in Erscheinung tritt. Somit kann durch Erwärmen und Abkühlen das Bauteil zwei vordefinierte Formen einnehmen – es erinnert sich sozusagen an zwei Formen. Eine ideale Voraussetzung in der Aktuatortechnik.

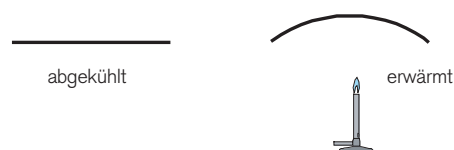


Abbildung 4: Zweiveffekt (schematisch)

Die relevanten Schritte hier sind

- Trainieren des Materials führt zu Martensitgefüge ohne Zwillingsstruktur.
- Bei Erwärmung geht das Material in das Austenitgefüge über und nimmt seine Hochtemperaturform ein.
- Beim Abkühlen wandelt sich das Material lediglich wieder in das Martensitgefüge ohne Zwillingsstruktur um und nimmt diese entsprechende Form ein (Tiefemperaturform).
- Erneutes Erwärmen führt wieder zum Austenit mit seiner Hochtemperaturform.

Man unterscheidet verschiedene Arten des Trainings bzw. der Erzeugung des Zweifacheffekts

- Aufgrund starker Martensitverformung, bei dem das Material so stark verformt wird, dass ein irreversibler Anteil zurückbleibt.
- SME Training: **S**hape **M**emory **E**ffekt Training, wiederholtes Durchführen geringer Martensitverformung.
- SIM Training: **S**tress **I**nduced **M**artensit Training, wiederholtes Verformen im Hochtemperaturzustand, wodurch ein spannungsinduzierter Martensit entsteht.
- Kombiniertes SME/SIM Training: Verformung im Hochtemperaturzustand, Fixieren und Abkühlen zum Martensitgefüge.
- Aufgrund von Ausscheidungen: Ein nickelreiches Ni-Ti-Bauteil wird verformt und gealtert, wobei sich Ti_3Ni_4 -Ausscheidungen bilden, die bestimmte Vorzugsorientierungen aufweisen. Dieser Effekt ist sehr stark ausgeprägt und wird All-Round-Effekt genannt.

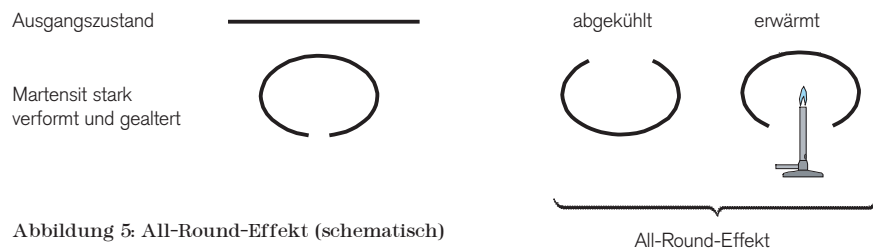


Abbildung 5: All-Round-Effekt (schematisch)

Pseudoelastizität bzw. Superelastizität

Richtigerweise spricht man von Pseudoelastizität. Der Begriff Superelastizität ist ursprünglich eine Kreation von Marketingleuten, da sich dies spektakulärer anhört und besser verkaufen lässt. Inzwischen ist der Begriff jedoch so verbreitet, dass er synonym verwendet wird.

Superelastische Legierungen können bis zu 10-mal mehr verformt werden als herkömmliche Federstähle, ohne dass sie dabei plastisch verformt werden. Spezielle einkristalline Legierungen können sogar bis zum über 20-fachen verformt werden, ohne Schaden zu nehmen bzw. dauerhaft verformt zu bleiben. Hierbei tritt ein wiederum interessantes Verhalten der FGL-Legierungen auf: Nach einer kurzen elastischen Verformung, die sich linear zur angelegten mechanischen Spannung verhält, folgt ein Plateau, bei dem sich das Material verformt, ohne dass die Belastung, bzw. die Spannung, wesentlich erhöht werden muss. Dieses Verhalten ist sehr ungewöhnlich, da sich beispielsweise Federstahl fast linear mit der angelegten Spannung verformt und erst kurz vor dem Brechen davon abweicht.

