

## Simulationsgestützte Untersuchung von Regelungskonzepten für Hochlastaktoren auf Basis von thermisch aktivierten Formgedächtnislegierungen

Formgedächtnislegierungen (FGL) können als thermomechanische Wandler zur Erzeugung einer Stellkraft oder eines Stellwegs benutzt werden. Der genutzte physikalische Effekt ist dabei die durch Wärmeeinwirkung ausgelöste Phasenumwandlung zwischen Martensit (Niedertemperaturphase) und Austenit (Hochtemperaturphase). Damit verbunden ist ein ausgeprägter Formgedächtnis (FG)-Effekt. Das Material ist in der Lage, sich nach einer scheinbar plastischen Verformung durch eine äußere Last wieder in die ursprüngliche Form umzuwandeln. Auf diese Weise sind große reversible Verformungen möglich, die aktorisch genutzt werden können. Unter einer FG-Hochlastaktorik werden FG-Aktoren mit großen Querschnitten verstanden. Die thermische Aktivierung erfolgt dabei über keramische Heizelemente, die an den Außenseiten angebracht werden können. Im Vergleich zur konventionellen FG-Drahtaktorik können sie auch unter

Druck beansprucht werden und sind in der Lage hohe Stellkräfte zu generieren. Aufgrund der großen Querschnitte ist jedoch auch das Materialverhalten wesentlich komplizierter. So liegt in der Regel ein mehrachsiger Spannungszustand vor und es können Temperaturgradienten über den Querschnitt entstehen. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden gesteuerte und geregelte FG-Hochlastaktoren zur Erzeugung eines Stellwegs simulativ untersucht. Für die gesteuerte Variante wird das Prinzip einer gestuften Stellwegenerzeugung benutzt, indem einzelne in einem Stapel angeordnete FG-Scheiben vollständig aktiviert werden. Auf diese Weise kann auf eine messtechnische Erfassung der Position verzichtet werden. Für die geregelte Variante soll ein modellbasiertes Regelungskonzept entwickelt werden, das die speziellen Charakteristiken der FG-Hochlastaktoren berücksichtigt und damit eine hohe Positioniergenauigkeit ermöglicht.

Die Beschreibung des thermomechanischen Verformungsverhaltens erfolgt auf Basis der Energie- und Impulsbilanz. Thermomechanische Kopplungseffekte werden dabei weitgehend vernachlässigt. Das thermische Verhalten lässt sich dann über die allgemeine Form der homogenen Wärmeleitgleichung beschreiben:

$$\rho c \dot{T} - \text{div}(\lambda \text{grad}(T)) = 0.$$

Für die Beschreibung des mechanischen Verformungsverhaltens werden wesentliche Vereinfachungen getroffen. Dazu gehört die Annahme eines einachsigen Spannungszustands sowie die Vernachlässigung von Wärmespannungen aufgrund von thermisch induzierten Dehnungen. Die über den Querschnitt konstante Spannung  $\sigma$  ergibt sich dann direkt aus der äußeren Last  $F$ :

$$\sigma = \frac{F}{A}.$$

Die technische Dehnung  $\varepsilon$  setzt sich aus dem Anteil der Transformationsdehnung  $\varepsilon_{trans}$  und einem zusätzlichen Anteil durch thermische Volumendehnung  $\varepsilon_{th}$  zusammen und wird allgemein über eine konstitutive Gleichung in der Form

$$\varepsilon = \varepsilon_{trans} + \varepsilon_{th} = f(\sigma, T)$$

beschrieben. Um das Hystereseverhalten während der Phasenumwandlung abbilden zu können, wird als zusätzliche Zustandsgröße der Martensitanteil als ein Maß für den Phasenumwandlungsgrad eingeführt:

$$\xi = \frac{\text{Volumenanteil Martensit}}{\text{Gesamtvolumen}}.$$

Zur Lösung des Systems werden Materialgleichungen für die spezifische Wärmekapazität  $c$ , die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , die technische Dehnung  $\varepsilon$  und für den Martensitanteil  $\xi$  benötigt. Die Aufstellung erfolgt auf der Basis von grundlegenden physikalischen Zusammenhängen. Zur Beschreibung des Martensitanteils wird ein Preisach-Hysteresemodell in der Form

