
Formgedächtnislegierungen in der Hochlastaktorik: Potentiale und Herausforderungen

Linda Weisheit, André Bucht, Kenny Pagel, Andreas Erben



Werkstoffwoche Dresden, 27.-29. September 2017

Formgedächtnislegierungen in der Hochlastaktorik: Potentiale und Herausforderungen

■ Einführung

- Stand der Technik: Drahtaktorik
- Motivation: Aktoren für hohe Lasten

■ Materialanalyse

- Thermische Charakterisierung
- Mechanische Charakterisierung

■ Zusammenfassung: Forschungsbedarfe

Einführung

Stand der Technik

→ Drahtaktoren sind aktuell bestimmende Halbzeugform

- Umfangreiche Forschungen zu Einflussfaktoren und Zusammenhängen
- Optimierte Fertigung
→ Standardprodukte am Markt erhältlich
- Umfangreicher Datenpool als Basis für Aktorauslegung
- Unzählige Demonstratoren, die Potentiale aufzeigen
- Erste Serienprodukte

Einführung

Stand der Technik

→ Drahtaktoren bestimmende
Halbzeugform

- Umfangreiche Forschungen
- Optimierte Fertigung
→ Standardprodukt
- Umfangreiche Datenbasis
- Unzählige Demonstratoren
- Erste Serienprodukte

Forschung:

- Einflussfaktoren auf funktionelles Verhalten größtenteils bekannt:

Materialseitig Einflussfaktoren

Chemische Zusammensetzung
Korngröße
Orientierung/Textur
Ausscheidungen
Defektdichte

Funktionelle Eigenschaften

Phasenumwandlungstemperaturen
Effektmodus:
Superelastizität vs. Pseudoplastizität
Effektgrößen: Stellweg & Aktorkraft
Effektstabilität

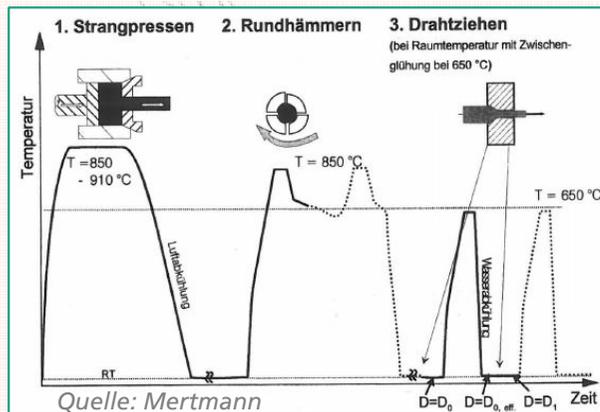
Einführung Stand der Technik

→ Drahtaktoren bestimmende
Halbzeugform

- Umfangreiche Forschungen
- Optimierte Fertigung
→ Standardprodukt
- Umfangreiche Datenbasis
- Unzählige Demonstratoren
- Erste Serienprodukte

Herstellung:

- Einflussfaktoren auf funktionelles Verhalten größtenteils bekannt
→ optimierte Prozessroute zur Fertigung von Standardprodukten



- Drähte (superelastisch und pseudoplastisch)
 $d = \mu\text{m} \dots \text{mm}$
 $A_s < RT \rightarrow$ superelastisch
 $\approx BT \rightarrow$ Aktivierung im Körper (body temp.)
 $> BT \rightarrow$ pseudoplastisch für aktorische Anwendungen
- Rohre, Bleche, Federn auch erhältlich

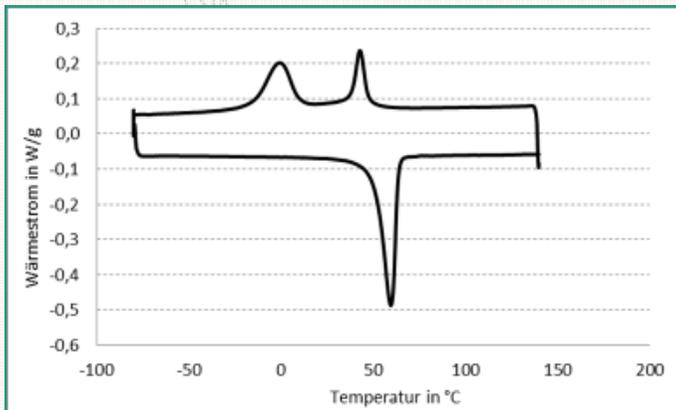
Einführung Stand der Technik

→ Drahtaktoren bestimmende
Halbzeugform

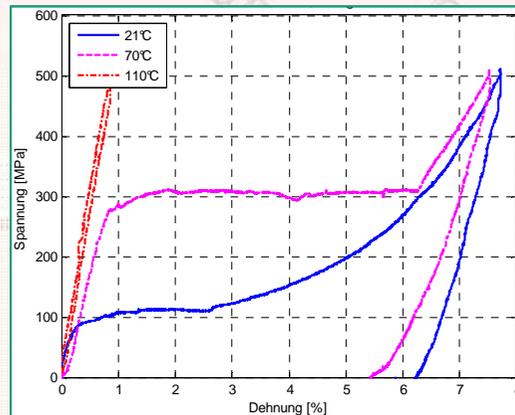
- Umfangreiche Forschungen
- Optimierte Fertigung
→ Standardprodukt
- Umfangreiche Datenbasis
- Unzählige Demonstratoren
- Erste Serienprodukte

Datenbasis für Auslegung:

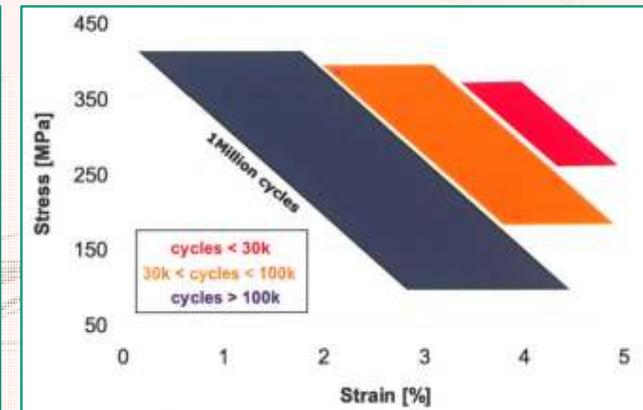
- Umfangreicher Datenpool für die Systemauslegung liegt vor