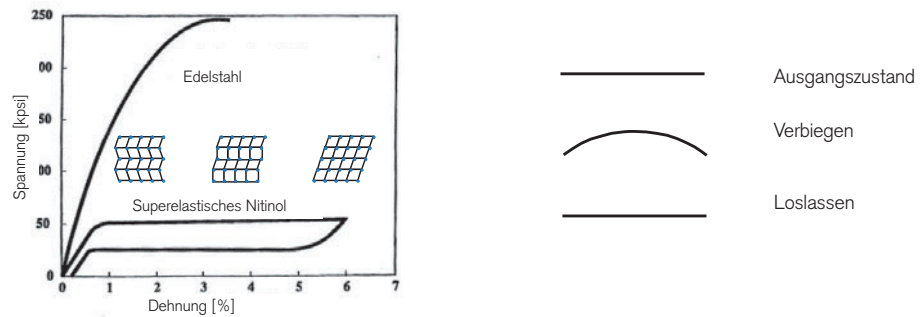


Abbildung 6: Plateauspannung von FGL und Superelastizität (schematisch)

Wie kann die Superelastizität erklärt werden?

Beim Stahl werden bei Verformung die einzelnen Ebenen der Gitterstruktur gewaltsam gegeneinander verschoben, und zwar alle Ebenen jeweils nur etwas. Dadurch erklärt sich auch der lineare Zusammenhang zwischen Spannung und Verformung. FGL verhalten sich anders. Hier wird beim Anlegen einer mechanischen Spannung nacheinander Ebene für Ebene verschoben. Da die Spannung zum Verschieben einer Ebene immer ungefähr gleich groß ist, ergibt sich daraus auch das beobachtete Spannungsplateau. Dieser nichtlineare Spannungsbereich wird erst nach einer Verformung bzw. auch Dehnung von ca. 8% wieder verlassen. Die Spannung innerhalb dieses elastischen Bereiches wird Plateauspannung genannt.

Biegt man einen superelastischen Stab von Hand, so spürt man deutlich diesen Bereich des Plateaus – das Material lässt sich gummiartig verformen. Eine zunächst irritierende Erfahrung beim Biegen eines Metalls!

ANWENDUNGEN UND EINSATZGEBIETE VON FGL

Medizin

Verklammern von Knochenbrüchen

Hierzu wird eine Klammer in der Hochtemperaturphase geformt. Nach Abkühlung wird die Klammer etwas aufgebogen.

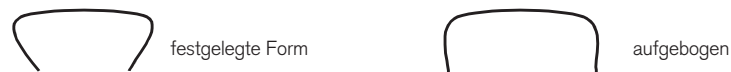
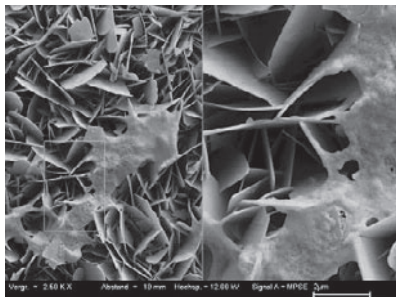


Abbildung 7: Klammern zur Fixierung von Knochenbrüchen (schematisch)

Sie bleibt in diesem Zustand, bis sie dann in eine passende Bohrung im Knochen eingeführt wird. Da dies immer noch im «kalten» Zustand passiert, ist es nicht notwendig die Klammer aufzubiegen oder anderweitig Kraft auf sie auszuüben. Dies erleichtert das Einbringen erheblich und vermeidet auch ein Abrutschen am Knochen. Sobald die Klammer auf Körpertemperatur erwärmt ist, geht sie in die austenitische Phase über und strebt somit auch ihre ursprüngliche Form an. Dadurch werden die Knochenteile zusammengepresst.



