

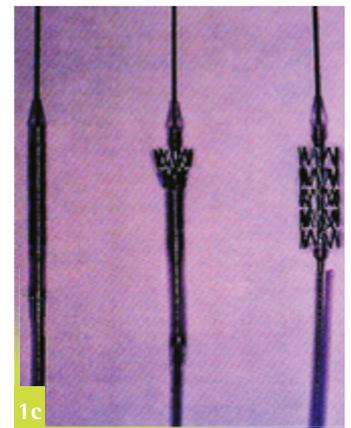
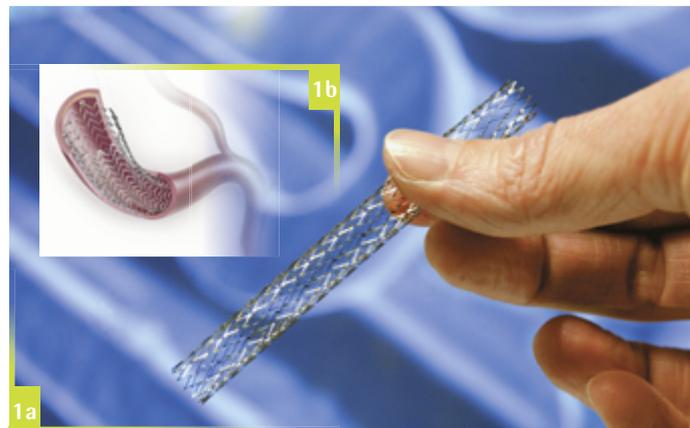
Metalle, die sich erinnern

MIT FORMGEDÄCHTNIS IMMER IN DER RICHTIGEN FASSUNG

Formgedächtnislegierungen (FGL) sind Metalle, bei denen eine Verformung durch Erwärmung rückgängig gemacht werden kann, das heißt, sie »erinnern« sich scheinbar an ihre

ursprüngliche Formgebung.

Eine Wissenschaftlerin vom Institut für Werkstoffkunde erläutert die Funktionalität dieser Metalle, die aufgrund ihrer besonderen mechanischen Eigenschaften besonders für die Raumfahrt, die Automobilindustrie oder die Medizintechnik von Interesse sind.



Die Nachfrage nach innovativen Werkstoffkonzepten hat in den letzten Jahren stark zugenommen, da neue Werkstoffe eine Schlüsselstellung bei der Entwicklung darstellen. Diese Werkstoffe müssen sich vor allem auf das jeweilige Anwendungsgebiet hinsichtlich ihrer physikalischen und mechanischen Eigenschaften anpassen lassen. Die so genannten Formgedächtnislegierungen besitzen die einzigartige Eigenschaft, sich wieder an ihre ursprüngliche Gestalt nach einer Verformung zu »erinnern«, das heißt durch Wärmezufuhr kann die ursprüngliche Form wiederhergestellt werden. Diese Eigenschaft macht Formgedächtnislegierungen für eine ganze Reihe von Anwendungsgebieten besonders interessant – von der Raumfahrt, über die Automobilindustrie bis hin zur Medizintechnik. So wird zum

Beispiel die Formgedächtnislegierung Nitinol zur Herstellung von Stents – Gefäßstützen – in der Biomedizintechnik verwendet. Bei den früher angewandten Verfahren wurde der Stent aus einer konventionellen Legierung gefertigt und durch einen Ballon an die Gefäßwand gepresst. Stents aus Nitinol entfalten sich unter Einfluss der körpereigenen Wärme selbst und ohne weitere Eingriffe auf die gewünschte Größe, und erweitern so das verengte Blutgefäß.

Ein weiteres Anwendungsbeispiel für Formgedächtnismaterialien findet sich in der Raumfahrt. So können zum Beispiel durch Widerstandserwärmung die Sonnensegel von Raumsonden im Welt- raum entfaltet werden, ohne dass hierfür aufwändige und schwere Antriebsmotoren notwendig sind.