Quelle: IWU



Quelle: IWU



Quelle: SAES Getters

Einführung Stand der Technik

→ Drahtaktoren bestimmende
Halbzeugform

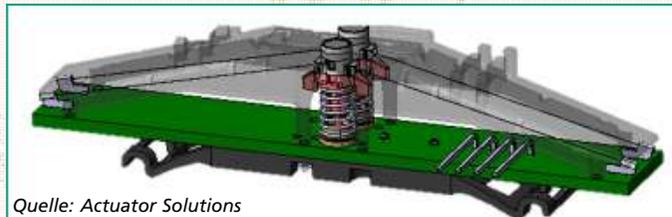
- Umfangreiche Forschungen
- Optimierte Fertigung
→ Standardprodukt
- Umfangreiche Datenbasis
- Unzählige Demonstratoren
- Erste Serienprodukte

Serienanwendungen:



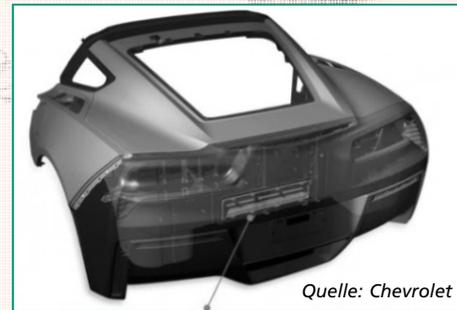
Quelle: Philips

Ventil Kaffeemaschine



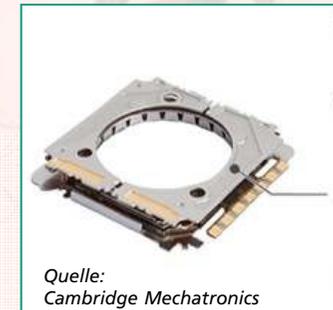
Quelle: Actuator Solutions

Ventil im Automobilbau
(Sitzeanwendung)



Quelle: Chevrolet

Aktor zum
Druckausgleich
(Kofferraumklappe)



Quelle:
Cambridge Mechatronics

OIS und
Autofocus
(Smartphone)

Einführung Stand der Technik

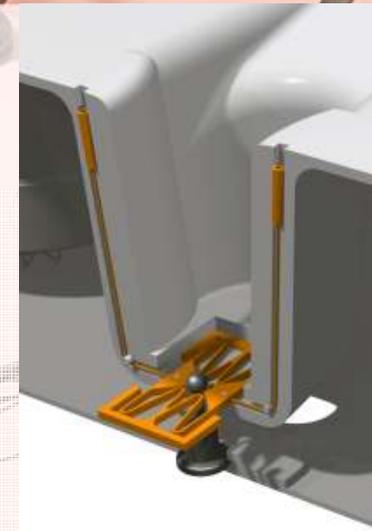
→ Drahtaktoren bestimmende
Halbzeugform

- Umfangreiche Forschungen
- Optimierte Fertigung
→ Standardprodukt
- Umfangreiche Datenbasis
- Unzählige Demonstratoren
- Erste Serienprodukte

Vorteile von FGL-Drahtaktoren

Geringer Bauraum
→ völlige Strukturintegration

Einfache Aktivierung
mittels Joule'scher Wärme



Einführung Stand der Technik

→ Drahtaktoren bestimmende
Halbzeugform

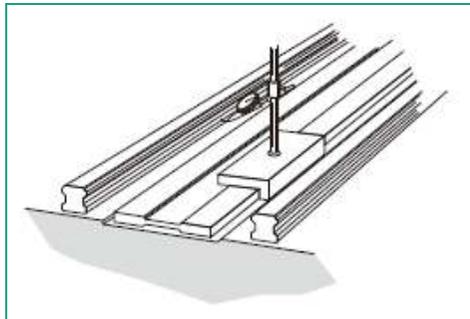
- Umfangreiche Forschungen
- Optimierte Fertigung
→ Standardprodukt
- Umfangreiche Datenbasis
- Unzählige Demonstratoren
- Erste Serienprodukte

Aber:

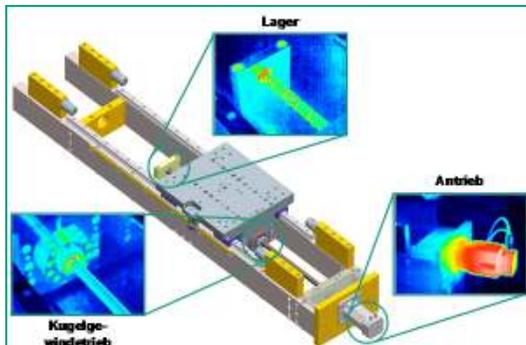
Drahthalbzeuge begrenzt auf geringe Kräfte
→ Einsatzfelder sehr eingeschränkt

Motivation

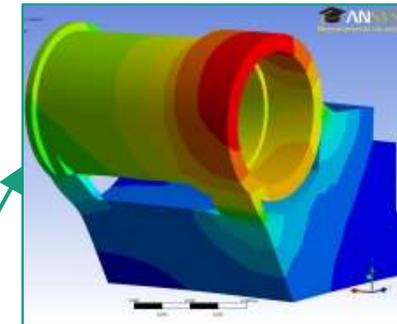
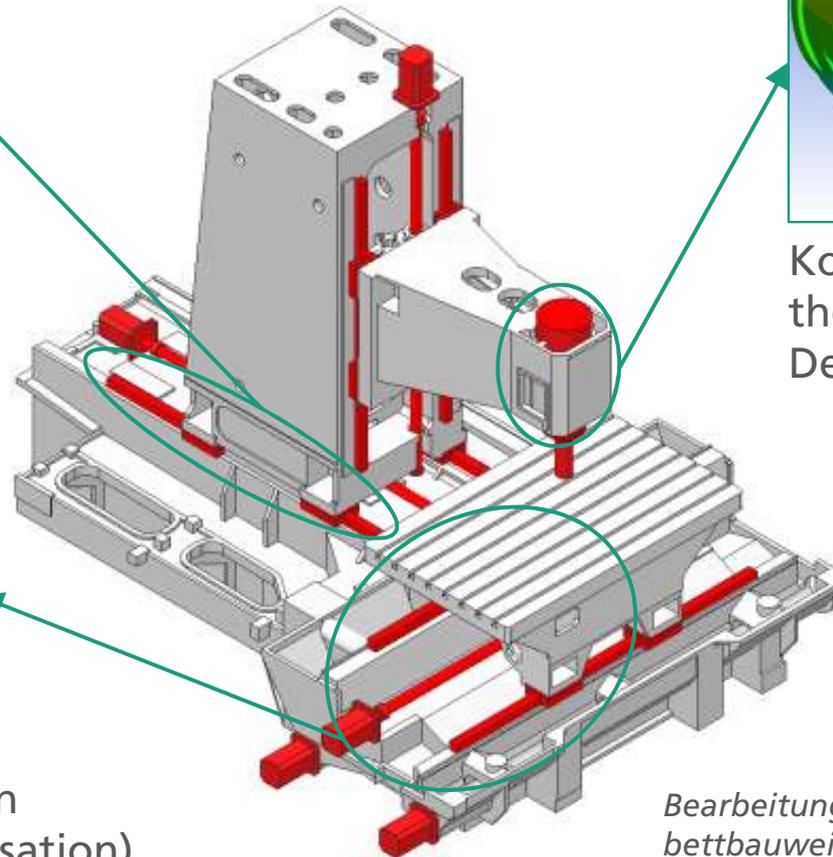
Aktoren für hohe Lasten - Anwendungsfelder