Abbildung 8: Klammerung von Knochenbrüchen (schematisch)



Kalziumphosphatbeschichtung

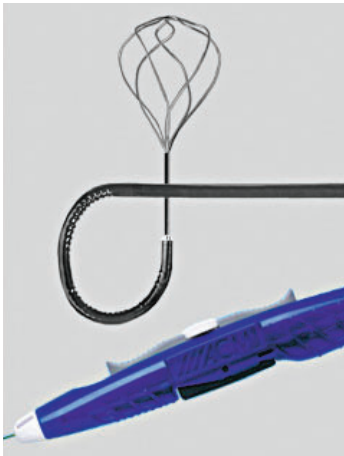
Um die ohnehin gute Bioverträglichkeit von Nitinol noch weiter zu verbessern, gibt es Bestrebungen die Oberfläche mit einer Kalziumphosphatschicht zu überziehen. Diese soll die mögliche Freisetzung von Nickelionen verhindern sowie dem Körper eine Knochenmineral-ähnliche Struktur vorgaukeln.

Guidewires

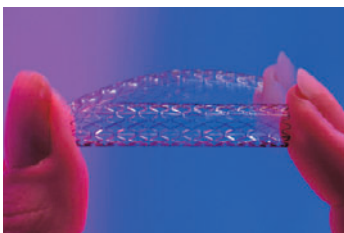
In der Chirurgie werden minimalinvasive Methoden vermehrt eingesetzt. Sie erfordern kleinere Schnitte als herkömmliche Operationen und sind dadurch deutlich weniger belastend für den Patienten. Ein Guidewire wird benutzt, um beispielsweise über eine Arterie an die geschädigte Stelle zu kommen. Dieser Führungsdraht dient dann dazu mit anderen Gerätschaften an dieser Stelle den eigentlichen operativen Eingriff vorzunehmen. Die besonderen Eigenschaften von Nitinol wie hohe Elastizität, hohe Knickstabilität bei gleichzeitig hoher Stabilität gegenüber Verdrillungen und doch genügend Steifheit, um den Draht vorwärtsschieben zu können, machen dieses Material überaus geeignet für diese Anwendung.



Hypotubes



Instrumente

Flexibilität und Formstabilität
eines Nitinol-Stents

Hypotubes

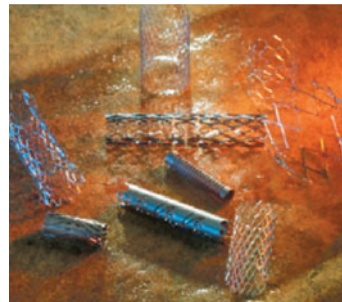
Hypotubes sind dünnwandige, sehr flexible Rohre, die ebenfalls in der minimalinvasiven Chirurgie zum Einsatz kommen. Sie werden entlang eines Guidewires in das Gefäß eingeschoben. Danach wird der Guidewire entfernt. Hypotubes kommen selbst um enge Biegungen, ohne dabei einzuknicken. Nun können Katheder, chirurgische Kleinstinstrumente, Medikamente, Laser usw. eingeführt werden, schnell und gezielt, ohne die Adern zu verletzen oder jedes Mal den Weg aufs Neue suchen zu müssen.

Chirurgische Instrumente

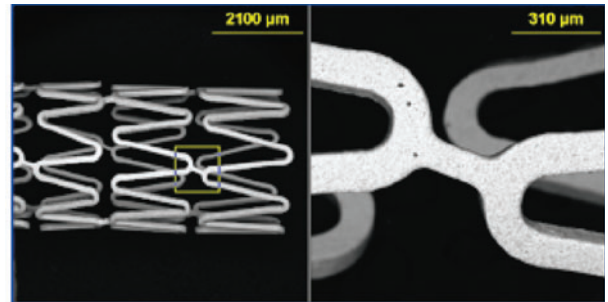
Mikroscheren, Skalpelle oder Greifwerkzeuge können, aus Nitinol gefertigt, extrem zusammengefaltet und durch ein Hypotube zum Einsatzort geführt werden. Dort entfalten sie sich aufgrund ihrer superelastischen Eigenschaften und können ihren Zweck erfüllen. Nach Gebrauch werden sie wieder eingezogen und dabei erneut so stark deformiert, dass sie wieder durch die enge Röhre passen.

