

■ Immer schön in Form bleiben

Anders als Metalle wie Kupfer oder Stahl, die sich beim Erwärmen stark ausdehnen, behält die Fe-Ni-Legierung Invar über einen weiten Temperaturbereich ihre Länge nahezu bei.

1) vgl. auch Physikalische Blätter, Mai 2000, S. 27

Im Norden Chiles liegt die trockenste Wüste der Welt. Kaum eine Wolke ziert dort je den Himmel – ideale Bedingungen für Astronomen, denen sich in dieser dünn besiedelten Region in den Anden ein unverstellter Blick ins All bietet. Wenn da nur nicht die extremen Temperaturunterschiede wären: Während tagsüber bis zu 30 °C herrschen, können die Temperaturen nachts auf –15 °C abfallen. Damit Teleskope dennoch hochpräzise messen können, sind Materialien gefordert, die diese extremen Temperaturschwankungen mitmachen, ohne ihre Länge stark zu verändern.

Bereits im Jahr 1896 entdeckte Charles Edouard Guillaume auf der Suche nach einer preiswerten Alternative zum Urmeter, das aus Platin und Iridium besteht, eine Eisen-Nickel-Legierung mit einem Eisengehalt von 65 Prozent und einem Nickelgehalt von 35 Prozent. Diese besitzt bei Temperaturschwankungen verglichen mit anderen Metallen und Legierungen einen extrem niedrigen Längenausdehnungskoeffizienten α , und das über einen beachtlichen Temperaturbereich von –250 bis +200 °C (Abb. 1).¹⁾ Der Längenausdehnungskoeffizient α beschreibt dabei, um welchen Teil seiner Länge sich ein Körper bei Erwärmung bzw. Abkühlung um 1 K ausdehnt bzw. zusammen zieht: Während sich bei Raumtemperatur ein 1 Meter langer Platin-Iridium-Stab mit einem α von knapp $9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ bei einer



ThyssenKrupp Stainless

Um die Präzision des ALMA-Radioteleskops, das zurzeit in der Atacama-Wüste errichtet wird und ab 2011 Strahlung im Submillimeterbereich einfangen

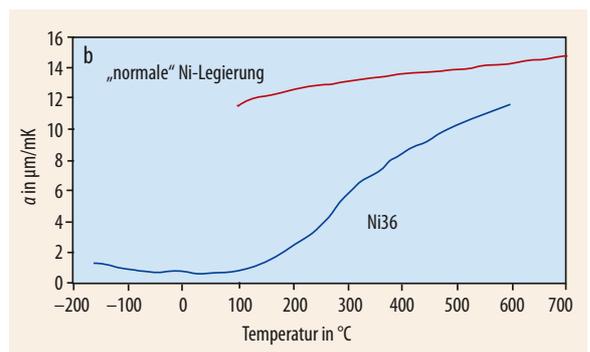
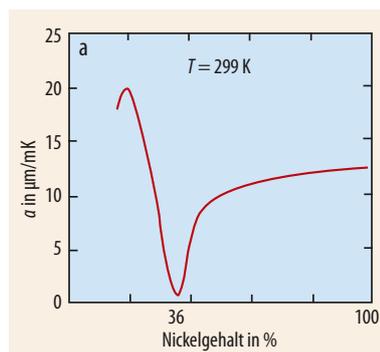
soll, zu gewährleisten, wurden zahlreiche Teile der Unterkonstruktion aus einer Fe-Ni-Legierung gefertigt.

Temperaturerhöhung um 10 K immerhin um knapp 0,1 Millimeter verlängert, dehnt sich ein vergleichbarer Eisen-Nickel-Stab mit einem α von $2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ gerade mal um 0,02 Millimeter aus. Nur Glaskeramiken wie Zerodur verändern ihre Länge noch weniger – allerdings nur in einem recht kleinen Temperaturbereich von 0 bis 50 °C. Aufgrund der großen Längensstabilität gab Guillaume seiner Entdeckung den treffenden Namen Invar, also das Invariante bzw. Unveränderliche. Heute ist Invar eigentlich die Warenbezeichnung der Firma Imphy Ugine Precision. Oft werden aber alle Werkstoffe, die bei Temperaturänderungen derart längenstabil sind, mit dem Namen Invar bezeichnet.

Seit ihrer Entdeckung kommen diese eisenreichen Legierungen für technische Bauteile zum Einsatz, die über einen weiten Temperaturbereich ihre Länge beibehalten müssen. Dazu gehören Balken für präzise Waagen, Pendelstangen z. B. für astronomische Pendeluhren, selbstkompensierende Spiralen im Uhrwerk von Taschen- und Armbanduhren (Abb. 2), Chip-Basisplatten oder auch thermische Bi-Metallstreifen. Praktisch ausgedient haben Röhrenmonitore, in denen Invar als Material für Schattenmasken dient. Auch Tanker, die verflüssigtes Erdgas transportieren, sind mit Eisen-Nickel-Legierungen verkleidet.