Feinausrichtung von Präzisionskomponenten (z.B. Führungen, Lager)



Adaption von Eigenschaften (z.B. Vorspannungskompensation)

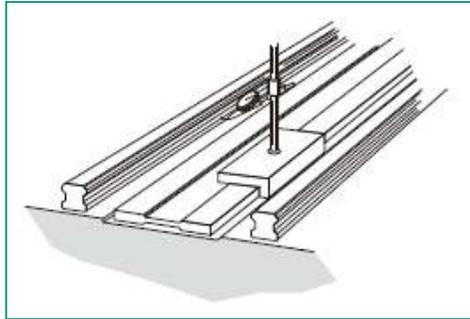


Kompensation thermischer Deformationen

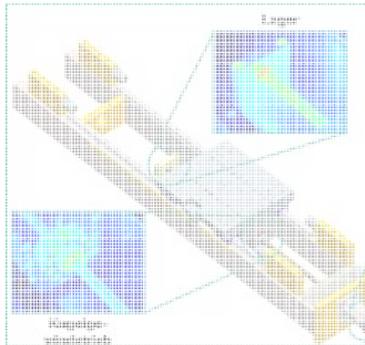
Bearbeitungszentrum in Kreuzbettbauweise (© Niles-Simmons)

Motivation

Aktoren für hohe Lasten - Anwendungsfelder



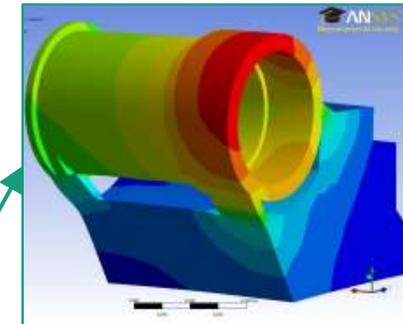
Feinausrichtung von Präzisionskomponenten (z.B. Führungen, Lager)



Adaption von Eigenschaften (z.B. Vorspannungskompensation)

Anforderungen an Aktorik

- Große Kräfte ($>1\text{kN}$)
- Steifigkeit!!!
- Kleine Wege ($<1\text{mm}$)
- Robustheit
- Kleiner Bauraum

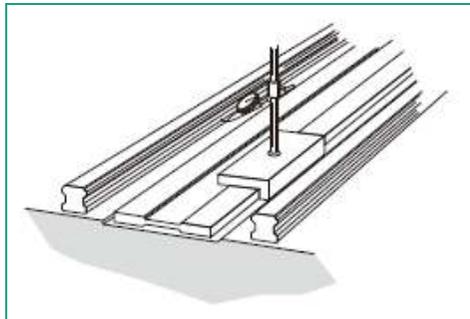


Kompensation thermischer Deformationen

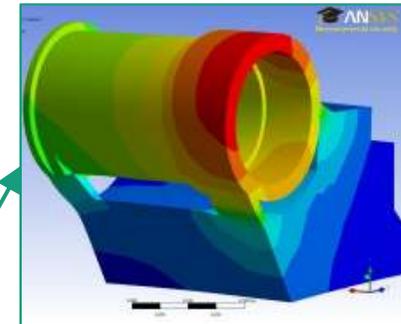
Werkzeugbearbeitungszentrum in Kreuzbettbauweise (© Niles-Simmons)

Motivation

Aktoren für hohe Lasten - Anwendungsfelder



Feinausrichtung von Präzisionskomponenten
(z.B. Führungen, Laser)



Kompensation thermischer

Anforderungen an Aktorik

Steifigkeit!!!

Große Kräfte ($>1\text{kN}$)

Kleine Wege ($<1\text{mm}$)

Robustheit

Kleiner Bauraum

(z.B. Vorspannungskompensation)

FGL-Volumenkörper unter Druckbelastung



FGL-Zylinderhalbzeuge

Bettbauweise (© Niles-Simmons)

Motivation

FGL-Draht

vs. FGL-Zylinder

Typische Abmessungen

$l > 20\text{mm}$
 $d < 0,5\text{mm}$
 $l/d > 40$



Typische Abmessungen

$l < 15\text{mm}$
 $d > 4\text{mm}$
 $l/d < 4$



Material

Standardprodukte mit optimierten Eigenschaften

Zwischenprodukt mit nicht optimierten Eigenschaften

Korngröße
Textur
Defektstruktur

Belastung

Zug:
Einachsiger
Spannungszustand

Druck:
Mehrachsig
Spannungszustand

Zug-Druck-
Asymmetrie

Aktivierung

Joule'sche Wärme

Thermisch träge
Externe Erwärmung
Prozesswärme

Formgedächtnislegierungen in der Hochlastaktorik: Potentiale und Herausforderungen

- Einführung
 - Stand der Technik: Drahtaktorik
 - Motivation: Aktoren für hohe Lasten
- **Materialanalyse**
 - Thermische Charakterisierung
 - Mechanische Charakterisierung
- Zusammenfassung: Forschungsbedarfe

