Numerische Simulation des Aktivierungsverhaltens von thermischen Formgedächtnislegierungen

Dipl.-Ing. Kenny Pagel

Dipl.-Ing. (FH), M.Sc. André Bucht

Cand.-Ing. Jakob Jung

Model Based Design Forum

Darmstadt, 26.05 2009

Fraunhofer IWU

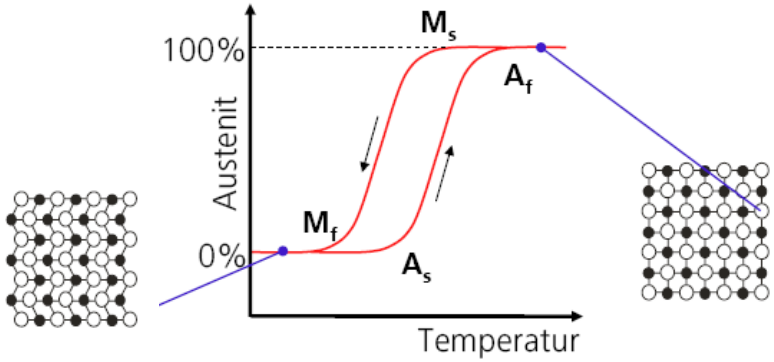
IWP INSTITUT WERKZEUGMASCHINEN UND PRODUKTIONSPROZESSE

Inhalt

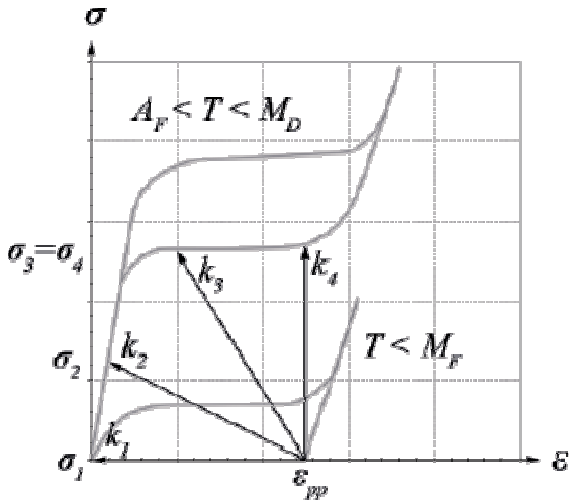
1. Einleitung
2. Physikalische Vorgänge und Modellierung
3. Simulink®-Modell
4. Evaluierung des Modells
5. Regelung mit Widerstandsrückkopplung
6. Anwendungsbeispiel: Drosselklappe

Grundlagen Formgedächtniseffekt

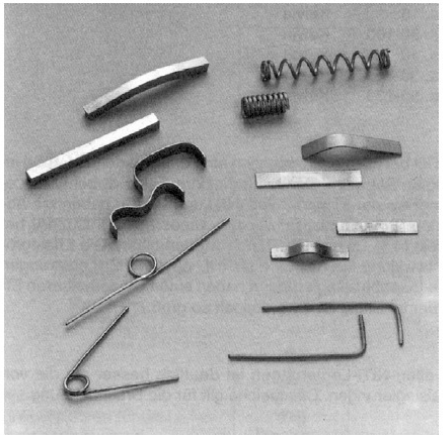
- spezielle Legierungen, können den martensitischen Gefügezustand verlassen und wieder annehmen → Änderung des Spannungs-Dehnungsverhaltens und der äußeren Geometrie z.B. Verkürzung eines Drahtes
- reversible Phasenumwandlung durch thermisches Feld zwischen
  - Martensit: Tieftemperaturphase
  - Austenit: Hochtemperaturphase
- Umwandlung wird beschrieben durch
  - M_s, A_s...Start der Phasenumwandlung
  - M_f, A_f...Abschluss der Phasenumwandlung
  - ξ...Martensitanteil
- sehr komplexes Materialverhalten, aufgrund von thermischen und mechanischen Hysteresen



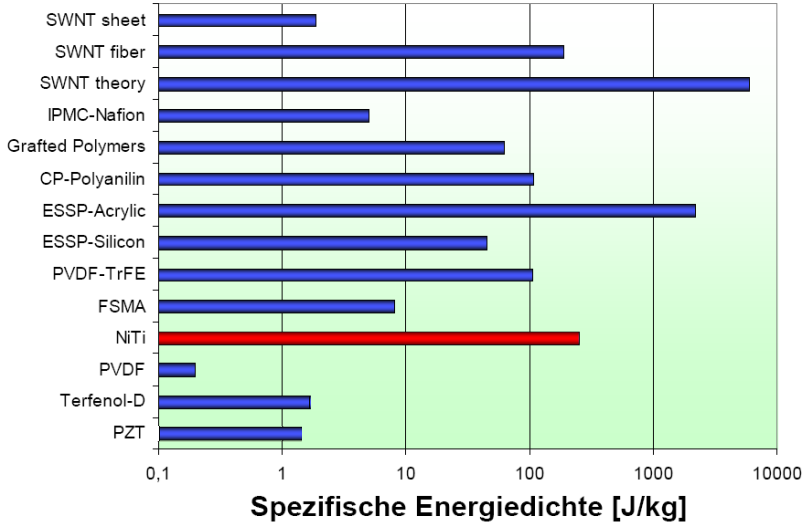
Der E-Modul von Austenit ist 2-3 mal größer als der von Martensit



Eigenschaften Formgedächtnislegierungen



- meist Einsatz von binären Nickel-Titan-Legierungen
- kommerziell verfügbar als Draht, Stab, Rohr oder Blech
- Umwandlungstemperaturen zwischen -200°C und +110°C abhängig von Legierungszusammensetzung
- Dehnung bis maximal 4% abhängig von der zu erreichenden Zyklenzahl
- Blockierkräfte bis 200 N/mm^2
- bei entsprechender Auslegung Zyklenzahlen >100.000 möglich
- Sehr große spezifische Energiedichte → sehr kleine, leichte Aktoren möglich

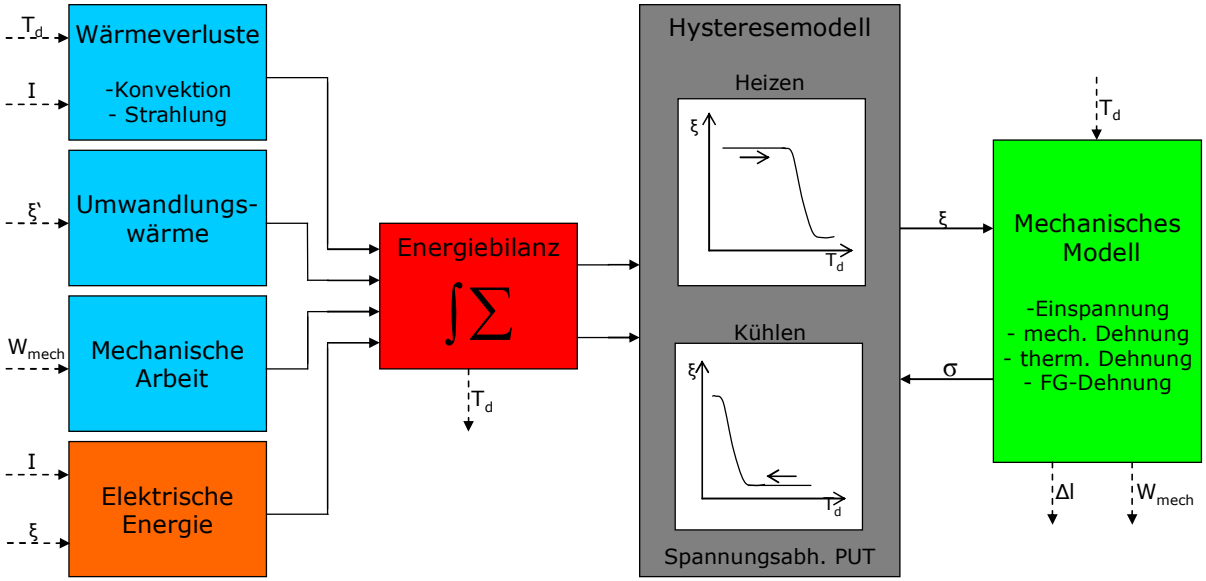


Zielstellung

- meist FE-Analyse des sehr komplexes Materialverhalten → dynamisches Verhalten wird oft nicht mit betrachtet
- deshalb Entwicklung eines numerischen Modells, welches die dynamischen Eigenschaften des FGL-Materials beschreibt zur:
  - Simulation von Aufheiz- bzw. Abkühlvorgängen
  - Untersuchung von Regelungskonzepten
  - Entwicklung modelbasierter, sensorloser Regelungskonzepte
  - Energie- und oder geometrieoptimaler Aktorentwurf
- Modellbildung eines FGL-Drahtes (einachsiger Spannungszustand) mit Matlab/Simulink, da domänenunabhängig modelliert werden kann
- Validierung des Modells mit verschiedenen Lastfällen und durch Regelung einer Drosselklappe