Stents

Ein Stent sieht wie ein röhrenförmiges Drahtgeflecht aus.



Stents



Die Aufgabe eines Stents ist es, eine Arterie offen zu halten. Eine krankhaft verengte Arterie kann operativ wieder durchgängig gemacht werden. Danach wird ein Stent an diese Stelle eingesetzt, um ein erneutes Verschliessen oder Zusammenfallen zu verhindern. Wiederum sind es die superelastischen Eigenschaften von Nitinol sowie dessen hervorragende Biokompatibilität, die dieses Material für diese Anwendung prädestinieren. Bei der Fertigung geht man meist von einem Nitinolrohr aus, das durch Laserschneiden zum Stent verarbeitet wird. Dann wird dieser durch Wärmebehandlungen auf seinen Enddurchmesser eingestellt. Durch weitere Nachbehandlungsschritte erreicht man, dass Materialermüdung im Gebrauch kaum auftritt sowie die Korrosionsbeständigkeit verbessert wird. Durch eine Oberflächenbehandlung kann das Risiko einer Blutgerinnung oder von Zellwucherungen im Körper minimiert werden. Der Stent kann nun zusammengepresst durch ein Hypotube platziert werden. In der Ader entfaltet er sich selbständig. Da sein Durchmesser etwas grösser gewählt wurde, als die Arterie selbst ist, hält er stets einen leichten Druck aufrecht. Dabei ist er aber beweglich und macht die Bewegungen des Körpers mit.

Technik

Dünnschicht-Pumpen

Eine höchst interessante Möglichkeit bietet Nitinol in einer miniaturisierten Pumpe für Medikamente innerhalb des Körpers. Solch eine Pumpe kann z. B. Insulin nach Bedarf abgeben. Hierzu wird die Pumpe mit einem Glucosesensor gekoppelt. Dieser misst ständig den Blutzuckerspiegel und gibt im Bedarfsfall ein Signal an die Pumpe Insulin zu fördern. Der Aufbau solch einer Pumpe gleicht einer Membranpumpe. Allerdings ist die aus Nitinol gefertigte Membran auch gleichzeitig der Aktuator. Im «kalten» Zustand ist sie flach. Durch einen Stromfluss erwärmt, nimmt sie die Form einer Glocke ein. Hieraus ergibt sich eine Pumpbewegung. Miniventile, ein Medikamentenreservoir sowie eine Stromversorgung komplettieren die Pumpe.

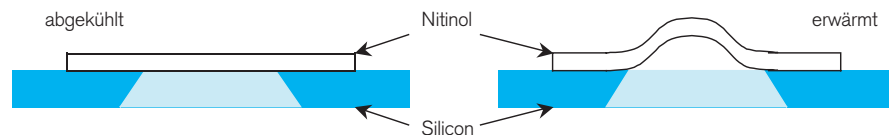


Abbildung 9: Dünnschichtpumpe (schematisch)

Stellmotor Kosmak

Dieser von Maschinenbauern der Ruhr-Universität ersonnene Stellmotor ist äusserst kompakt gebaut und verbraucht nur dann Energie, wenn er die Stellung ändert. Jedoch nicht, um eine der beiden Endstellungen zu halten. Kernstück ist ein in einem Aluminiumrohr geführter Formgedächtnisdraht. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung erwärmt er sich und zieht sich gegen den Widerstand einer Rückstellfeder zusammen. Dabei dreht er eine an seinem Ende befestigte Scheibe. Mit der Scheibe dreht sich die daran befestigte Antriebswelle und öffnet z. B. eine Lüftungsklappe. Um diese Stellung trotz Rückstellfeder zu halten, müsste der Draht jedoch ständig zusammengezogen, also erwärmt werden. Es würde dauerhaft Energie verbraucht. Um das zu vermeiden, kommt ein so genannter Flip-Flop-Mechanismus zum Einsatz. Er funktioniert wie ein Kugelschreiber: An der Scheibe ist mit einem Gelenk ein Rasthebel befestigt, der mit ihr zusammen vom Draht bewegt wird. Der Draht kann die Scheibe nur bis zu einem eingebauten Anschlag ziehen. Ist sie dort angelangt, zieht er nur noch den Hebel weiter aufwärts, bis er an einer bestimmten Stelle einrastet. Soll sich die Klappe wieder schliessen, muss sich der Draht durch Erwärmung wieder zusammenziehen. So öffnet sich der Flip-Flop-Mechanismus und die Rückstellfeder bringt die Klappe in die Ausgangsstellung, während der Draht abkühlt.