Materialanalyse

Verwendetes Material

Vorgabe: aktorisch nutzbar = Pseudoplastizität bei Raumtemperatur

4 Standardlegierungen

Legierung M

Legierung X2

NiTi-rod

NiTi-rod

→ aus Prozess für Drahtherstellung entnommen

Memry/SAES Getters

Memry/SAES Getters

Kelloggs Research Lab

Nitinolshop

1 Spezialanfertigung

→ z.T. optimierte Prozessroute; Fa. IngPuls

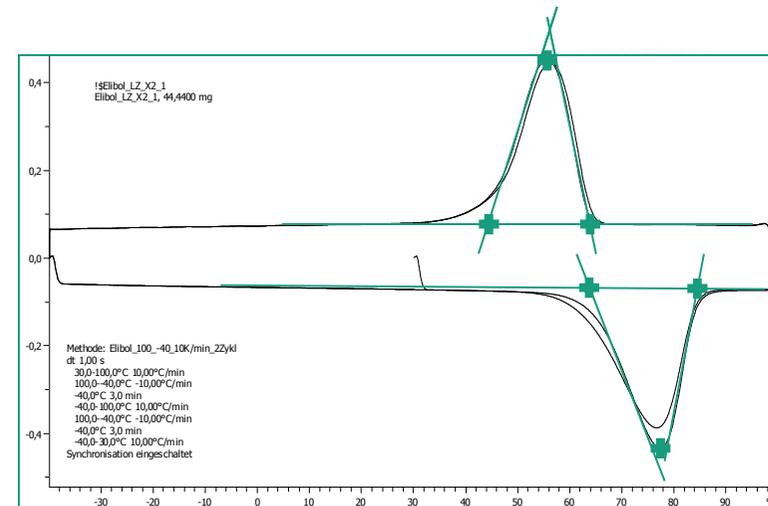
Zylindergeometrie
 $d = 6 \dots 6,5 \text{ mm}$
 $l = 10 \text{ mm}$



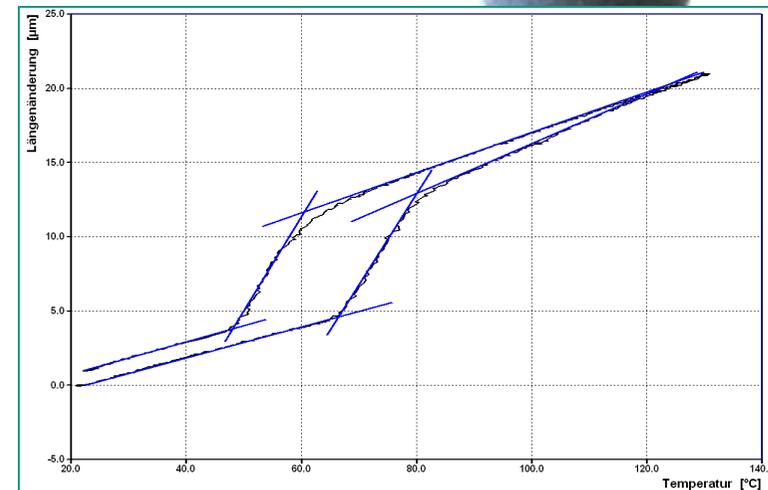
Materialanalyse

Thermische Charakterisierung

Bestimmung der
Phasenumwandlungstemperaturen
(PUT) mittels DSC



Analyse der
geometrischen
Umwandlungscharakteristik mittels
Dilatometrie (DIL)



Materialanalyse

Thermische Charakterisierung

Bestimmung der **Phasenumwandlungstemperaturen**

Material	A_s	A_f	M_s	M_f
Kelloggs (Kelloggs Research Lab)	25 °C	28 °C	(16 °C)	(-16 °C)
Nitinolshop	63 °C	75 °C	40 °C	37 °C
X2 (Memry)	65 °C	75 °C	60 °C	50 °C
Leg M (Memry)	50 °C	63 °C	33 °C	< RT
Ingpuls	70 °C	87 °C	37 °C	28 °C

→ $M_s < RT$

→ $M_s < RT$

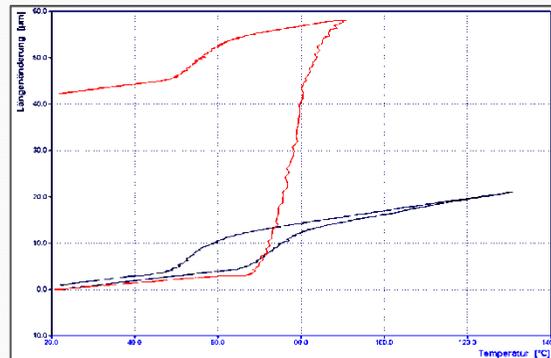
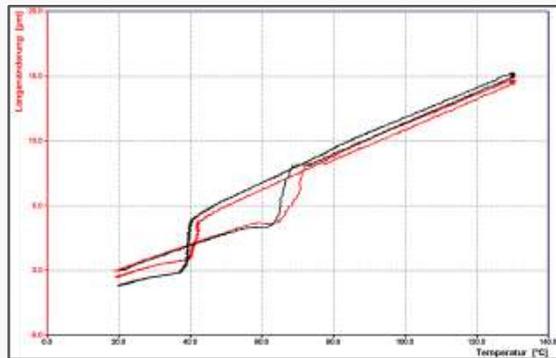
→ **Nur 3 von 5 Materialien** erfüllen die Bedingung der **Pseudoplastizität bei Raumtemperatur**

Materialanalyse

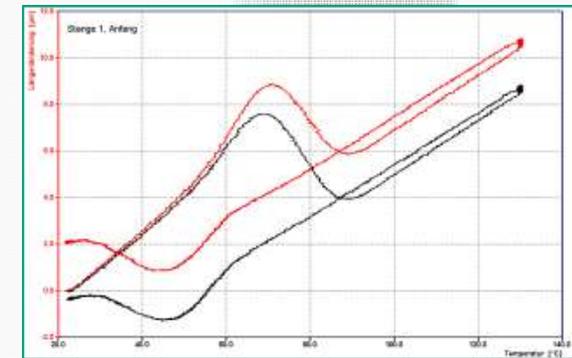
Thermische Charakterisierung

Analyse der **geometrischen Umwandlungscharakteristik**

Standardlegierungen



Spezialanfertigung



1. Messung 2. Messung

- Sehr unterschiedliche Umwandlungscharakteristik hinsichtlich:
 - Dimension Grund: Orientierung/Textur
 - Richtung Grund: Orientierung/Textur
 - Stabilität Grund: Vorbehandlung
- Meist auch inhomogen innerhalb einer Materiallieferung
- Kein homogenes Materialverhalten, da keine optimierte Prozessroute