$$\xi(\sigma, T) = 1 - \iint \mu(\alpha, \beta) z_w(\tilde{T}, \alpha, \beta) d\alpha d\beta, \quad \tilde{T} = T - k_\sigma \sigma$$

verwendet. Die Parametrierung des Hysterese Modells erfolgt auf Basis von Messungen des exothermen Wärmestroms bei Erwärmung/Abkühlung einer FG-Probe, die über das Verfahren der dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC) aufgenommen wurden.

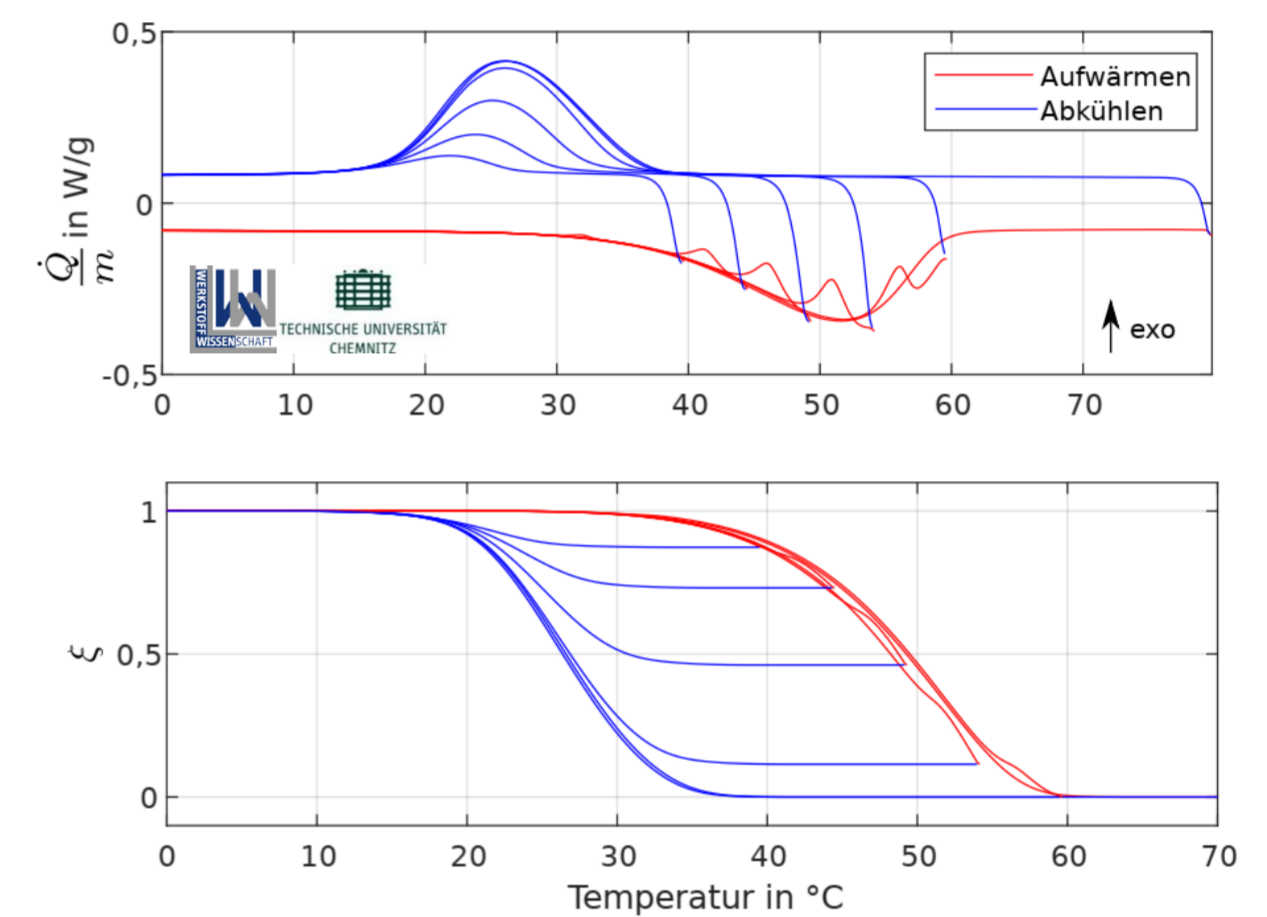


Abb.: DSC-Messungen des Wärmestroms und der daraus berechnete Martensitanteil

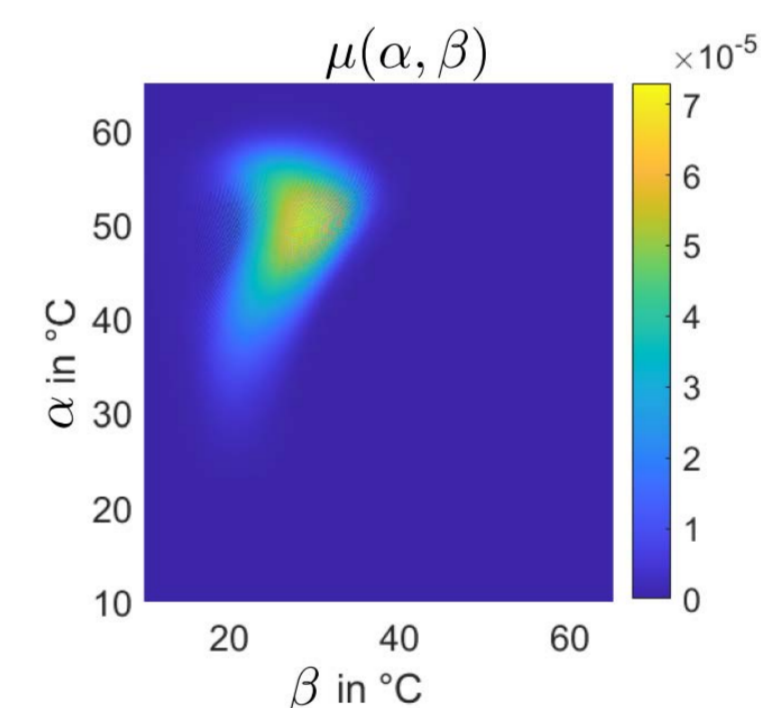


Abb.: Preisach-Funktion  $\mu(\alpha, \beta)$  des Hysterese Modells

Die gesteuerte Aktorvariante besteht aus mehreren quaderförmigen FG-Scheiben, die zusammen mit Wärmeisolerplatten und keramischen Heizelementen in einem Stapel angeordnet sind. Auf Basis definierter Anforderungen wurde die nötige Anzahl an FG-Scheiben sowie deren Dicken bestimmt. Für den kompletten Aktor wurde ein thermisches Simulationsmodell erstellt, mit dem folgende Untersuchungen durchgeführt wurden:

- Ermittlung der optimalen Anordnung der FG-Scheiben im Aktor
- Abschätzung der nötigen Dicken der Isolerplatten für unterschiedliche Materialien
- Abschätzung der resultierenden Aktorabmessungen und -steifigkeit.