Energiebilanz als Grundlage des Modells

- Numerisches Simulationsmodell auf Basis einer Energiebilanzierung
- Hysteresemodell des FG-Effektes
- Wärmeübergang beim Abkühlen durch freieKonvektion
- Verschiedene Lastfälle modellierbar



Modellierung der Hystereseschleife mit Arctan-Modell

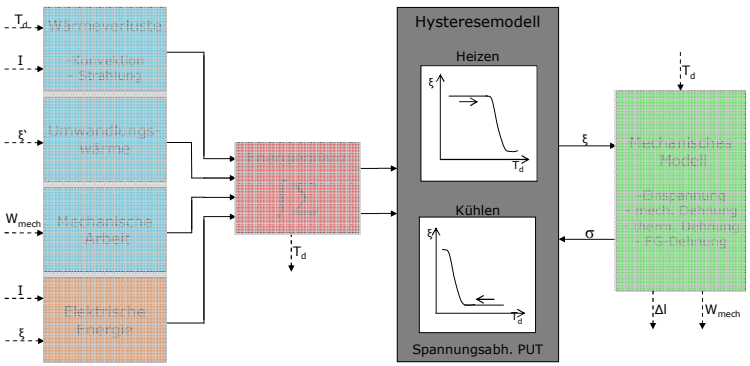
- Martensit ➡ Austenit (erwärmen)

$$\xi(T) = -\frac{1}{\pi}\cdot\xi_{\text{start}}\cdot\operatorname{atan}\left[a\cdot\left(T-\frac{1}{2}\left(A_s+A_f\right)\right)\right]+\frac{1}{2}\cdot\xi_{start}$$

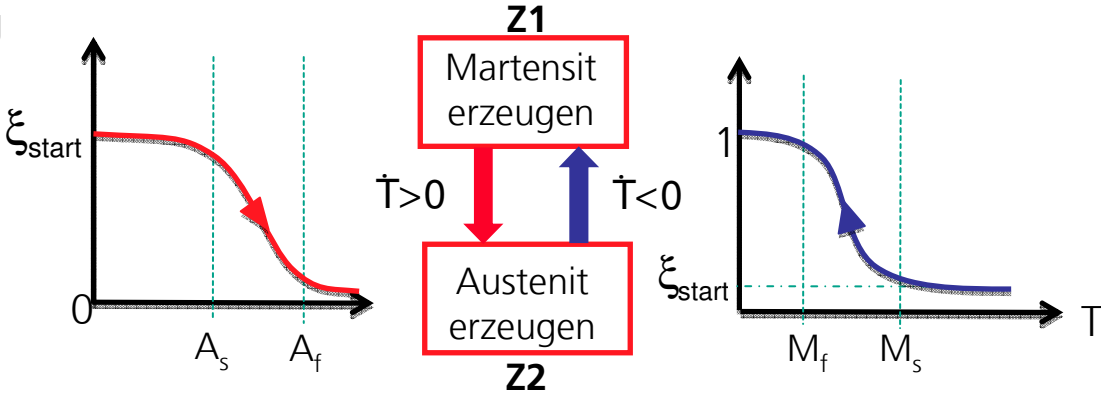
ξ Martensitanteil (0...1)

a Streckungsfaktor

A Umwandlungstemperaturen



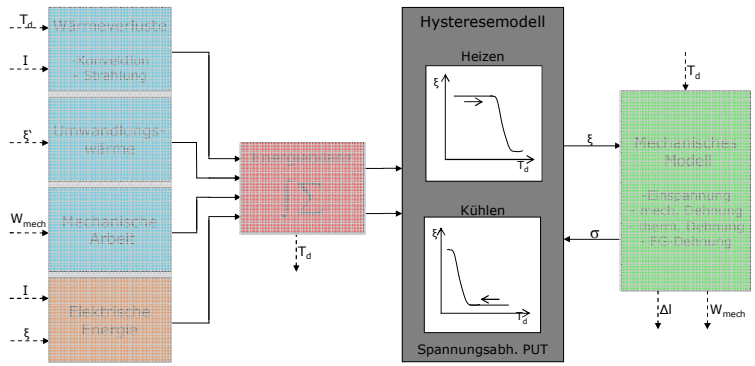
- kontinuierliche Phasenumwandlung
- asymptotischer Verlauf
- materialabhägige Steilheit des Übergangs wird durch Streckungsfaktor a beschrieben
- Fallunterscheidung (T) mittels Zustandsautomaten

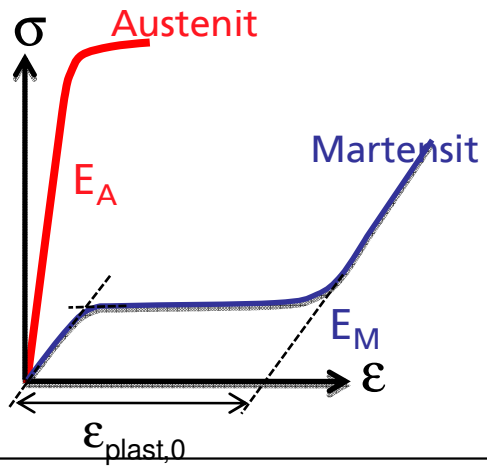


Model Based Design Forum, Darmstadt, 26.05.2009

Eindimensionales mechanisches Modell (1)

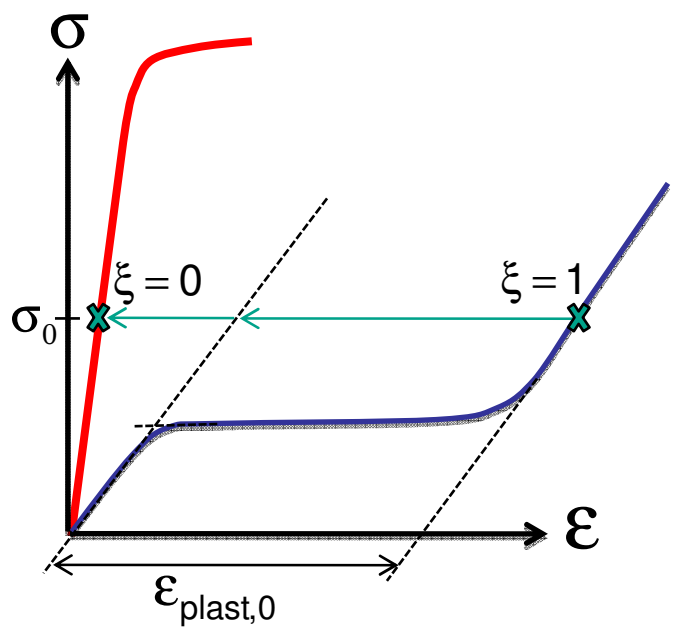
- Abstraktion durch die Parameter E_A ,E_M und ε_{pla}
- ε_{plast} verschwindet bei Phasenumwandlung M
- E-Modul ändert sich bei Phasenumwandlung
  - $\varepsilon = \varepsilon_{plast} + \varepsilon_{el}$
  - $\varepsilon_{plast} = \varepsilon_{plast,0} \cdot \xi$
  - $\varepsilon_{el} = \frac{\sigma}{E}$
  - $\frac{1}{E} = \frac{\xi}{E_M} + \frac{1-\xi}{E_A}$





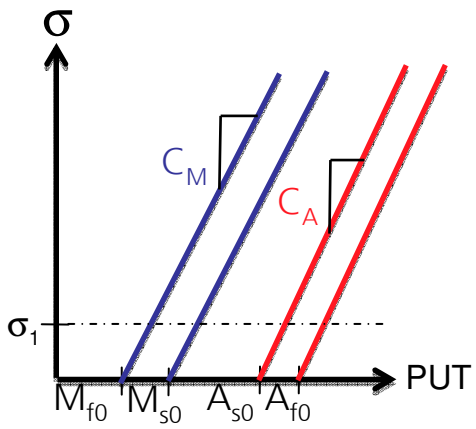
Eindimensionales mechanisches Modell (2)

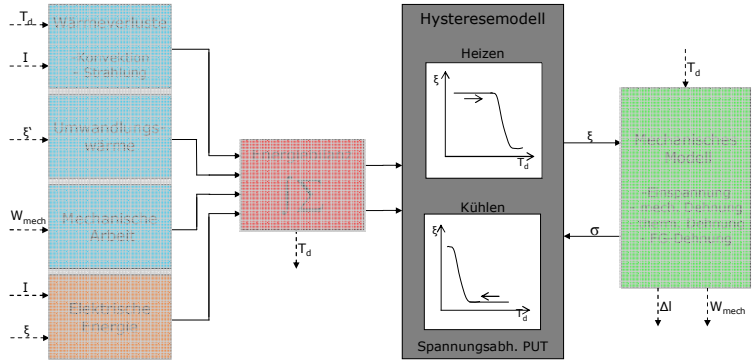
- insgesamt:
  - $\varepsilon(\sigma,\xi) = \varepsilon_{plast,0} \cdot \xi + \sigma \cdot \left(\frac{\xi}{E_M} + \frac{1-\xi}{E_A} \right)$
- Längenänderung:
  - $\Delta L = L_0 \cdot \varepsilon$
- Bsp: Umwandlung M ➡ A bei $\sigma = \sigma_0$
  - $\xi = 1: \varepsilon = \varepsilon_{plast,0} + \sigma_0 / E_M$
  - $\xi = 0: \varepsilon = \sigma_0 / E_A$