Materialanalyse

Mechanische Charakterisierung

Analyse des **mechanischen Werkstoffverhaltens** hinsichtlich:

- Martensitverformung \rightarrow Deformation bei RT
+ thermische Rückstellung (lastfrei)
- Austenitverformung \rightarrow Deformation bei $T > A_f$

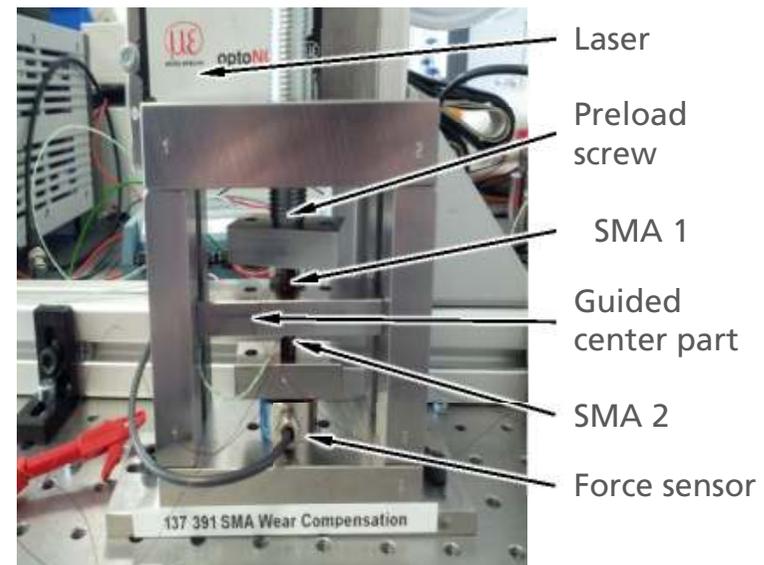
Analyse der **Effektstabilität** im aktorischen Einsatz:

- Wiederholte Aktivierung unter Last

Aktor mit Heizdraht



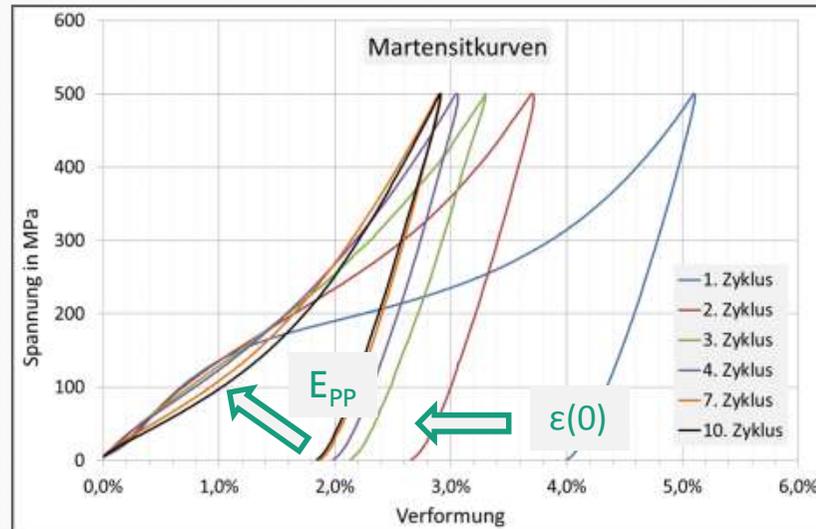
*Modularer Prüfstand IWU
Ausführungsbeispiel:
Antagonistisches Prinzip (Aktor gegen Aktor)*



Materialanalyse

Mechanische Charakterisierung: Martensitverformung

Standardlegierungen



$\epsilon(0)$...Verformung nach Entlastung

ϵ_{rev} ...reversibler Verformungsanteil

ϵ_{irr} ...irreversibler Verformungsanteil

E_{PP} ...E-Modul Martensitplateau

σ_{PP} ...Beginn des Martensitplateaus

Starke Veränderung der SDD während der ersten Aktorzyklen:

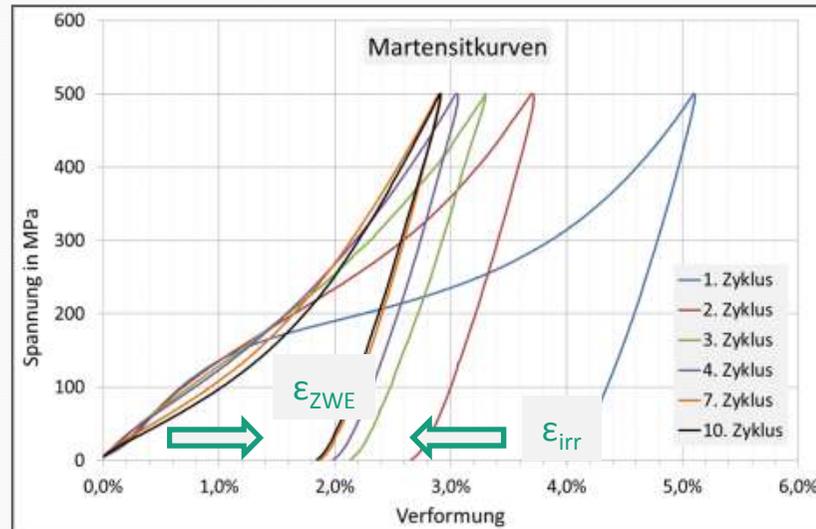
- $\epsilon(0)$ und ϵ_{rev} sinken
- $\epsilon(0) > \epsilon_{rev} \rightarrow \epsilon_{irr}$ bis zu 1,8 %
- E_{PP} steigt
- σ_{PP} sinkt

