


# Gestalterinnernde Legierungen (Shape-Memory-Alloys, SMA)

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

Caroline Röhr, Universität Freiburg

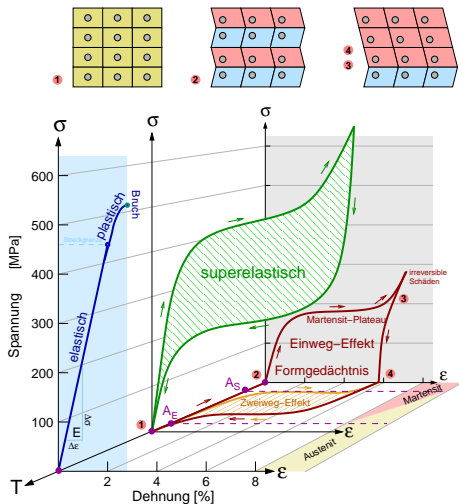
– mit Erläuterungen beim -Symbol unten rechts –

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

Freiburg, SS 2021

# 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;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : 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

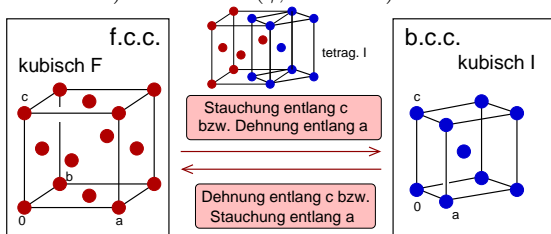


- ▶ erste Beobachtung des 'Einwegeffekts' bei geordneten 1:1-Legierungen
  - 1932: AuCd
  - 1938: CuZn (Messing)
  - 1962: NiTi mit Ni:Ti fast genau im 1:1-Verhältnis (Bühler)
- ▶ Referenz-Verbindung Ni-Ti-NOL (NOL von Naval Ordnance Laboratory)
- ▶ s. [Versuchs-Video](#)
- ▶ später:  $T$  der Effekte 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 ( $\alpha$ , Martensit)  $\leftrightarrow$  f.c.c.-Fe ( $\gamma$ , Austenit)



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

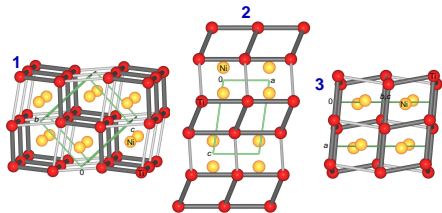
# Strukturen von NiTi und Phasenumwandlung

▶ Ni: f.c.c., Ti: h.c.p.

▶ NiTi:

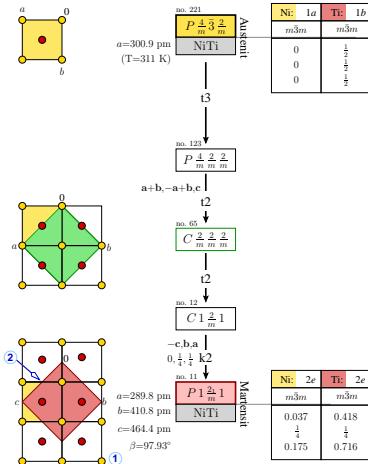
*T* gross: b.c.c. geordnet =  $\gamma$ -Messing = CsCl  
(Austenit-Form) RG  $Pm\bar{3}m$ ,  $a = 300.9$  pm

*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  $\Downarrow$



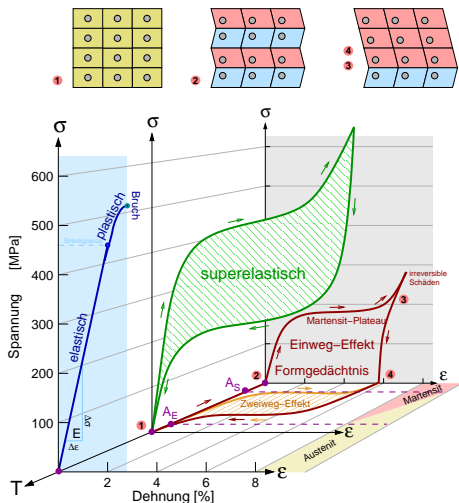
- ▶ unabhängig von Anwendung/Effekt
- ▶ Material bei 400 bis 500 °C in Form bringen
- ▶ ca. 5 min. tempern
- ▶ beim Abschrecken, z.B. in kaltem Wasser bleibt diese Form erhalten (① ↔ ②, s. nächste Seite)
- ▶ Formen: Drähte, Federn, Spezialformen je nach Anwendung

⊕ 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





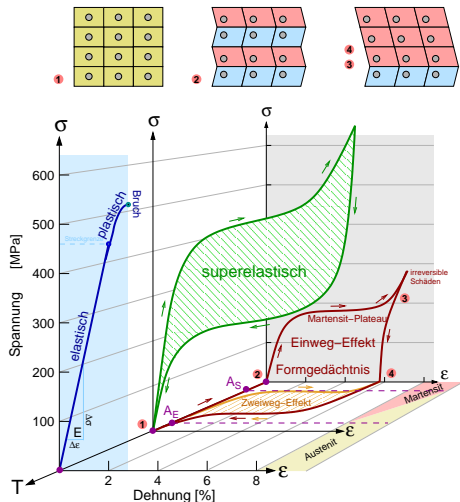
Zahlreiche, aber relativ spezielle Anwendungsbereiche

- ▶ 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  $-100^{\circ}\text{C}$ : Cryodichtungen (so gut haltbar wie verschweisst)

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

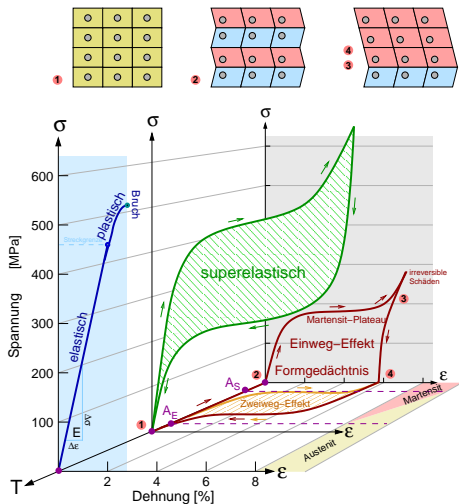
## Effekte II: Zweiweg-Effekt (orange Kurve)

- ▶ ohne äußere mechanische Einwirkung
- ▶  $\epsilon$ - $T$ -Hysterese der Phasenumwandlung Austenit  $\leftrightarrow$  Martensit
- ▶ ④ 'trainierte' Probe einer bestimmten Form
- ▶ beim Erwärmen  $\leftrightarrow$  Änderung der Form, Übergang in Austenit ④  $\leftrightarrow$  ①
- ▶ beim Abkühlen unter Phasenumwandlungs-temperatur  $\leftrightarrow$  Rückkehr in die 'trainierte' Form ④
- ▶ Anwendungen
  - ▶  $T$ -Schalter ohne Mechanik (ähnlich Bimetall)



# 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](http://www.memory-metalle.de)