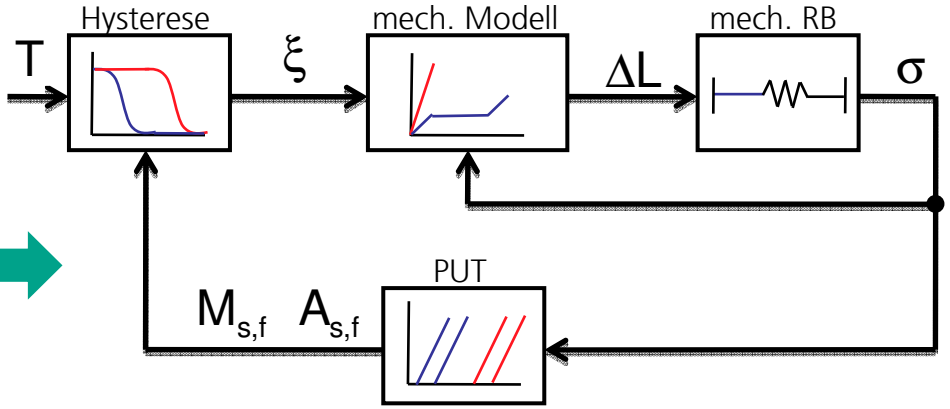
Spannungsabhängige Phasenumwandlungstemperaturen (PUT)

- mech. Spannung hat Einfluss auf PUT
  - $M_{s,f} = M_{s0,f0} + \sigma / C_M \qquad A_{s,f} = A_{s0,f0} + \sigma / C_A$



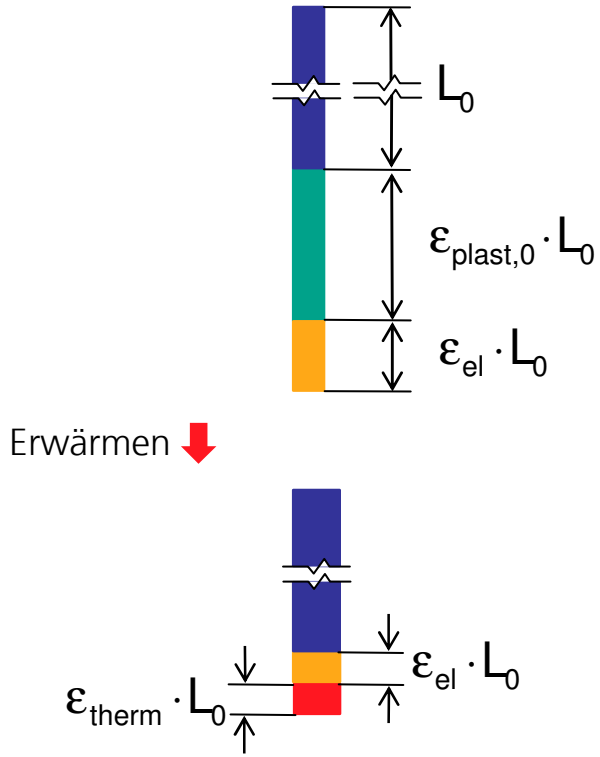


- hängt σ von ε ab, entsteht eine Berechnungsschleife (algebraic loop)

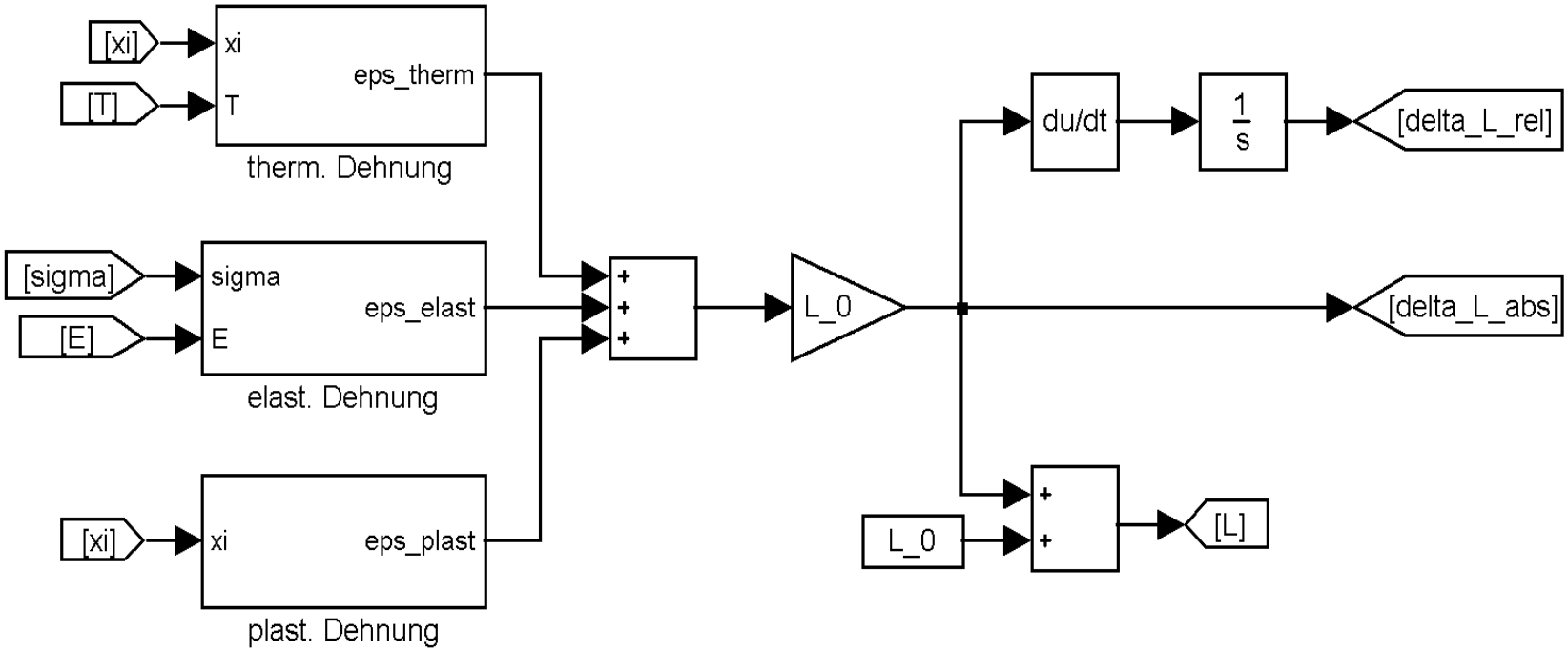


Berücksichtigung der thermischen Ausdehnung

- typisches metallisches Ausdehnungsverhalten
  - $\varepsilon_{therm} = \beta \cdot (T - T_U)$
  - β ... therm. Ausdehnungskoeffizient [1/K]
- Ausdehnungskoeffizient ist gefügeabhängig
  - Austenit: $\beta_A = 11 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$
  - Martensit: $\beta_M = 6{,}6 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$
  - während Phasenumwandlung:
    $\beta = \xi \cdot \beta_M + (1 - \xi) \cdot \beta_A$
- Anteil an Gesamtdehnung
  - $\varepsilon = \varepsilon_{plast} + \varepsilon_{el} + \varepsilon_{therm}$
  - Bsp: $T - T_U = 100K$ ➡ $\varepsilon_{therm} = 0{,}1\%$



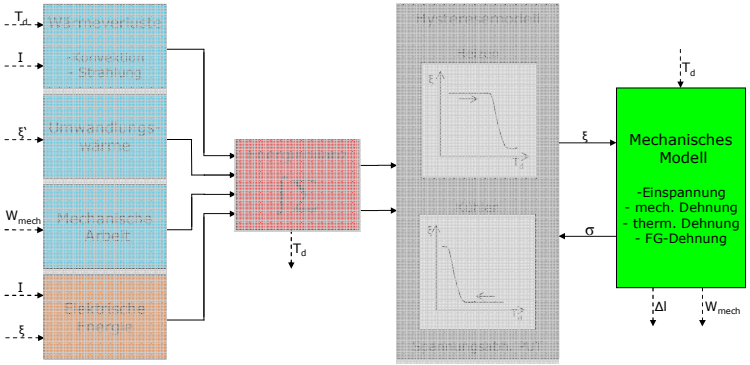
relative Längenänderung



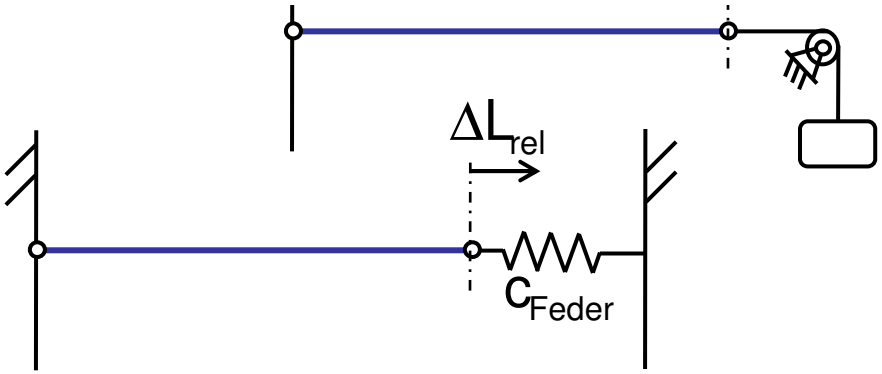
Mechanische Randbedingungen

- Fall 1: konstante Last F_0
  - $\sigma_0 = F_0 / A_Q$

    A_Q ... Drahtquerschnitt



- Fall 2: Draht gegen Feder
  - $\sigma = (F_0 - \Delta L_{rel} \cdot c_{Feder}) / A_Q$