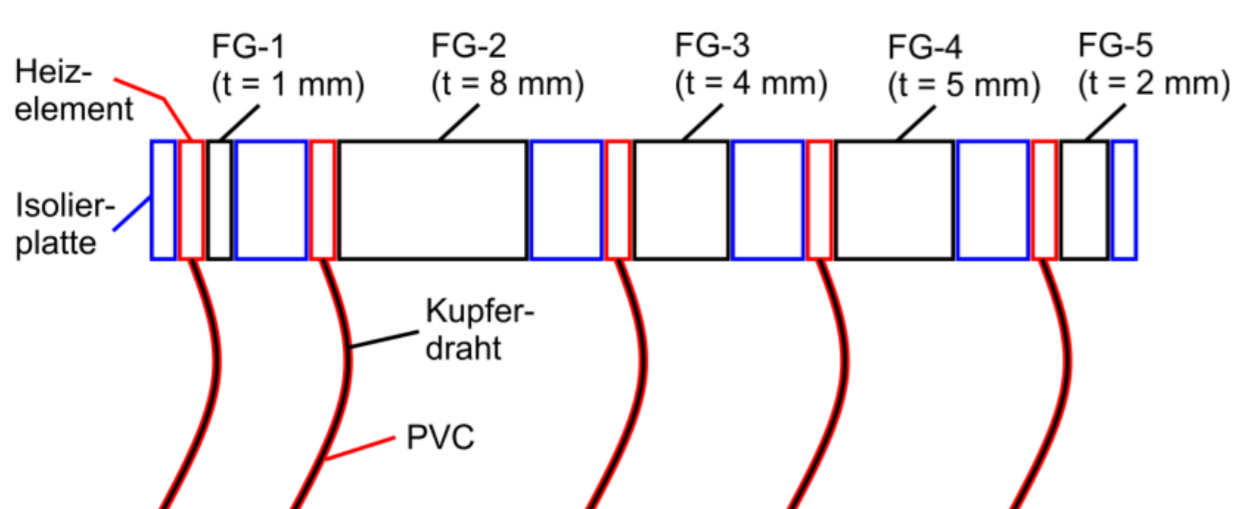


Abb.: Konzept für den gesteuerten Aktor

Für die geregelte Variante wurden zwei Simulationsmodelle als Untersuchungsgrundlage erstellt. Das erste Modell besteht aus der FG-Komponente, die einen zylinderförmigen Querschnitt besitzt, zusammen mit den an den Außenflächen angebrachten Heizelementen sowie den Anschlusskabeln. Es ermöglicht die Berechnung von hoch aufgelösten Temperatur- und Verschiebungsfeldern und bildet die Grundlage für den modellbasierten Reglerentwurf. Das zweite Modell bildet den kompletten Aktor ab und wird ausschließlich für thermische Analysen, wie etwa die Abschätzung von kritischen Temperaturen, benutzt.

Der generierte Stellweg bei thermischer Aktivierung der FG-Komponente wird über einen induktiven Wegaufnehmer gemessen und über die Heizelementtemperatur geregelt. Für den modellbasierten Reglerentwurf wurden die Konzepte der exakten Eingangs-Ausgangs-Linearisierung sowie der Trajektorienfolgeregelung mittels Vorsteuerung berücksichtigt. Ein simulativer Vergleich mit einem konventionellen PI-Regler hat gezeigt, dass mit dem modellbasierten Konzept insbesondere bei schnellen Reaktionszeiten und bei kleinen Stellwegen eine deutlich bessere Positioniergenauigkeit erreicht werden kann.