Die bisher verwendeten Formgedächtnislegierungen können sich an ihre Form und Eigenschaften jedoch nur bei Temperaturen unterhalb von 80 °C »erinnern«, so dass diese nicht bei höheren Temperaturen eingesetzt werden können. Die Anwendung von Formgedächtnislegierungen im industriell interessanten Einsatzbereich mit erhöhten Temperaturen stellt eine besondere Herausforderung für die Werkstofftechnik dar. Hochtemperatur-Formgedächtnislegierungen, die auch bei erhöhten Temperaturen zuverlässig einsetzbar sind, besitzen ein enormes Anwendungspotenzial für unterschiedliche Anwendungen vom Automobilbau bis zur Luftfahrt. So könnten Hochtemperatur-Formgedächtnislegierungen beispielsweise eingesetzt werden, um Turbinen und andere Verbrennungsmaschinen ener-

getisch noch effizienter zu gestalten, oder um Vibrationen in technischen Anlagen zu reduzieren und damit nicht nur Geräuschemissionen zu unterdrücken, sondern auch die Lebensdauer der Bauteile wesentlich zu verlängern.

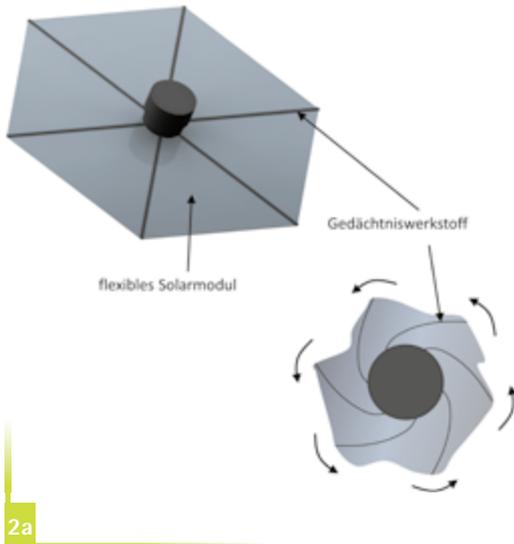
Die bisher verfügbaren Legierungen weisen einen Edelmetallanteil von etwa 30 Prozent auf und sind damit für die breite industrielle Anwendung nicht nutzbar. In der Forschergruppe »Hochtemperatur-Formgedächtnislegierungen – von den Grundlagen zur Anwendung« werden unter der Leitung von Professor Hans Jürgen Maier, der seit Oktober 2012 Leiter des Instituts für Werkstoffkunde am Produktionstechnischen Zentrum (PZH) ist, neue Hochtemperatur-Formgedächtniswerkstoffe erforscht, die keinen Edelmetallanteil aufweisen. Die Herausforderung hierbei ist, die

gen beruht auf einer temperaturabhängigen Umwandlung des Kristallgitters. Die meisten Metalle besitzen bis zu ihrem Schmelzpunkt dieselbe Kristallstruktur. Die Formgedächtnislegierungen weisen jedoch zwei unterschiedliche Strukturen (Phasen) auf, die der Werkstoff je nach Temperatur annimmt: die Hochtemperaturphase Austenit und Nieder-temperaturphase Martensit. Die Strukturumwandlung kann durch eine Temperaturänderung oder auch durch mechanische Spannungen herbeigeführt werden. Es lassen sich daher insgesamt drei Formgedächtniseffekte unterscheiden: der Einwegeffekt (EWE), der intrinsische Zweiwegeffekt (ZWE) und die Pseudoelastizität (PE). Abbildung 3 zeigt schematisch die drei Formgedächtniseffekte. Der Einwegeffekt, der auch bei den Sonnensegeln zum Einsatz kommt, ist in Abbildung 3a illustriert. Ein Werkstück