⇒ **Scheinbar!**

Materialanalyse

Mechanische Charakterisierung: Martensitverformung

Standardlegierungen



$\epsilon(0)$...Verformung nach Entlastung

ϵ_{rev} ...reversibler Verformungsanteil

ϵ_{irr} ...irreversibler Verformungsanteil

ϵ_{ZWE} ...Zweiwegeeffekt

E_{pp} ...E-Modul Martensitplateau

σ_{pp} ...Beginn des Martensitplateaus

Starke Veränderung der SDD :

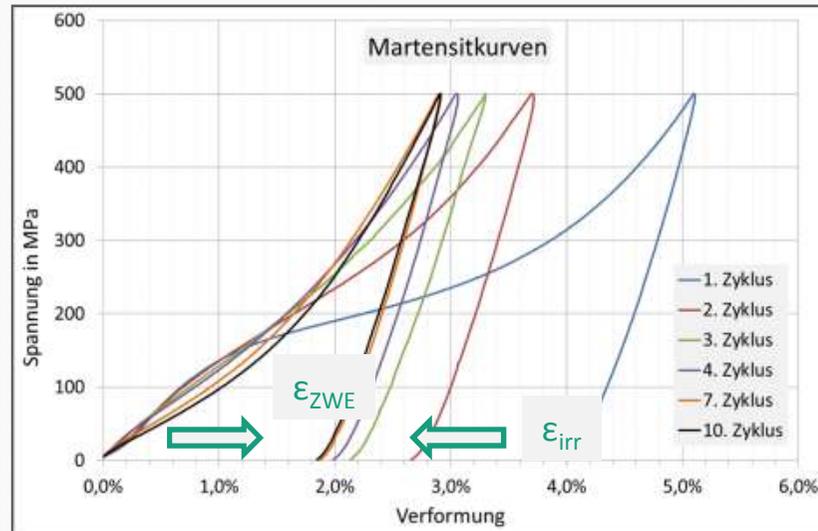
Irreversible Verformungsanteile
Sich einstellender Zweiwegeeffekt

Grund: Grobkörnige, defektarme
Mikrostruktur

Materialanalyse

Mechanische Charakterisierung: Martensitverformung

Standardlegierungen

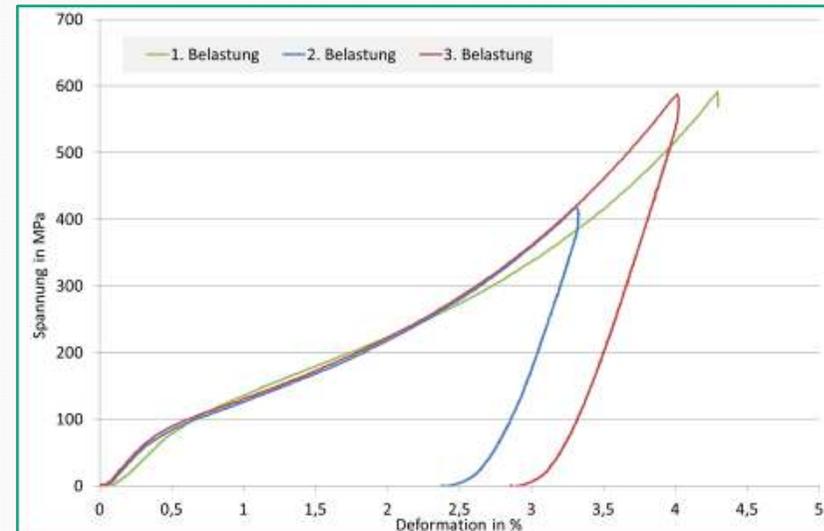


Starke Veränderung der SDD :

Irreversible Verformungsanteile
Sich einstellender Zweiwegeeffekt

Grund: Grobkörnige, defektarme
Mikrostruktur

Spezialanfertigung



Stabiles mech. Verhalten

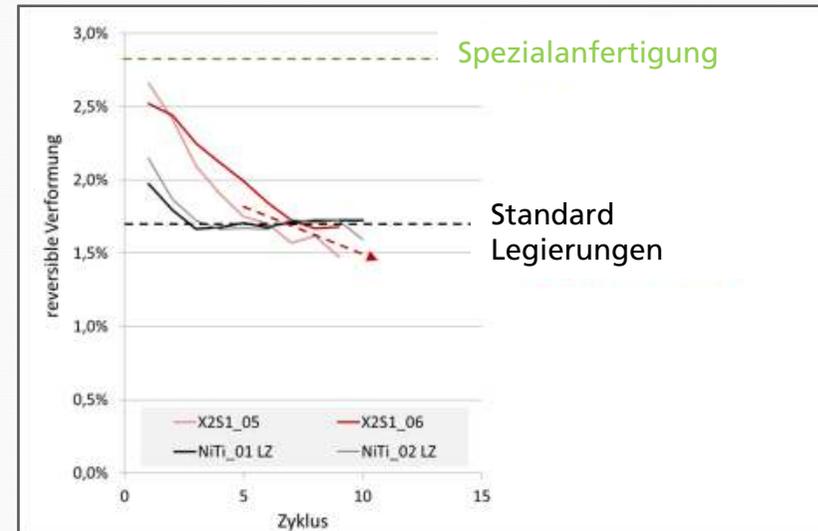
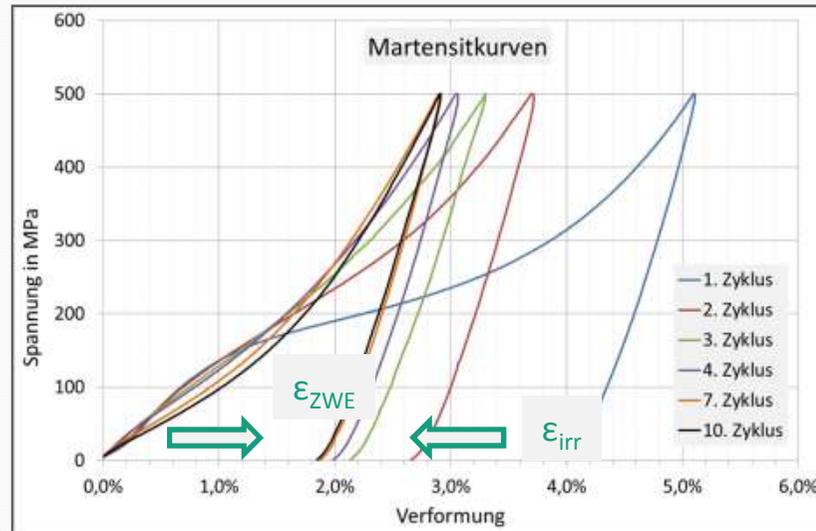
$$\epsilon(0) = \epsilon_{rev}$$

