


Gestalterinnernde Legierungen (Shape-Memory-Alloys, SMA)

Exkurs zu den Vorlesungen *Chemie der Metalle* und *Intermetallische Phasen*

Caroline Röhr, Universität Freiburg

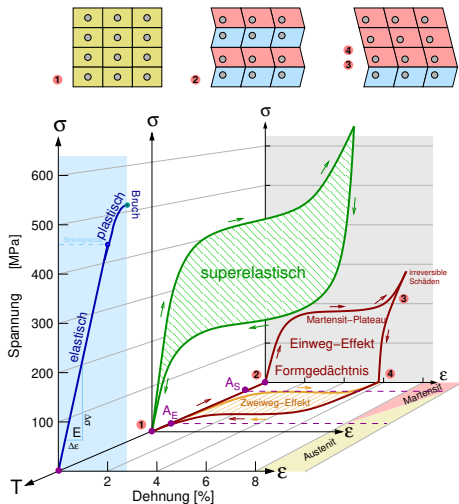
– mit Erläuterungen beim -Symbol unten rechts –

(! MP3/4-Dateien nicht im PDF enthalten/werden vom Web-Server nachgeladen !)

Freiburg, SS 2021 + SS 2026

Einleitung: 'gewöhnliche' mechanische Eigenschaften (blaue Kurve)

- ▶ mechanisches Verhalten \mapsto Spannungs-Dehnungs-Diagramm
- ▶ 'elastisches' Verhalten: Spannungs-Dehnungs-Kurve mit konstanter Steigung = E -Modul
 - ▶ Pb: 13.8 GPa; Al: 69 GPa;
Fe: 207 GPa; Al_2O_3 : 380 GPa
- ▶ 'plastisches' Verhalten: Abweichungen von der Linearität
- ▶ Streckgrenze: Übergang von elastischem zu plastischem Verhalten
- ▶ bei höherem $\sigma/\epsilon \mapsto$ Bruch
- ▶ für SMA etc. wichtig: interessante T -Abhängigkeit der Spannungs-Dehnungskurve

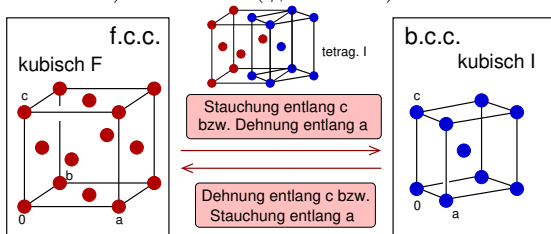


- ▶ erste Beobachtung des 'Einwegeffekts' bei geordneten 1:1-Legierungen
 - 1932: AuCd
 - 1938: CuZn (Messing)
 - 1962: NiTi mit Ni:Ti fast genau im 1:1-Verhältnis (Bühler)
- ▶ Referenz-Verbindung Ni-Ti-NOL (NOL von Naval Ordnance Laboratory)
- ▶ s. [Versuchs-Video](#)
- ▶ später: T der Effekte etc. variabel durch kleine Zusätze anderer Metalle

Tabelle einiger SMAs mit Temperatur-Bereichen

Legierung	Zusammensetzung [at %]	$T_{M \rightarrow A}$ -Bereich [°C]	Hysterese [°C]
AgCd	44-49 % Cd	-190 ... -50	15
AuCd	46.5-50 % Cd	+30 ... +100	15
CuZn	38.5-41.5 % Zn	-180 ... -10	10
NiAl	36-38 % Al	-180 ... +100	10
NiTi	49-51 % Ni	-50 ... +110	30
MnCu	5-35 % Cu	-250 ... +180	
FeMnSi	32 Gew.-% Mn, 6 Gew.-% Si	-200 ... +150	100

- ▶ Martensit–Austenit als Namensgeber dieser Phasenumwandlungen
- ▶ displazive Phasenumwandlungen/Scherungen
- ▶ am wichtigsten (s. z.B. bei Stahl):
b.c.c.-Fe (α , Martensit) \leftrightarrow f.c.c.-Fe (γ , Austenit)



- ▶ s.a. [Video](#) zur Elementstruktur von Indium

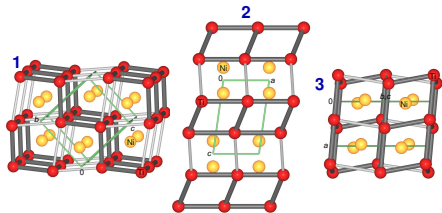
Strukturen von NiTi und Phasenumwandlung

▶ Ni: f.c.c., Ti: h.c.p.

▶ NiTi:

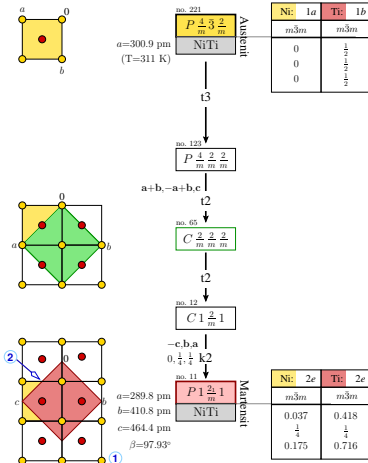
T gross: b.c.c. geordnet = γ -Messing = CsCl
(Austenit-Form) RG $Pm\bar{3}m$, $a = 300.9$ pm

T klein: monokline Verzerrung
Symmetrieabstieg mit Gesamtindex 24 \mapsto
 $P2_1/m$: $a=289.96$, $b=412.86$, $c=469.28$ pm,
 $\beta=97.93^\circ$



▶ Phasenumwandlung: Zwillingsbildung !!!