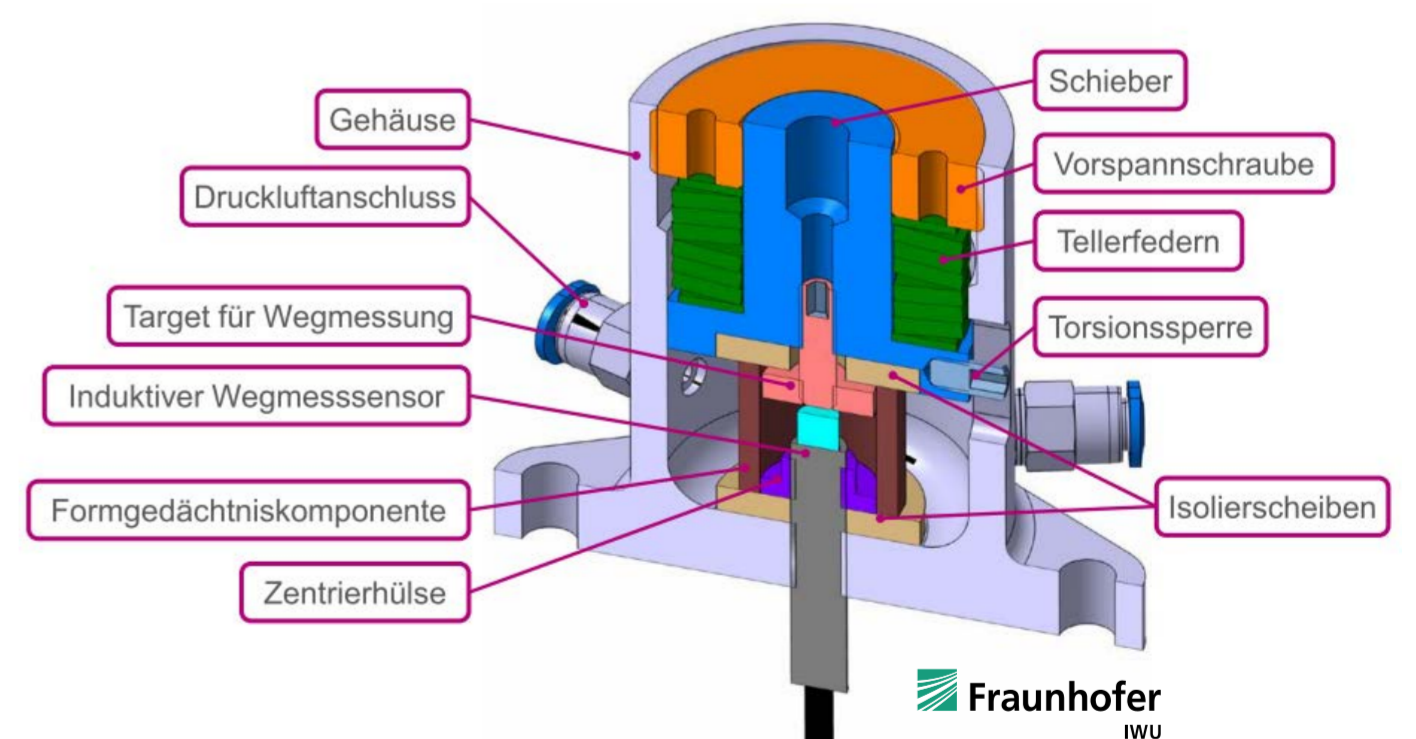


Abb.: Design des geregelten Aktors

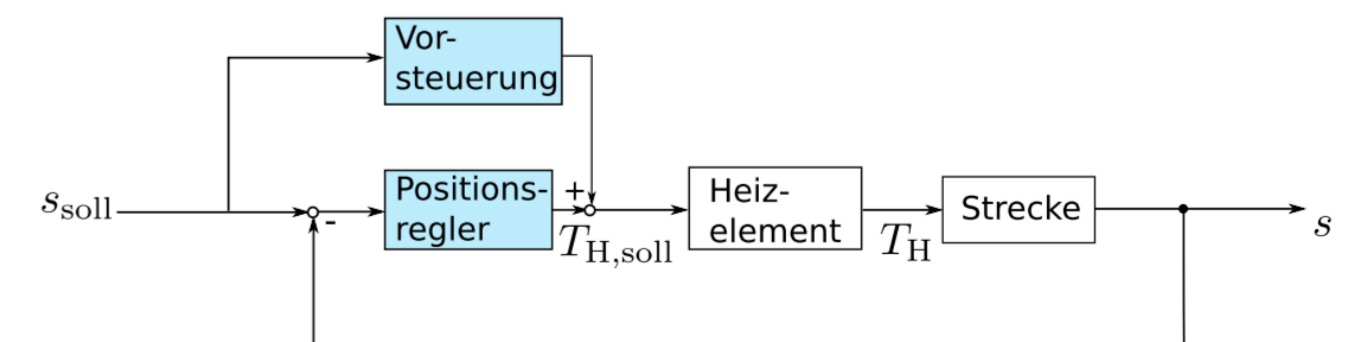


Abb.: Blockschaltbild des Regelkreises