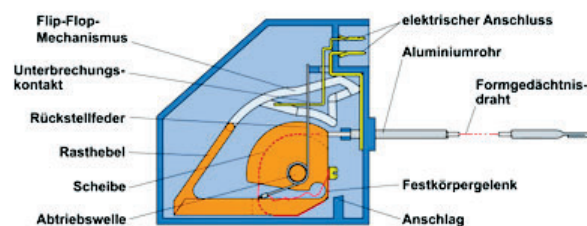


Abbildung 10: Stellmotor Kosmak

Wärmekraftmaschine

Ein Antrieb, der eine dauerhafte Drehbewegung ermöglicht, ist mit einem Endlos-Nitinoldraht realisierbar. Diese sogenannte Wang-Maschine nutzt das Temperaturgefälle, das zwischen einem Wasserbad und der Umgebung auftritt.

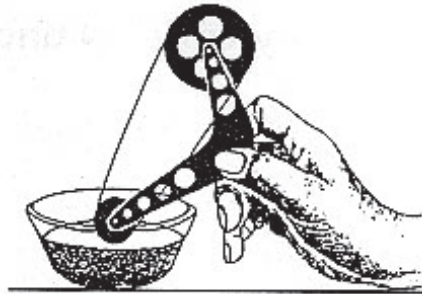


Abbildung 11: Wärmekraftmaschine - Wang-Maschine

Die Anordnung wird etwas schräg in ein Schälchen mit lauwarmem Wasser eingetaucht. Wichtig ist, dass das Rad weniger als zur Hälfte eintaucht. So ergibt sich am Anfangspunkt (1), Abb. 12, an dem der Draht das Rädchen berührt, eine höhere Temperatur als am Endberührungspunkt (2). Beim Durchlaufen des Wasserbades versucht der Draht eine gerade Ausrichtung einzunehmen, was dann zur Rotation führt. Man sieht dies bei genauerer Betrachtung. Der Draht steht auf der Abrollseite etwas ab. Manchmal ist es notwendig, das Ganze anzustossen.

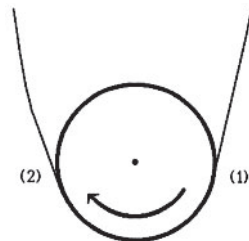


Abbildung 12: Wang-Maschine Detail

Eine für Antriebszwecke taugliche Entwicklung ist die sogenannte Schrägscheiben-Wärmekraftmaschine der FH Konstanz, bei der die Längenänderung von FGL-Drähten durch eine schräg gestellte Scheibe in eine Drehbewegung umgesetzt wird.

Verschlussstopfen in Diesel-Einspritzpumpen

Wie eingangs erwähnt, hat die Firma Raychem Corporation eine Kupplung für Hydraulikleitungen auf den Markt gebracht. Eine andere Anwendung, bei der ebenfalls sehr hohe Drücke auftreten, sind Verschlussstopfen in einer Diesel-Einspritzpumpe. Der eigentlichen Injektionspumpe vorgeschaltet ist ein Dosierventil, welches die Kraftstoffmenge dosiert, die dann in den Brennraum eingespritzt wird. Der Verbindungskanal zwischen Dosierventil und Injektionspumpe wird ausgebohrt. Die gängige Methode, die offene Seite der Bohrung wieder zu verschliessen, ist