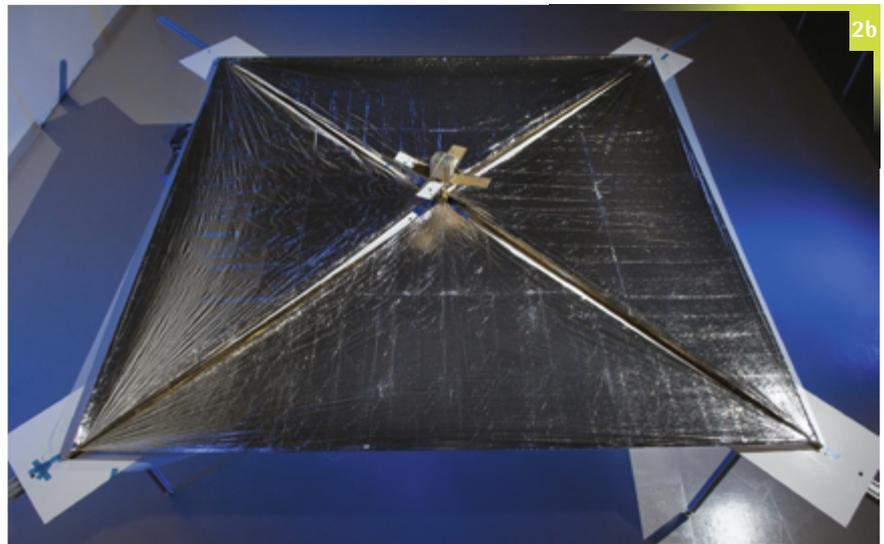
anschließende mechanische Verformung erfolgt durch Verschiebung der Zwillingsgrenzen. Erwärmt man den Werkstoff, wandelt er sich in Austenit um und das Bauteil nimmt die ursprüngliche Form wieder an. Abbildung 3b stellt die Pseudoelastizität dar. Hierbei wird das Bauteil im austenitischen Zustand, das heißt bei hoher Temperatur, verformt. Der pseudoelastische Effekt bedarf daher keiner Temperaturänderung und der Werkstoff kehrt selbst nach starken Verformungen bei Entlastung wieder in den Ausgangszustand zurück. Dieser Effekt wird zum Beispiel in Brillengestellen ausgenutzt. Ein solches Brillengestell hat unter anderem für Kinder und beim Sport einen hohen Gebrauchswert, denn es wird dank der Pseudoelastizität praktisch »unzerstörbar«.

Beim intrinsischen Zweiwegeffekt, der in Abbildung 3c

Abbildung 1
Stents aus einer NiTi-Formgedächtnislegierung, die sich infolge des Einflusses der Körperwärme nach dem Einsetzen selbständig entfalten
Quellen: a) picture-alliance/dpa/dpa-web; b) picture-alliance/dpa; c) eigene Darstellung



2a



2b

Mikrostruktur in diesen Legierungen so einzustellen, dass die besonderen Eigenschaften bei hohen Temperaturen über lange Zeiten und viele Belastungszyklen erhalten bleibt.

Das »Erinnerungsvermögen« der Formgedächtnislegierung

mit thermischem Erinnerungsvermögen, in der Abbildung als Büroklammer dargestellt, wird in der austenitischen Phase hergestellt und dann abgekühlt. Hierbei wandelt sich der Werkstoff in verzwilligten Martensit um, ohne seine Form zu ändern. Die

zu sehen ist, ändert der Werkstoff seine Form ausschließlich durch die Temperaturveränderung. Die Formänderung resultiert aus gezielt eingebrachten inneren Spannungen, die beim so genannten »Trainieren« der Legierung entstehen.