- mechanische Abgabeleistung
  - $P_{mech} = \sigma \cdot A_Q \cdot \left(-\frac{d\Delta L}{dt} \right)$

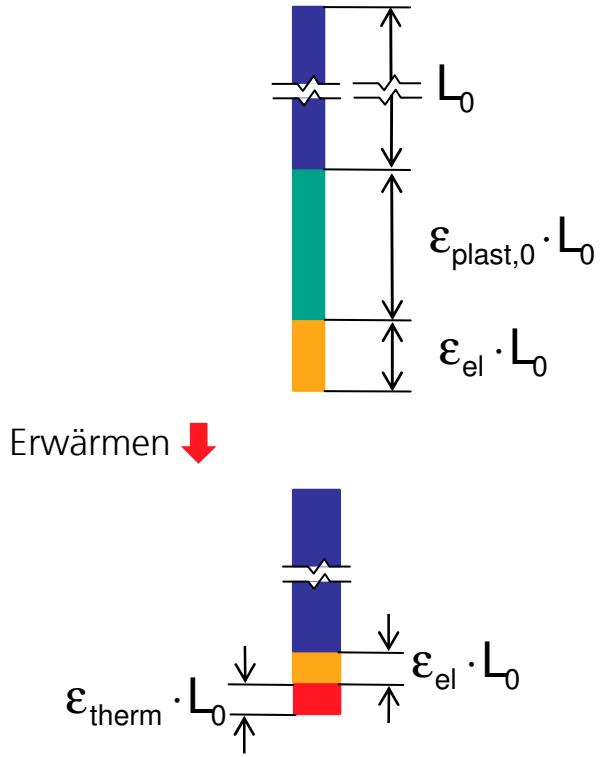
elektrisches Widerstandsverhalten (1)

- Definitionsgleichung des elektr. Widerstandes
  - $R = \rho \cdot L / A_Q$

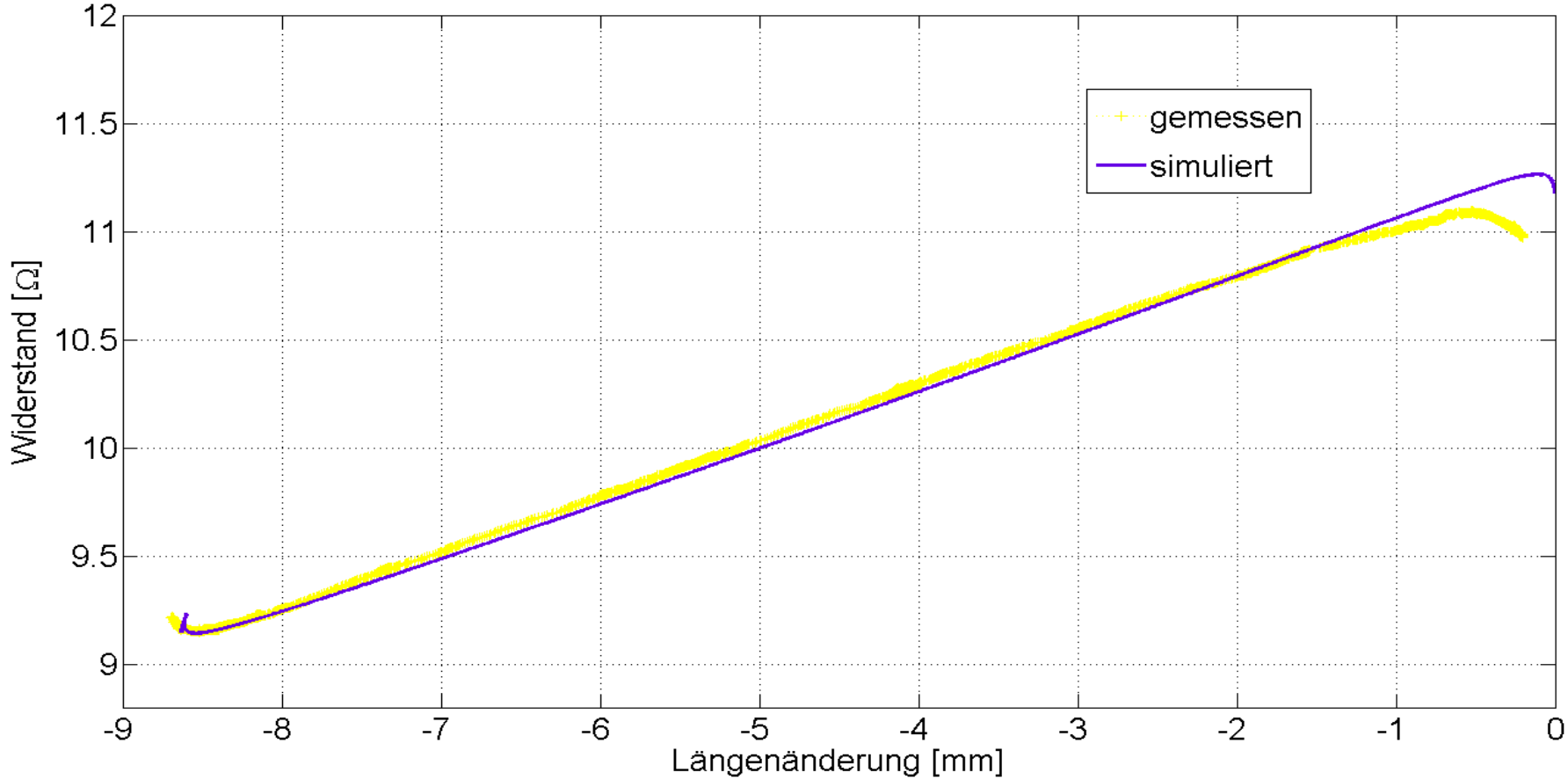
    ρ ... spezifischer Widerstand $[\Omega m]$
- spezifischer Widerstand ist gefügeabhängig
  - Austenit: $\rho_A = 0.85 \cdot 10^{-6} \Omega m$
  - Martensit: $\beta_M = 1 \cdot 10^{-6} \Omega m$
  - während Phasenumwandlung:

    $\rho = \xi \cdot \rho_M + (1 - \xi) \cdot \rho_A$
- zusätzlich: Volumenkonstanz und thermischer Einfluss
  - $R = \rho \cdot L_0 / A_Q \cdot (1 + \varepsilon)^2 \cdot [1 + \alpha_T \cdot (T - T_U)]$

    α_T... Temperaturkoeffizient [1/K]



elektrisches Widerstandsverhalten (2)



Thermisches Modell (1)

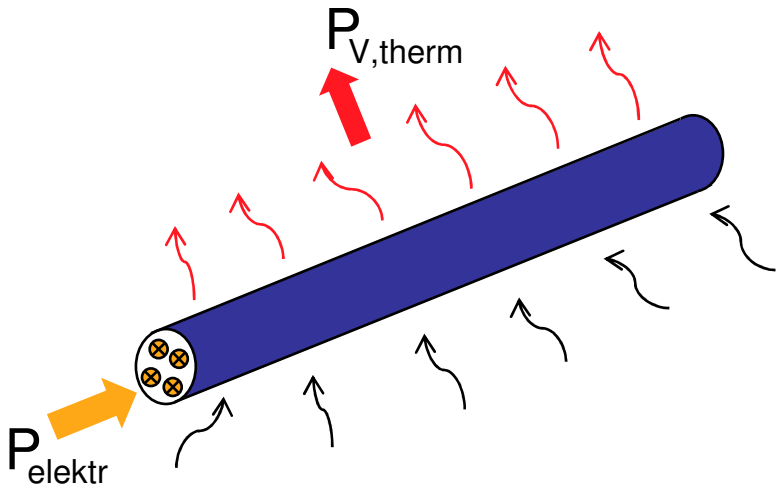
- freie Konvektion und Wärmestrahlung
  - $P_{V,therm} = P_{V,konv} + P_{V,strahl}$
  - $P_{V,strahl} = \varepsilon_{strahl} \cdot \sigma_{strahl} \cdot A_{OF} \cdot \left(T^4 - T_U^4\right)$

ε_{strahl} ... Emissionszahl [-]