Grund: feinkörnige Mikrostruktur
mit Defekten

Materialanalyse

Mechanische Charakterisierung: Martensitverformung

Standardlegierungen

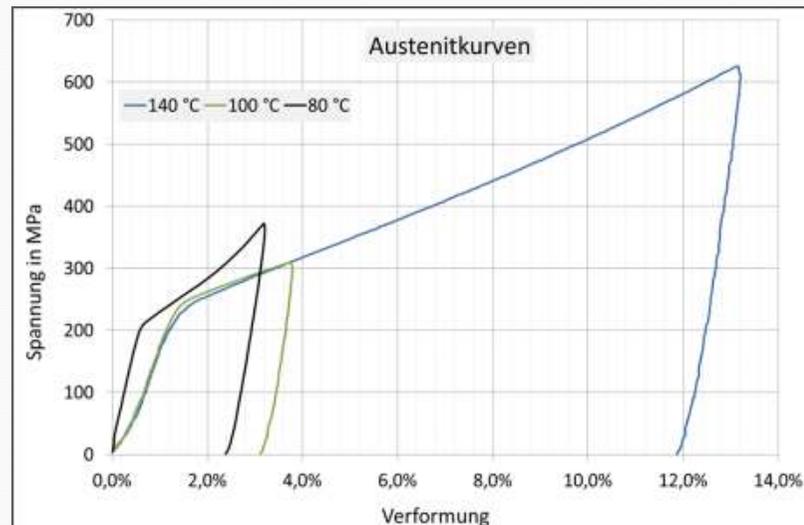


- **Standardmaterial** benötigt Einlaufprozedur zur Stabilisierung des Martensits (Stabilisierungsdauer variiert stark)
- **Spezialmaterial** ohne Einlaufverhalten am Markt auf Anfrage erhältlich (ohne Stabilisierung sofort einsetzbar)

Materialanalyse

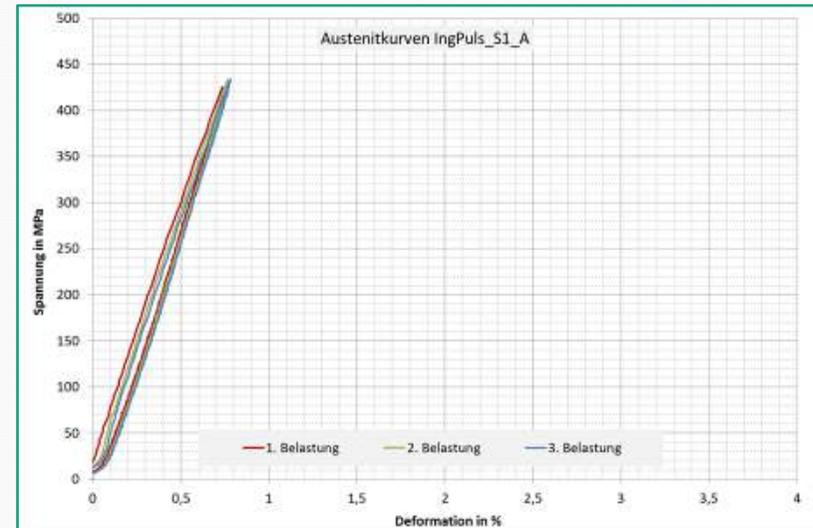
Mechanische Charakterisierung: Austenitverformung

Standardlegierungen



- Keine Pseudoelastizität in der Hochtemperaturphase (Austenit)
- Plastische Verformung ab ca. 200 MPa
→ aktorisch nicht einsetzbar

Spezialanfertigung

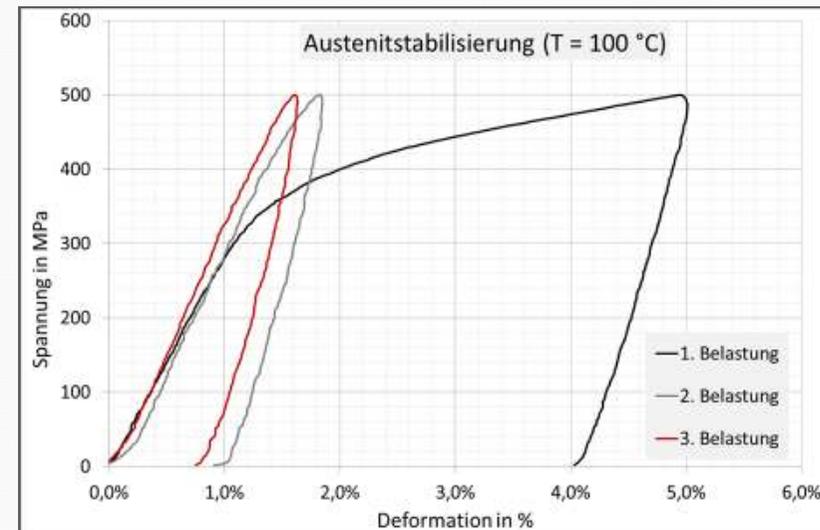
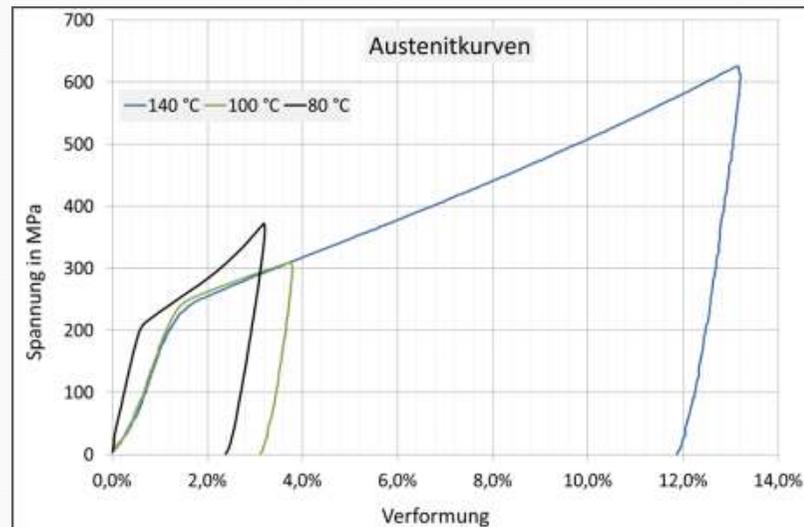