Abbildung 2
a) Schematische Darstellung des Entfaltungsmechanismus eines Sonnensegels durch die Anwendung einer Formgedächtnislegierung; b) entfaltetes Sonnensegel im Weltraum
Quellen: a) Eigene Darstellung; b) picture-alliance/dpa

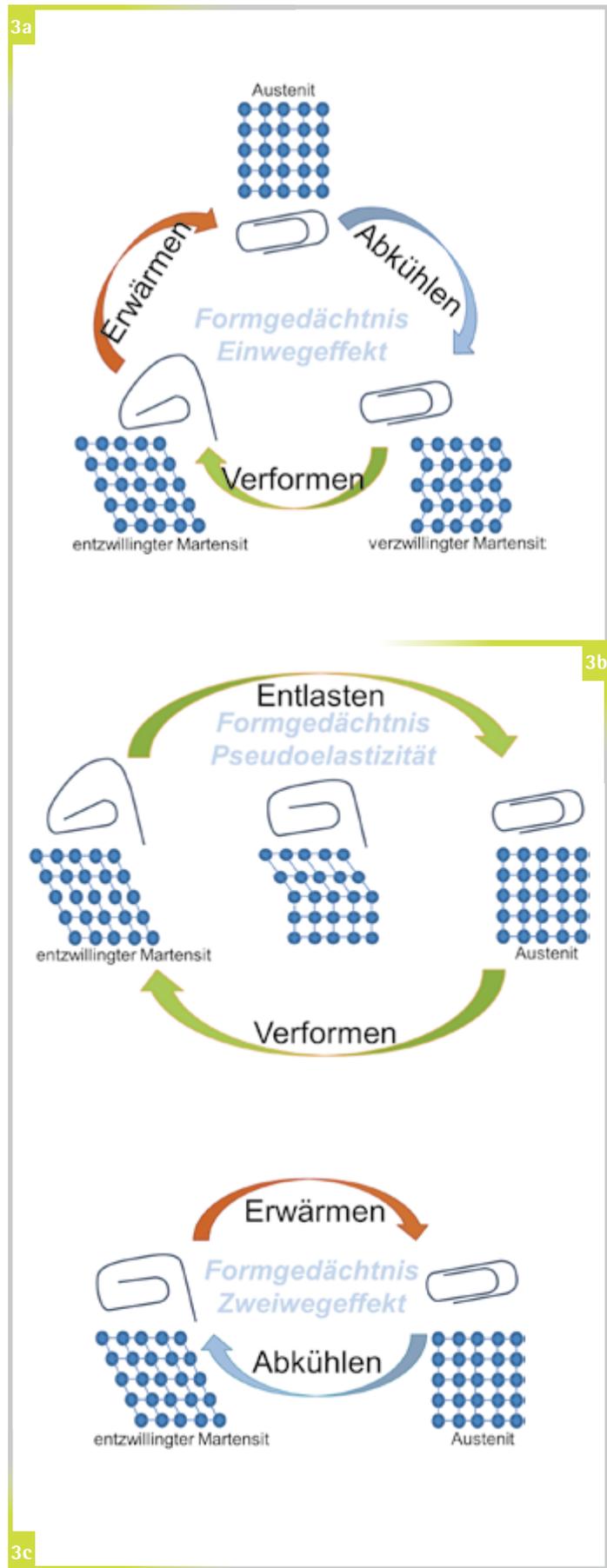


Abbildung 3
 a) Schematische Darstellung zum Einwegeffekt: Die Büroklammer kehrt nach der Verformung mittels Erwärmen in ihre Ausgangsform zurück. b) Zur Pseudoelastizität: Die Büroklammer nimmt direkt nach dem Entlasten ihre Ausgangsform wieder an. c) Zum Zweiwegeffekt: Die Büroklammer besitzt je eine bestimmte Form im kalten und warmen Zustand.
 Quellen: Eigene Darstellungen