σ_{strahl} ... Stefan-Boltzmann-Konst. [W/m^2/K^4]

A_{OF} ... Drahtoberfläche

T_U ... Umgebungstemperatur



- Konvektion ist dominierend (~Faktor 20)
- Berechnung von $P_{V,konv}$ über Ähnlichkeitstheorie (Nusselt-Zahl)
- räumliche Orientierung des Drahtes (horizontal, vertikal) hat großen Einfluss

Thermisches Modell (2)

- Berechnung von $P_{V,konv}$
  - $P_{V,konv} = \alpha \cdot A_{OF} \cdot (T - T_u)$
  - $\alpha = Nu \cdot \lambda / l_{char}$

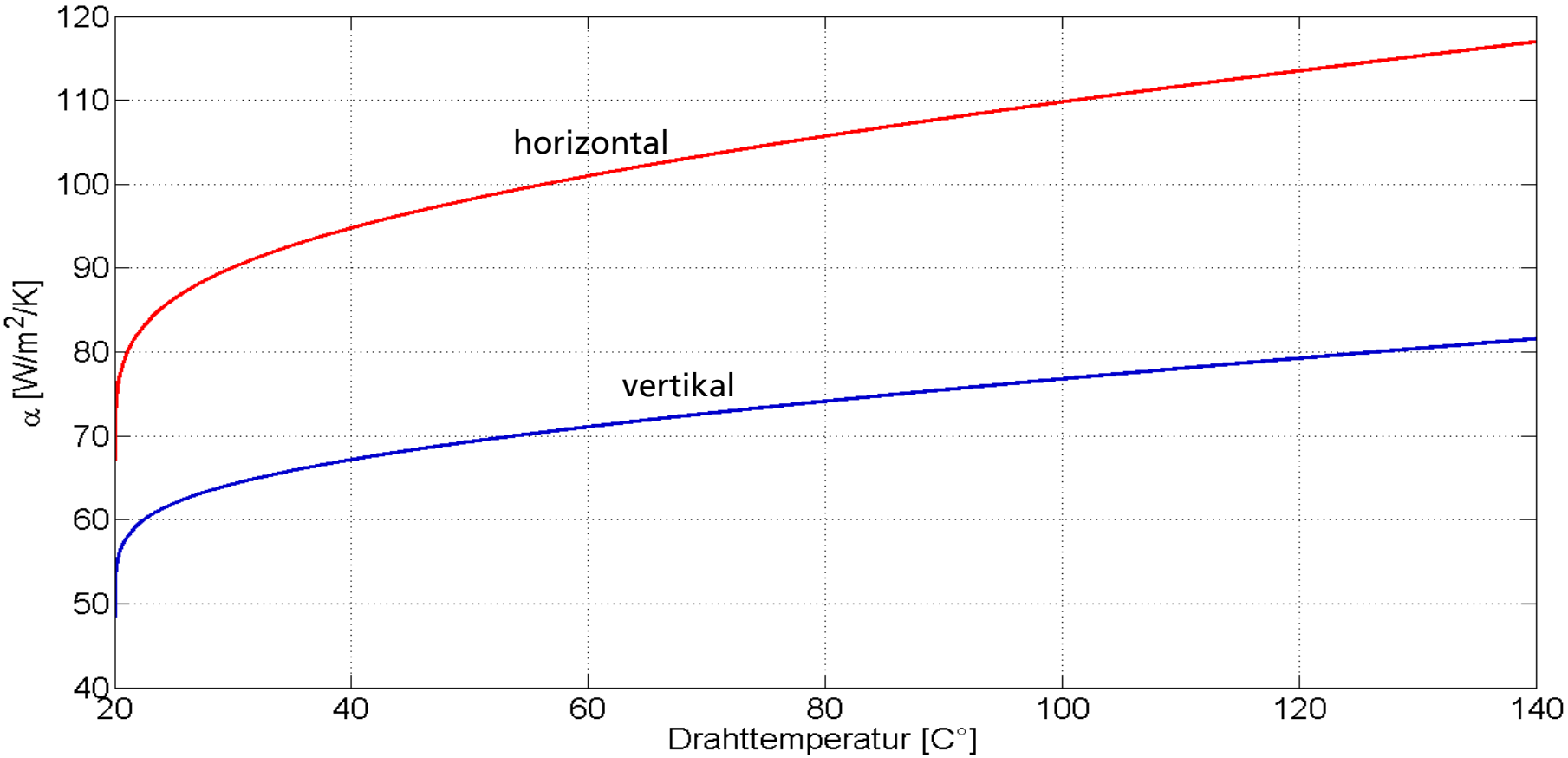
α ... Wärmeübergangskoeffizient [W/m^2/K]

Nu ... Nusselt-Zahl [-]

λ ... Wärmeleitfähigkeit der umgebenden Luft [W/m/K]

l_{char} ... charakteristische Länge (Heizstreckenlänge)

Thermisches Modell (3)



Umwandlungsenthalpie

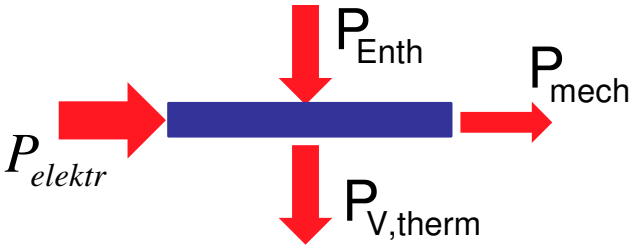
- Beim Umwandlungsvorgang tritt Enthalpie-leistung als Gegenkopplung in Erscheinung
- Großer Einfluss auf dynamisches Verhalten
  - $P_{Enth} = \dot{\xi} \cdot \Delta H \cdot m$

    ΔH ... spezif. Umwandlungsenthalpie [J/kg]

    m ... Drahtmasse [kg]

  - Erwärmen, M ➡ A: $\dot{\xi} < 0$
    Draht nimmt Enthalpieleistung auf

  - Abkühlen, A ➡ M: $\dot{\xi} > 0$
    Draht gibt Enthalpieleistung ab

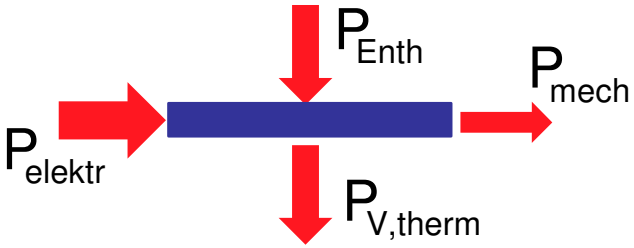


- im Draht verbleibende Leistung führt zu seiner Erwärmung

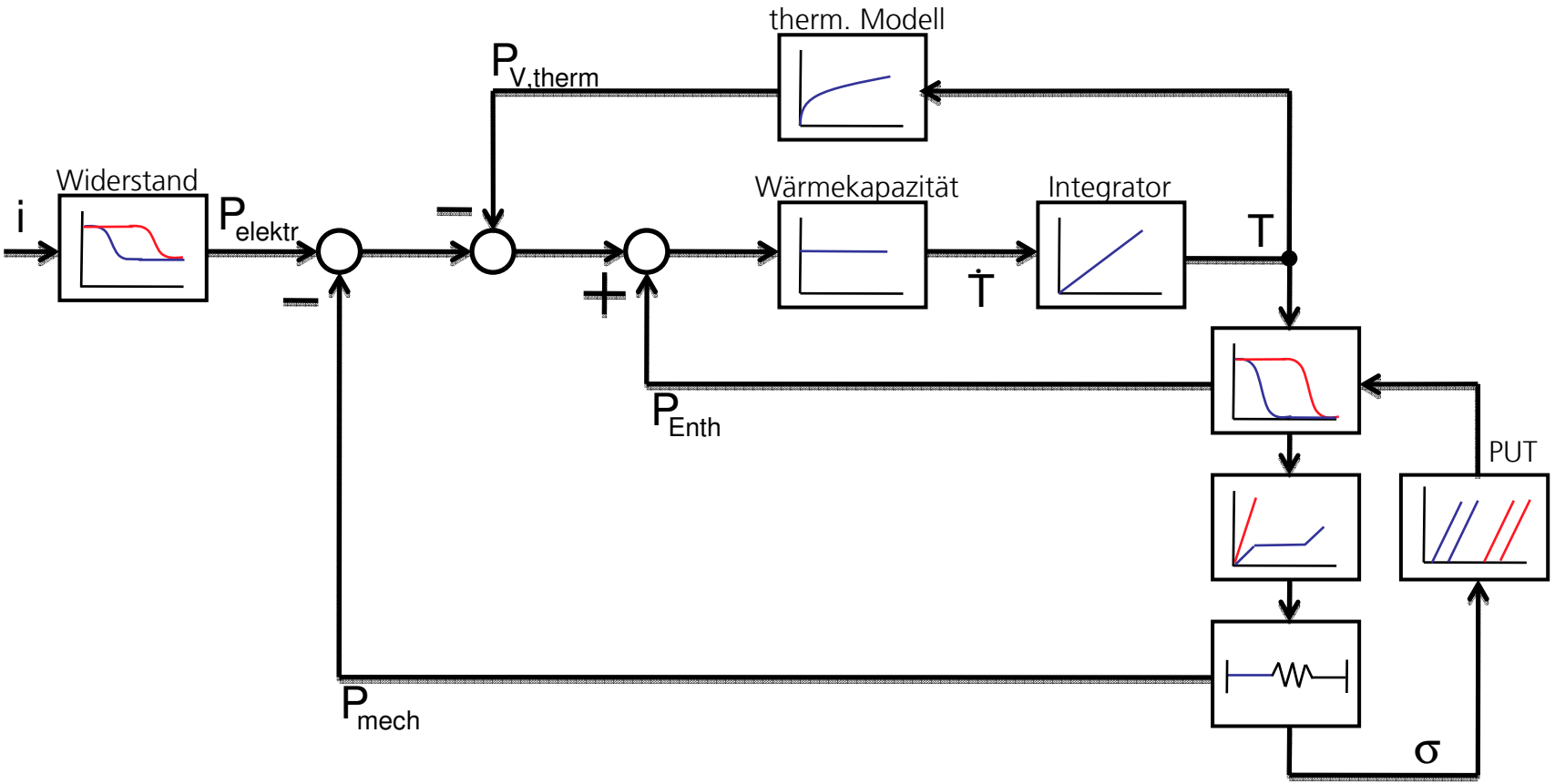
Leistungsbilanz (1)