▶ beim Abkühlen \mapsto Ausbildung von Zwillingen,
durch vorgegebene Formen bestimmt \downarrow



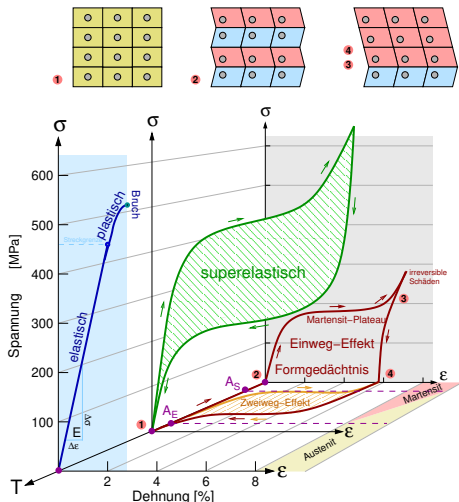
- ▶ unabhängig von Anwendung/Effekt
- ▶ Material bei 400 bis 500 °C in Form bringen
- ▶ ca. 5 min. tempern
- ▶ beim Abschrecken, z.B. in kaltem Wasser bleibt diese Form erhalten (① \mapsto ②, s. nächste Seite)
- ▶ Formen: Drähte, Federn, Spezialformen je nach Anwendung

⊕ biokompatibel

⊖ teuer

Effekte I: Einwegeffekt ('Formgedächtnis')

- ▶ ① \mapsto ② ('Trainieren', s.o.)
- ▶ ② Start mit verzwillingtem Material
- ▶ ② \mapsto ③ Material verformen \mapsto Verschiebung der Zwillingsebenen
- ▶ Martensit-Plateau: trotz weiterer Dehnung kaum noch neue Spannung
- ▶ ③ Material mit anderer Form
- ▶ ③ \mapsto ④ Entlasten durch Wegnahme der äußeren Spannung \mapsto Probe bleibt in neuer Form
- ▶ ④ \mapsto ① Erwärmen \mapsto Umwandlung in Austenit, Rückkehr in ursprüngliche Form
- ▶ Form bleibt auch beim Abkühlen
- ▶ ① \mapsto ② erhalten



Anwendung des 'Einwegeffekts' ('Formgedächtnis')

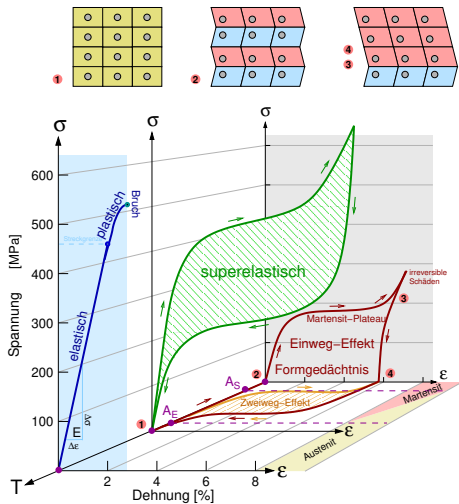
Zahlreiche, aber relativ spezielle Anwendungsbereiche

- ▶ Medizin-Technik:
 - ▶ Stents bei Herz-Operationen
 - ▶ Zahnspangen
 - ▶ Knochenverbindung
 - ▶ Wundverschlussklammern
 - ▶ ...
- ▶ Maschinenbau/Mess-Regeltechnik
 - ▶ Schrumpf-Ringe zum Dichten, Überhitzungsschutz
 - ▶ Aktuatoren (Robotik)
 - ▶ selbstausfahrende Antennen (Weltraum)
 - ▶ Motoren
 - ▶ ...
- ▶ Stallelemente, Steuern/Regeln (z.B. T -Messung, Feuermelder)
- ▶ bei -100°C : Cryodichtungen (so gut haltbar wie verschweisst)

Materialen jeweils für einmalige oder mehrfache Anwendungen (viele Zyklen) optimiert

Effekte III: Superelastizität (grüne Kurve)

- ▶ Legierungen knapp über dem Umwandlungspunkt 'superelastisch'
- ▶ Hysterese der Spannungs-Dehnungs-Kurve (bei $T = \text{konst.}$)
- ▶ Fläche entspricht der gespeicherten Energie (vgl. Magnetismus)
- ▶ nach starker Verformung und Entlastung
 - ▶ Material kehrt wieder vollständig zurück
 - ▶ Umwandlung von mechanischer Energie in Wärme
- ▶ Anwendungen
 - ▶ Stents
 - ▶ Medizintechnik: z.B. Operationsbestecke mit Häkchen (Chirurgie), durch Katheter einführbar
 - ▶ Brillengestelle, Zahnspangen



- ▶ Dimitris C. Lagoudas (Ed.): *Shape Memory Alloys, Modeling and Engineering Applications*, Springer (2008).
- ▶ E. Hornborgen: *Advanced Engineering Materials*, **8**, 101 (2006).
- ▶ D. E. Hodgson, J. W. Brown: *Using Nitinol Alloys*, Broschüre von Shape Memory Applications Inc. USA (2000).
- ▶ www.memory-metalle.de