Für die Anwendung der Bauteile ist wichtig, dass die Phasenumwandlungstemperaturen der Formgedächtnislegierungen maßgeblich durch die Legierungszusammensetzung und die Mikrostruktur bestimmt werden. Bei hohen Temperaturen können im Werkstoff jedoch Diffusionsvorgänge ablaufen, die die Mikrostruktur und damit auch die Eigenschaften der Legierungen im Laufe der Zeit verändern. Dadurch können auch die Hochtemperatur-FGL ihre speziellen Eigenschaften bei zyklisch thermischer und/oder mechanischer Beanspruchung verlieren. Für Bauteile aus diesen Werkstoffen bestimmt damit diese so genannte funktionelle Ermüdung primär die nutzbare Lebensdauer. Am Institut für Werkstoffkunde der Leibniz Universität Hannover werden vielversprechende Hochtemperatur-FGL unter thermomechanischer Belastung in Hinblick auf ihr funktionelles Ermüdungsverhalten untersucht (Abbildung 4). Schwerpunkt der Forschungsarbeiten ist die Optimierung der Mikrostruktur der Legierungen hinsichtlich der funktionellen Stabilität. Erste Ergebnisse zeigen bereits, dass das Verhalten der Hochtemperatur-FGL unter zyklischer Belastung über die Legierungszusammensetzung, eine Wärmebehandlung sowie durch die Auswahl der Kristallorientierung verbessert werden kann.

Der Einsatz von Hochtemperatur-FGL ist zukünftig unter anderem auch in sicherheitsrelevanten Baugruppen geplant, weswegen am Institut für Werkstoffkunde zusätzlich auch die strukturellen Ermüdungseigenschaften dieser Legierungen untersucht werden. Hierzu werden hochzyklische Ermüdungsexperimente im Bereich der Dauerfestigkeit und Untersuchungen zum Rissausbreitungsverhalten durchgeführt.

Abbildung 5 zeigt Dehnungs-Temperatur-Schleifen für eine Hochtemperatur-FGL aus einem thermomechanischen Ermüdungsversuch und Oberflächenaufnahmen des Werkstoffs in der Martensit- und Austenit-Phase. In diesem Experiment wurde die Probe mechanisch definiert vorgespannt und anschließend 500-mal auf eine Temperatur von etwa 400 °C aufgeheizt und auf Raumtemperatur abgekühlt. Infolge der thermisch induzierten Phasenumwandlung tritt hierbei eine Umwandlungsdehnung von etwa einem Prozent auf. Wie an den Schleifen jedoch auch zu erkennen ist, nimmt die nutzbare Umwandlungsdehnung mit wachsender Anzahl an

thermischen Zyklen ab, und der Effekt ist im 500. Zyklus kaum noch zu beobachten.

Durch die enge Zusammenarbeit im Rahmen der Forschergruppe mit Wissenschaftlern aus Bochum, München und Paderborn wurden erste Erfolge bei der Aufklärung der Mechanismen erzielt, die zur funktionellen Ermüdung führen. Die Erkenntnisse aus den funktionellen und strukturellen Ermüdungsversuchen sollen hierbei nicht nur zu weitergehenden Optimierungen der Legierungszusammensetzungen führen, sondern letztlich die Voraussetzungen für den erfolgreichen Einsatz der Legierungen in neuen Anwendungsbereichen schaffen.



Prof. Dr. Ing. Hans Jürgen Maier

Jahrgang 1960, hat in Erlangen Werkstoffwissenschaften studiert und promoviert. Nach einem Forschungsaufenthalt in den USA wurde er 1999 auf den Lehrstuhl für Werkstoffkunde an die Universität Paderborn berufen und ist seit Oktober 2012 Institutsdirektor am IW an der Leibniz Universität Hannover. Schwerpunkt seiner wissenschaftlichen Arbeit ist die Korrelation von Mikrostruktur und mechanischen Werkstoffeigenschaften. Kontakt: maier@iw.uni-hannover.de