- Grundlage des numerischen Modells
- nichtlineare, gewöhnliche DGL 1. Ordnung
  - $P_{elektr} + P_{Enth} - P_{V,therm} - P_{mech} = m \cdot c_p \cdot \dot{T}$

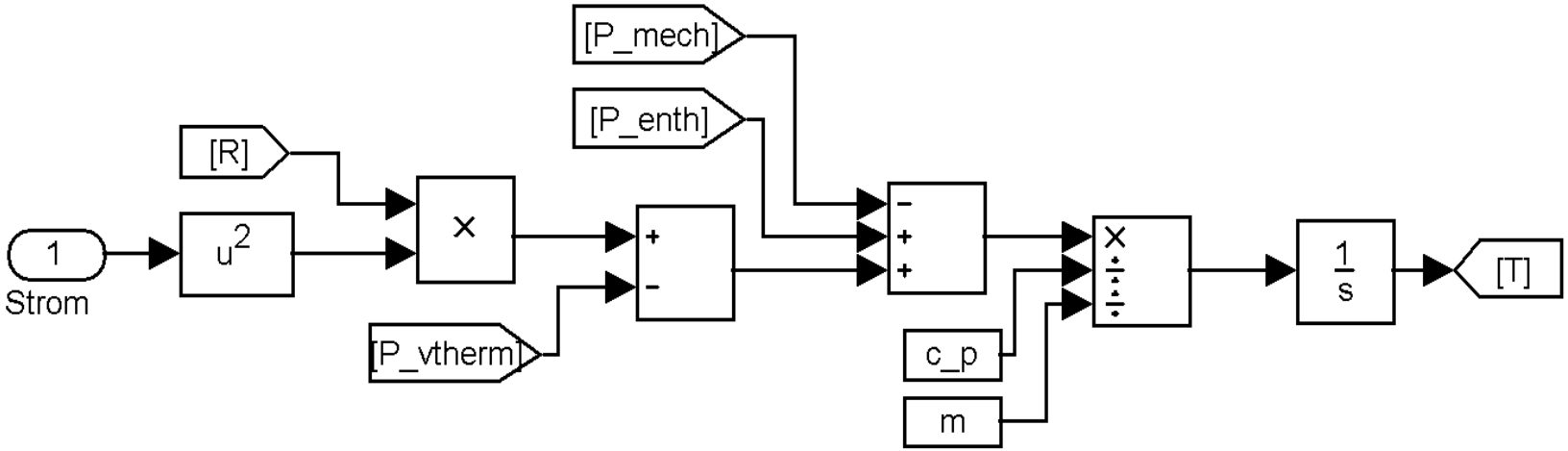
    c_p ... spezif. Wärmekapazität [J/kg/K]
- Eingangsgröße ist der elektrische Strom, Ausgangsgröße die Drahttemperatur
- Modell mit zahlreichen Rückkopplungen



Leistungsbilanz (2)



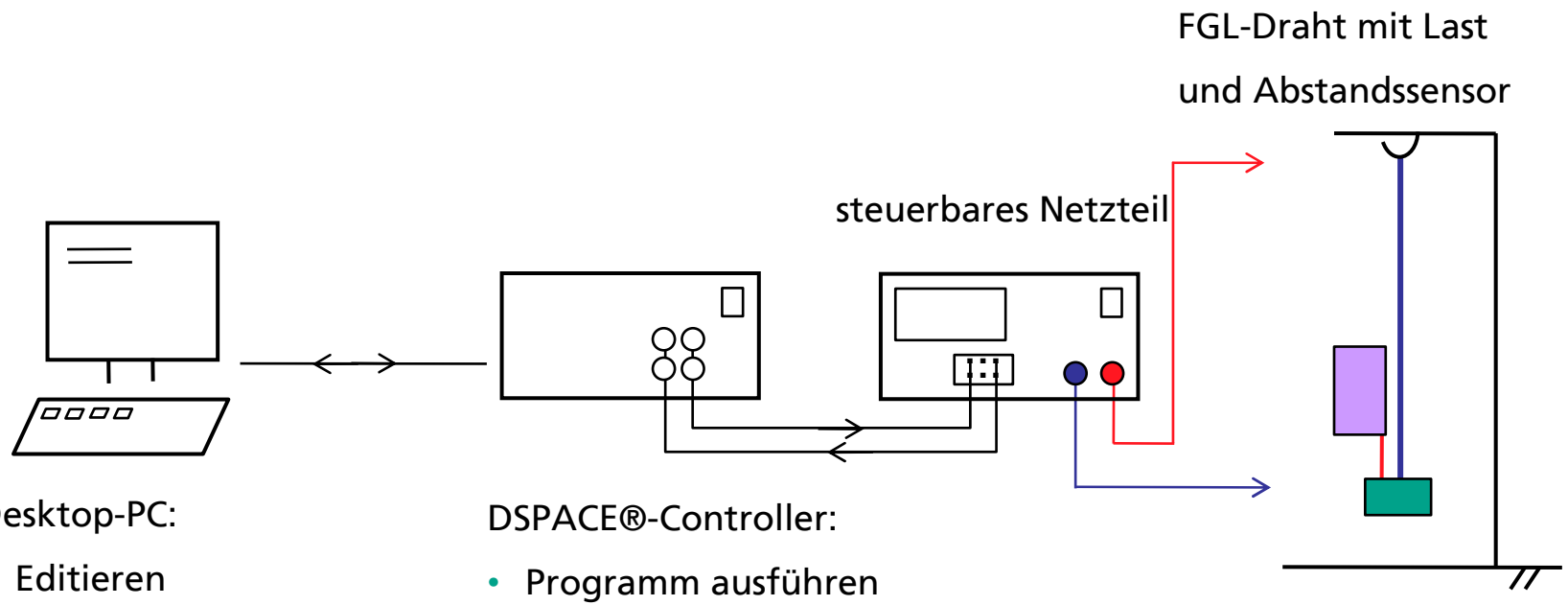
Leistungsbilanz (3)



Simulink®-Modell

- für umfangreiche Teilmodelle: Embedded Matlab Functions
- vollständige Parametrierbarkeit
- sämtliche Signale einsehbar
- Nutzen des Modells:
  - Unterstützung in der Vorentwicklungsphase
  - Umgehung der Temperaturmessung
  - Einsicht in physikalische Vorgänge
- Schwierigkeit bei der Implementierung:
  - algebraic loops

Versuchsaufbau (1)



Desktop-PC:

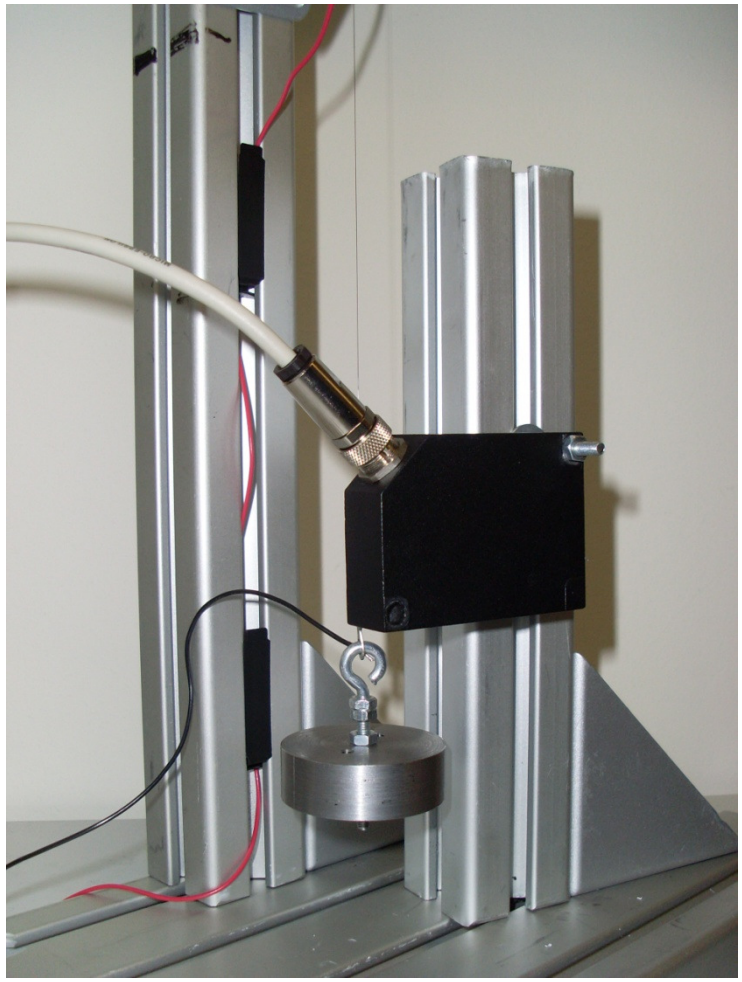
- Editieren
- Compilieren
- Programm übertragen
- Benutzeroberfläche

DSPACE®-Controller:

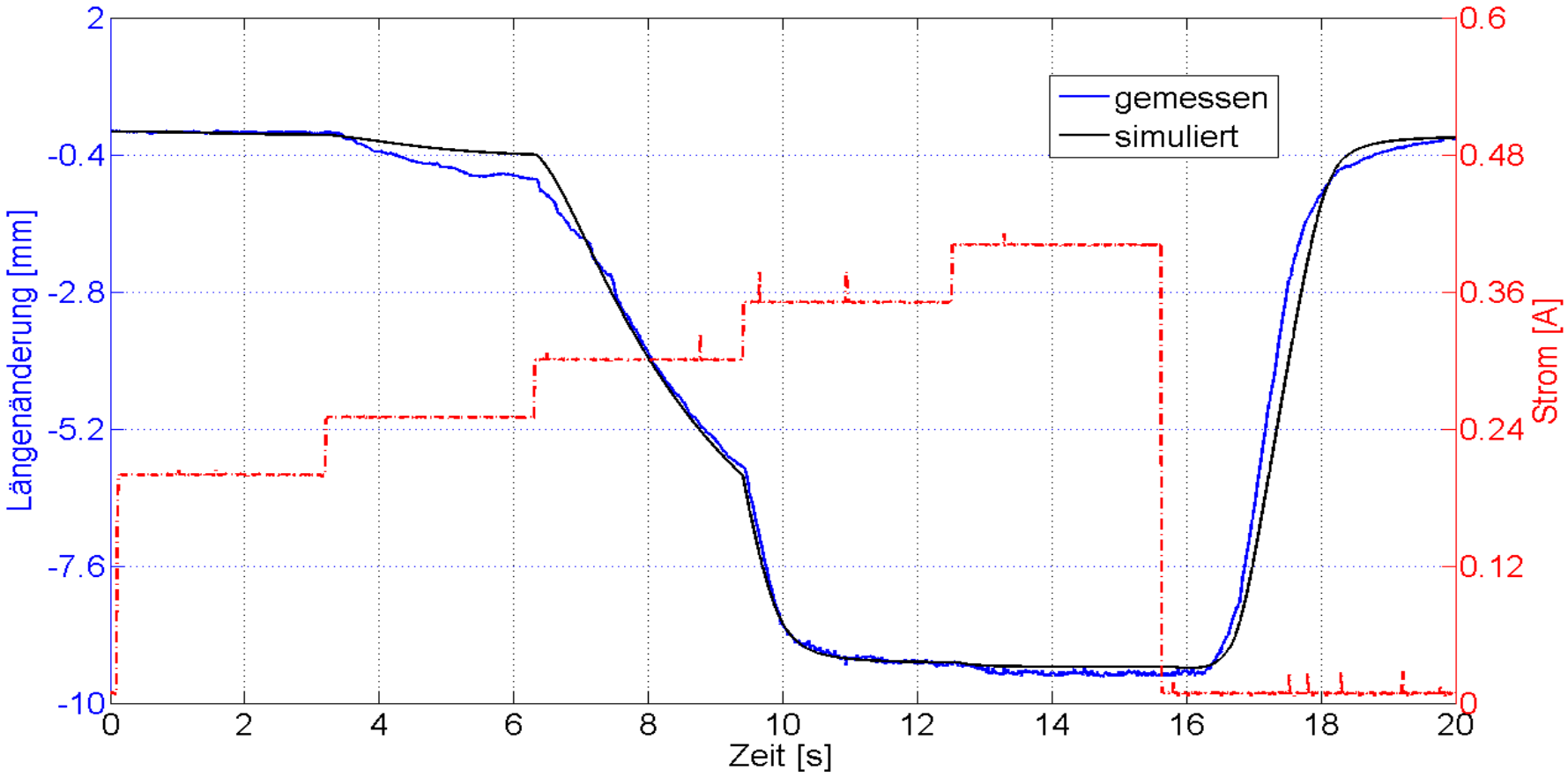
- Programm ausführen
- Echtzeitkommunikation mit PC

Versuchsaufbau (2)

- auf Desktop-PC Stromsollwert über Schieberegler einstellbar
- Aufzeichnung von Weg, Stromistwert und Widerstand
- Auswertung mit MATLAB®

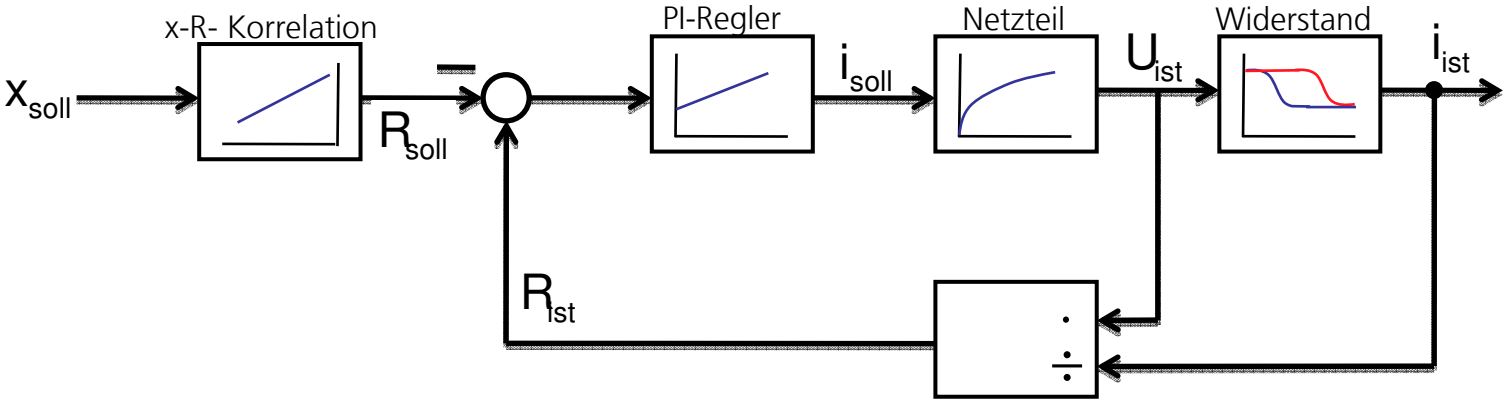


Evaluierung (2)