es, einen Stahlpfropfen einzulöten. Dabei kommt es vor, dass die Lötstelle Fehler aufweist, was wiederum zu Reklamationen führt. So waren z. B. 1995 89% aller Reklamationen auf Ermüdung der Lötstelle zurückzuführen. Ein neuer Ansatz zur Lösung des Problems verwendet einen Nitinolstab. Dieser wird mit einem grösseren Durchmesser, als dem Bohrloch entspricht, vorbereitet und dann auf einen dünneren Durchmesser heruntergezogen. Für den Einbau wird der Bolzen in das Bohrloch gesteckt und das Ganze auf 150, dann auf 200 °C erwärmt. Dabei geht das Nitinol wieder in die Austenitphase über und nimmt seine ursprüngliche Form mit grösserem Durchmesser wieder ein. Dauerversuche, mit deutlich höheren Drücken als beim Normalbetrieb auftreten, zeigten, dass dieser Verschluss erst dann versagt, wenn die herkömmlich verlöteten Stopfen schon längst aufgegeben haben.

Die oben genannten Beispiele sind nicht erschöpfend. Es gibt eine Vielzahl weitere Anwendungen, die hier nicht alle näher vorgestellt werden können, wie z. B. Kaffeemaschinen, die selbstständig den Kaffeebehälter ausschwenken, das Öffnen von Wasserventilen in Spülmaschinen, Formbügel in Büstenhaltern, platzsparende Hydraulikventile, Klemmen und Drähte für Zahnspangen, Einsatz als Spannelement in Spannbetonbauteilen und viele mehr.

BEARBEITUNG

Verbinden mit anderen Teilen

Es ist sehr schwierig Nitinol mit andersartigen Materialien zu verbinden. Deshalb wird meist der Weg der mechanischen Verbindung gewählt. Die zu verbindenden Teile werden gekrimpt, gequetscht oder gestaucht, um eine stabile, dauerhafte Verbindung herzustellen. Wenn aber gelötet werden muss, ist besonderes Augenmerk auf die Entfernung der Titandioxid-Schicht zu legen. Hartlöten und Schweißen ist problematisch, da es leicht zu Rissen in der Verbindungsstelle kommen kann. Laserschweißen kann bei kleinen Teilen angewendet werden. Anschliessend ist aber eine Wärmebehandlung notwendig. Dabei besteht die Gefahr, dass die Formgedächtniseigenschaften oder die Superelastizität vom Nitinol verändert wird. Auf alle Fälle ist diese Art der Verbindung nur anzuraten, wenn diese keiner besonderen Last oder Spannung ausgesetzt wird.

Unter Verwendung eines aggressiven Flussmittels und guter Prozesskontrolle kann mit Sn/Ag-Legierungen gelötet werden. Unterstützend wirken dabei Nickel- oder Gold/Nickel-Beschichtungen des Nitinolteiles. Andererseits lässt sich der Formgedächtniseffekt auch oftmals dafür einsetzen, um eine Verbindung mit anderen Materialien zu realisieren. Johnson Matthey bietet ein Nitinol-Lötkit an, das geeignetes Flussmittel, Lot und eine Anleitung zum Löten enthält.

Beschichten

Das Galvanisieren von Nitinol bedarf besonderer Vorbereitung, um die Titandioxid-schicht vollständig zu entfernen. Hier kommen Strahlverfahren oder chemisches Ätzen zur Anwendung. Ausserdem ist zu berücksichtigen, dass die aufgebrauchte Schicht die extremen Verformungen und Spannungen, dem das Nitinolteil ausgesetzt wird, auch standhält. Bei ungünstigen Badeinstellungen kann es auch zu Wasserstoffversprödung kommen.

Sehr oft kommen Kunststoffbeschichtungen zum Einsatz. Dabei ist zu beachten, dass nachfolgende Einbrennprozeduren, wie sie z. B. für Teflon angewendet werden, nicht zu einer Veränderung der materialspezifischen Eigenschaften führen. Im Gegensatz zur galvanischen Beschichtung wirkt hier die Oxidschicht meist haftverbessernd.