Dipl.-Ing. Elvira Batyrshina

Jahrgang 1986, arbeitet seit November 2013 am Institut für Werkstoffkunde der Leibniz Universität Hannover als Wissenschaftliche Mitarbeiterin. Sie beschäftigt sich in der Forschergruppe »Hochtemperatur-Formgedächtnislegierungen – von den Grundlagen zur Anwendung« mit der Ermüdung von neuartigen Hochtemperatur-Formgedächtnislegierungen. Kontakt: batyrshina@iw.uni-hannover.de

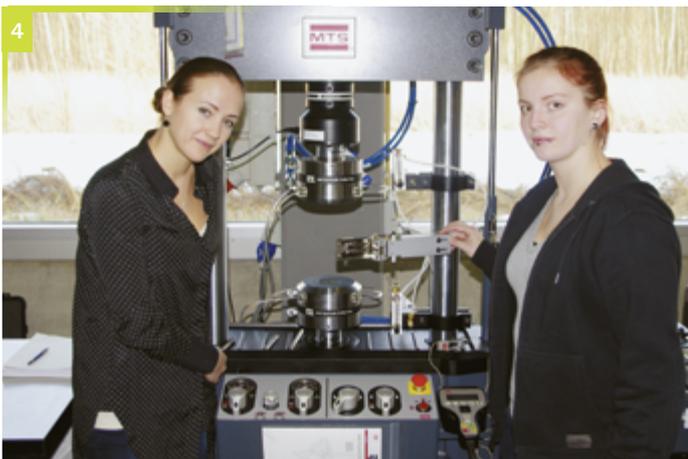


Abbildung 4 Prüfstand zur Durchführung thermomechanischer Ermüdungsversuche am Institut für Werkstoffkunde der Leibniz Universität Hannover

Quelle: Eigene Darstellung

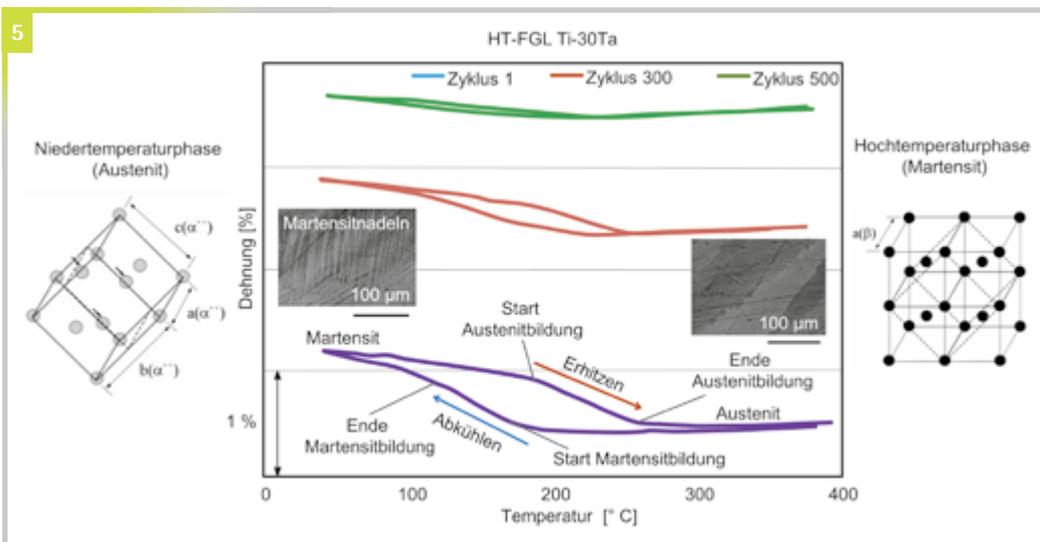


Abbildung 5 Dehnungs-Temperatur-Schleifen aus einem thermomechanischen Ermüdungsversuch, bei welchem die vorgespannte Probe 500-mal zwischen Raumtemperatur und etwa 400 °C zyklert wurde.

Quelle: Eigene Darstellung