- Keine plastische Verformung bei Belastung im Austenitgebiet (bis 600 MPa)
- Streckgrenze > 600 MPa
→ aktorisch sofort einsetzbar

Materialanalyse

Mechanische Charakterisierung: Austenitverformung

Standardlegierungen

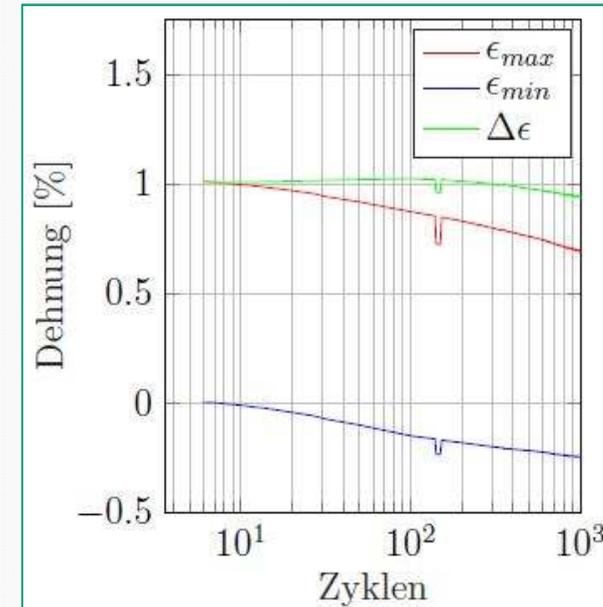
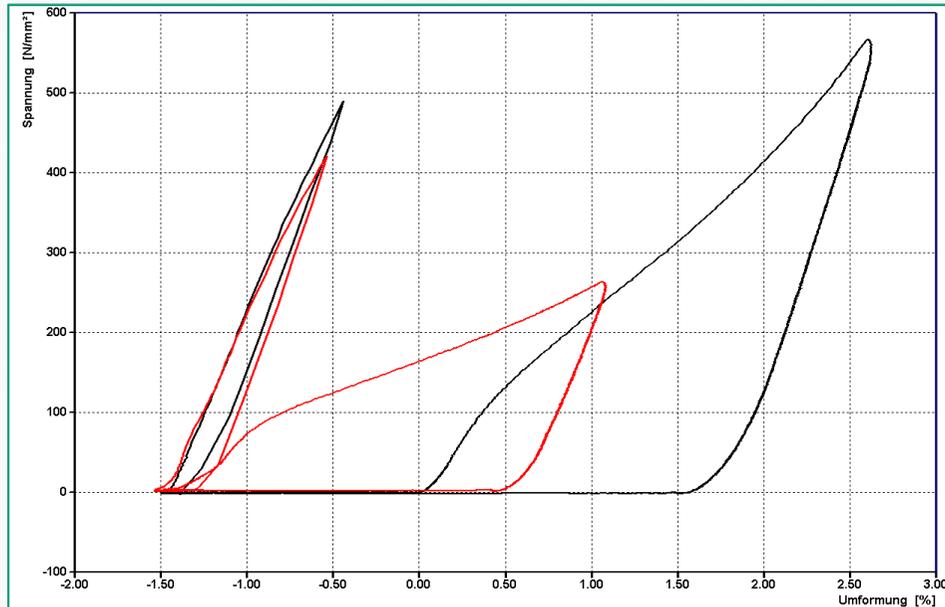


- **Standardmaterial** zeigt plastische Verformung im aktorischen Einsatzgebiet: Austenitstabilisierung erforderlich (Stabilisierung nach 5-10 Zyklen abgeschlossen ($\epsilon_{irr} < 0,1 \%$))
- **Spezialmaterial** mit stabilem Austenitverhalten auf Anfrage erhältlich

Materialanalyse

Mechanische Charakterisierung: Effektstabilität

Spezialanfertigung: zyklische Aktivierung unter Last



→ Im aktorischen Einsatz bildet sich auch beim stabilen **Spezialmaterial** ein **starker Zweiwegeeffekt** aus:

$$\epsilon_{ZWE} = 1,5 \% \text{ (nach 200 Zyklen)} = \epsilon(0) \text{ bzw. } \epsilon_{rev}$$

→ Anwendungsspezifische Stabilisierung des ZWE nötig

→ ϵ_{ges} = konst. stabil bis fast 1000 Zyklen (weitere Langzeitversuche laufen)

Formgedächtnislegierungen in der Hochlastaktorik: Potentiale und Herausforderungen

- Einführung
 - Stand der Technik: Drahtaktorik
 - Motivation: Aktoren für hohe Lasten
- Materialanalyse
 - Thermische Charakterisierung
 - Mechanische Charakterisierung
- **Zusammenfassung:** Forschungsbedarfe

Zusammenfassung

Forschungsbedarfe

- Stangenmaterial ist **kein optimiertes Halbzeug**
 - PUT teilweise nicht exakt (falscher Effektmodus bei RT!)
 - therm. Charakteristik inhomogen
- Stangenmaterial aus Standardlegierungen (ab $d > 6$ mm) zeigt:
 - starkes **Degradationsverhalten** im Martensit
 - plastische Verformungsanteile und Zweiwegeeffekt
 - Keine Superelastizität im Austenit
 - Plastische Verformung im Austenit ab 200 MPa
- Stabilisierung des mechanischen Verhaltens notwendig und möglich

Zusammenfassung

Forschungsbedarfe

- Allg. Ausbildung eines starken **Zweiwegeffektes** bei Zylinderhalbzeugen im aktorischen Betrieb (Aktivierung unter Last)
 - Aktuell: anwendungsspezifische Stabilisierung des Zweiwegeffektes
 - Zukünftig:
 - Analyse der wirksamen Mechanismen und Einflussfaktoren
 - Optimierung der Mikrostruktur
 - Anpassung der Prozessroute für Stangenhalbzeuge

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Linda Weisheit

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik

Tel: +49 (0) 351 – 4772 2144

E-Mail: linda.weisheit@iwu.fraunhofer.de