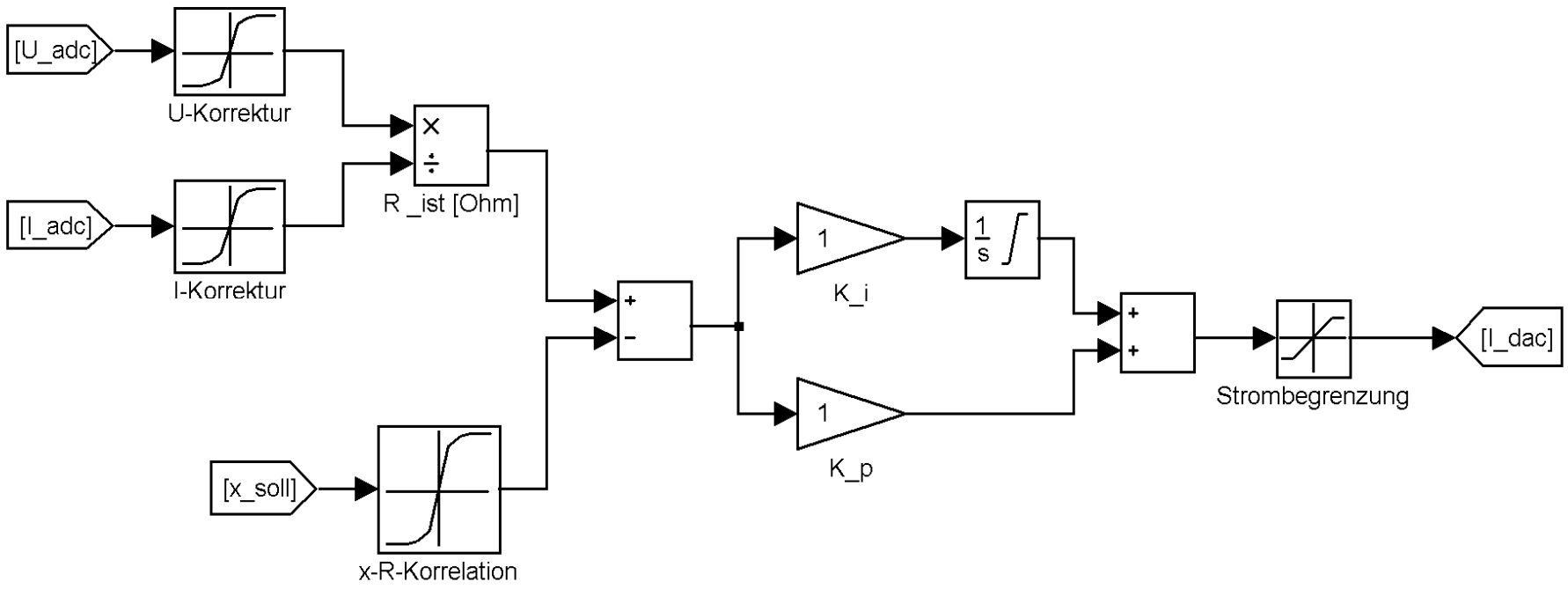


Widerstandsrückkopplung (1)

- Idee: Sensorlose Lageregelung
- gewünschte Längenänderung entspricht bestimmtem Widerstand
- monotonen Bereich der x-R-Korrelation ausnutzen



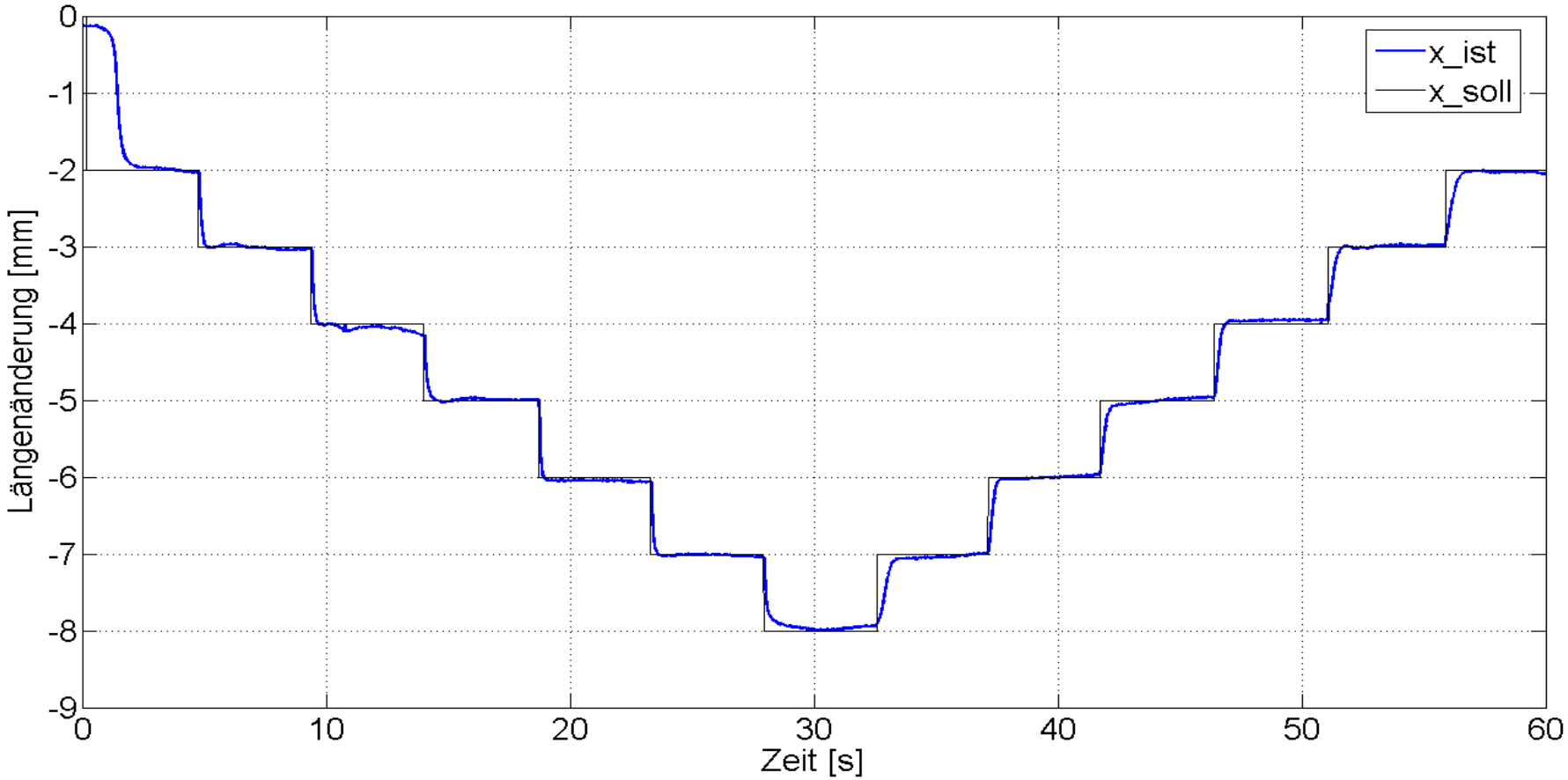
Widerstandsrückkopplung (2)



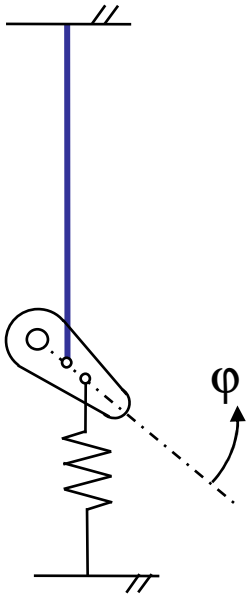
Model Based Design Forum, Darmstadt, 26.05.2009

Widerstandsrückkopplung (3)

Widerstandsrückkopplung (4)



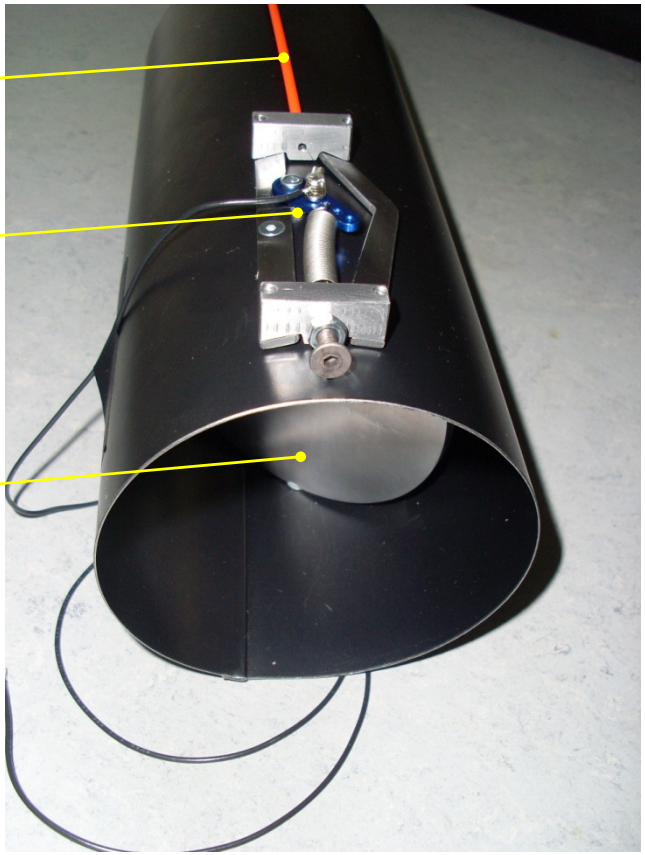
Anwendung: Lageregelung einer Drosselklappe (1)



FGL-Draht in Hülse

Hebel mit Rückstellfeder

schwenkbar gelagerte Klappe



Bibliographie

- L. Oelschläger: Numerische Modellierung des Aktivierungsverhaltens von Formgedächtnisaktoren am Beispiel eines Schrittantriebes, Dissertation, Shaker Verlag 2004
- D. C. Lagoudas: Shape Memory Alloys, 1. Auflage Springer 2008
- T. W. Duerig, K. N. Melton, D. Stöckel, C.M. Wayman: Engineering Aspects of Shape Memory Alloys, 1. Auflage Butterworth-Heinemann 1990
- H. Janocha: Adaptronics and Smart Structures, 1. Auflage Springer 1999
- K. Lawrenz, H. Brauer: Freie Konvektion am senkrecht stehenden schlanken Zylinder, VDI-Forschungsheft 663/91
- VDI-Wärmeatlas, 9. Auflage Springer 2002