Chemische oder physikalische Abscheidungen aus der Dampfphase (CVP- oder PVD-Techniken) wurden auch schon erfolgreich angewendet.

Spanabhebende Bearbeitung und Stanzen

Mit den traditionellen Werkzeugen kann Nitinol gebohrt, gedreht oder geschliffen werden. Allerdings muss der Anwender einen erhöhten Werkzeugverschleiss in Kauf nehmen.

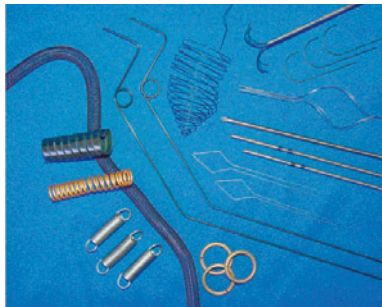
Dasselbe gilt für das Stanzen. Die Stanzwerkzeuge haben nur eine geringe Standzeit. Ausserdem kommt es bei dieser Art der Bearbeitung zu relativ hohen Ausschussraten.

Laserbearbeitung und EDM-Schneiden gehören zum Standardrepertoire bei der Verarbeitung von Nitinol.

Verformung

Kaltverformung gestaltet sich schwierig, da das Material dabei versprödet. Durch nachfolgende Wärmebehandlungsschritte können diese Probleme teilweise beseitigt werden, bergen aber die Gefahr der Veränderung der Materialeigenschaften.

Warmverformung hingegen wird des Öfteren angewendet, da sie auch sehr einfach auszuführen ist. Man fixiert das Teil in der gewünschten Position und führt die Wärmebehandlung so durch, dass diese Form beibehalten wird. Dabei ist aber wieder zu beachten, dass die Materialeigenschaften wie Phasenumwandlungstemperatur oder Plateau-Spannung merklich verändert werden. Schwierig wird es, wenn man ein bereits fertig konditioniertes Nitinolteil verformen will. Dann müssen diese Eigenschaften wieder neu eingestellt werden.



Lieferformen Nitinol-Teile von Johnson Matthey

Lieferformen

Johnson Matthey kann Nitinol-Halbzeuge in verschiedenen Formen und Bauteile anbieten. Hierzu gehören Rohre, Drähte und Bleche. Diese können z.B. als geschliffene und lasergeschnittene Rohre, ultrafein polierte Drähte, Komponenten in superelastischer oder Formgedächtnis-Ausführung angeboten werden. Die Halbzeuge können auch auf Kundenwunsch vorgeformt bezogen werden. Zusätzlich bietet Johnson Matthey eine patentierte Löttechnik an.

Tabelle 3: Nitinol-Legierungen

Legierung	Phasenumwandlungstemperatur A_f [°C]	Typische Anwendung
C* (Chromium-doped)	0...10	Stents, Standarddrähte, Feindrähte
N (High Nickel)	0...20	Guidewires, Stents, Biegedome
S (Standard Superelastic)	10...20	Orthopädische Geräte, Operationswerkzeuge, Stents
B (Body Temperature)	20...40	Geräte, die durch Körpertemperatur aktiviert werden, Stents, Filter
M (Medium Temperature)	45...95	Biessame Operationswerkzeuge, Aktuatoren, Spielzeuge
H (High Temperature)	95...115	Biessame Operationswerkzeuge, Aktuatoren, Spielzeuge

* Enthält geringe Mengen an Chrom, alle anderen sind binäre Ni-Ti-Legierungen

Copyright:

Johnson Matthey & Brandenberger AG
Glattalstrasse 18
Postfach 485
CH-8052 Zürich
Telefon +41 (0)44 307 19 19
Telefax +41 (0)44 307 19 20

info@matthey.com
www.johnson-matthey.ch

Redaktion: Dr. Josef Diebold

Diese Publikation ist mit aller Sorgfalt,
aber ohne Gewähr für ihre Richtigkeit,
zusammengestellt worden.
Die Redaktion lehnt jede Haftung ab.
Abdruck und Wiedergabe sind nur gegen
Beleg und unter Angabe der Quelle frei.