Durch den Zusatz von Elementen wie Cr, Mo, Co oder Mn lassen sich die mechanischen

Abb. 1 Bei einem Nickelgehalt von 36 % besitzt der Längenausdehnungskoeffizient α einer Eisen-Nickel-Legierung sein absolutes Minimum (a). Über einen weiten Temperaturbereich von –200 °C bis knapp +170 °C liegt der Ausdehnungskoeffizient einer solchen Fe-Ni-Legierung unterhalb von $2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (b).



Eigenschaften auf spezielle Anwendungen hin optimieren. Ein Beispiel dafür ist die mit Chrom dotierte Legierung Elinvar, deren elastische Eigenschaften quasi temperaturunabhängig sind und die deshalb auch in Stimmgabeln Verwendung findet.

Ferromagnetisch und stabil

Interessanterweise verschwindet oberhalb der sog. Curie-Temperatur, die bei einer Fe-Ni-Legierung mit einem Ni-Gehalt von 36 % bei etwa 280 Grad Celsius liegt, nicht nur der Ferromagnetismus des Werkstoffs, sondern auch seine ausgezeichnete Längenstabilität. Schon Guillaume schloss daraus, dass der Ferromagnetismus entscheidend dafür sein muss, dass Invar seine Länge beibehält.

Im ferromagnetischen Grundzustand der Fe-Ni-Legierung stehen die Kernspinzustände der Atome größtenteils parallel zueinander, wobei sich die Magnetisierung am Kristallgitter ausrichtet. Dieser Zustand besitzt mit $2\mu_B$ (μ_B : Bohrsches Magneton) ein großes magnetisches Moment und heißt daher High-Moment-Zustand. Aufgrund der starken Wechselwirkung, die durch die Abstoßung der magnetischen Momente untereinander zustande kommt, vergrößern sich die Atomabstände, und das Gitter der Legierung bläht sich auf: Der High-Moment-Grundzustand ist also mit einem großen atomaren Volumen verknüpft.

Typisch für Materialien mit Invar-Effekt ist, dass sie zudem

einen Low-Moment-Zustand besitzen, der durch nichtkollinear orientierte magnetische Momente ein kleines atomares Volumen mit nahezu verschwindendem magnetischen Moment hat. Da die Energiedifferenz zwischen den Minima dieser beiden Zustände in der Größenordnung der thermischen Anregungsenergie $k_B T$ liegt, geht das Material bei einer Temperaturerhöhung vom High-Moment- in den Low-Moment-Zustand über. Die Legierung dehnt sich demnach nicht aus, da zunehmend der Low-Moment-Zustand mit kleinerem Volumen besetzt wird. Die Änderung des magnetischen Moments ist demnach so stark, dass sie bei steigender Temperatur die normale thermische Ausdehnung des Gitters kompensiert. Aus diesem Grund bleibt der Längenausdehnungskoeffizient über einen weiten Temperaturbereich konstant.

Erst oberhalb der Curie-Temperatur büßt die Fe-Ni-Legierung ihre Längenstabilität zusammen mit ihrem Ferromagnetismus ein: Im paramagnetischen Zustand verhält sich die Eisen-Nickel-Legierung dann ähnlich wie nichtferromagnetische Metalle und Legierungen.

Leicht und spröde

Fe-Ni-Legierungen kommen heutzutage verstärkt auch beim Flugzeugbau zum Einsatz, und zwar bei der Formgebung großflächiger Kohlefaserverbundwerkstoffe (CFK), aus denen z. B. die Tragflächen und Teile des Flugzeugumpfes gefertigt sind.



Abb. 2 Zum Herzstück einer mechanischen Uhr gehört eine Spirale. Je gleichmäßiger diese schwingt, desto genauer geht die Uhr. Heute werden praktisch ausschließlich Spiralen aus Invar verwendet.

Diese Werkstoffe sind extrem fest und gleichzeitig sehr leicht. Der neue Airbus A380 besteht schon zu 20 Prozent aus diesem Material, das immer mehr das Aluminium ablöst. Bei seiner Herstellung werden die mit Harz imprägnierten Kohlenstoffgewebe in eine Fe-Ni-Form gelegt und bei Temperaturen um 180 °C und einem Druck von 10 bar ausgehärtet. Würden Form und Bauteil beim anschließenden Abkühlen unterschiedlich schrumpfen, könnten gefährliche Spannungen und Risse im Bauteil entstehen. Die Längenstabilität der Fe-Ni-Legierung und die der Kohlefaserverbundstoffe stimmen jedoch so gut überein, dass das Bauteil bei der Herstellung nicht unnötig strapaziert wird.

Auf diese Weise hilft das Invar also dabei, die Außenhülle des Flugzeugs stabiler zu machen, das uns in den langersehnten Sommerurlaub bringt.

Katja Bammel

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