



Veranstaltungsort:

Heinz Nixdorf MuseumsForum
Fürstenallee 7, 33102 Paderborn

- **Mechatronische Produkte**
(neue Funktionalitäten, Industrie 4.0, Kosteneffizienz, Zuverlässigkeit, ...)
- **Ressourceneffizienz**
(Energie, Material, ...)
- **Automatisierte Mobilität**
(Konzepte, Modelle, Sensorik)
- **Systems Engineering und Entwicklungsmanagement**
(Prozesse, Verfahren, Software, ...)
- **Innovative Konzepte und digitale Geschäftsmodelle**
(Modelle, Regelung, Optimierung, Eco-Systeme)
- **Nutzerfreundlichkeit und Akzeptanz**
(Assistenzsysteme, Schnittstellen, Interaktion, Gesetzgebung, ...)
- **Systemvernetzung und Systemintegration**
(Konzepte, Verfahren, ...)
- **Smarte Aktoren**
(Konzepte, Beispiele, ...)
- **Serienfertigung mechatronischer Produkte**
(Fallbeispiele, Komponenten, Architektur, Qualitätsmanagement, ...)

www.VDI-Mechatroniktagung.de

Integration einer Zustandsüberwachung in eine antagonistische formgedächtnisbasierte Verriegelung

Integration of a Condition Monitoring System into an Antagonistic Shape Memory Based Locking Device

Antonia Weirich, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Produktionssysteme, 44801 Bochum, Deutschland, weirich@lps.rub.de

Dennis Otibar, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Produktionssysteme, 44801 Bochum, Deutschland, otibar@lps.rub.de

Benedict Theren, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Produktionssysteme, 44801 Bochum, Deutschland, theren@lps.rub.de

Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Produktionssysteme, 44801 Bochum, Deutschland, kuhlenkoetter@lps.rub.de

Kurzfassung

Im folgenden Beitrag wird die Erweiterung eines Aktors auf Basis von Formgedächtnislegierungen (FGL) um ein Zustandsüberwachungssystem beschrieben, um das Anwendungsfeld des Aktors zu vergrößern. Bei diesem Beispielaktor handelt es sich um ein Verriegelungssystem, welches für den Einsatz im Flugzeuginnenraum konzipiert wurde, nach antagonistischer Bauweise. Es dienen also zwei entgegengesetzte Formgedächtniselemente zur Stellweggenerierung und gegenseitigen Rückstellung. Das Zustandsüberwachungssystem, beruhend auf dem internen Sensoreffekt von FGL, erkennt neben dem Aktorzustand (Funktionsfähigkeit, Schädigung, Blockade) auch Einflüsse der Umgebungstemperatur auf den Aktivierungsvorgang der Formgedächtniselemente. So bildet es die Basis in Form eines qualitativen Kriteriums zur Identifikation der Umgebungstemperatur, auf der ein Regelungssystem zum Ausgleich von Temperatureinflüssen auf die Aktoraktivierung ohne externe Sensorik aufbauen kann.

Abstract

In the following work, an actuator based on shape memory alloys (SMA) is extended by a condition monitoring system to broaden the actuator's application field. The considered actuator is a locking device designed for an application in aircraft interiors. It uses an antagonistic design, which means that two opposing shape memory elements generate the stroke and reset one another. The condition monitoring system, based on the internal sensor effect of SMA, detects not only the actuator status (functionality, damage or blockage) but also the influence of the ambient temperature on the activation process of the shape memory elements. It thus forms the basis for a control system to compensate temperature influences on actuator activation without external sensors by identifying the ambient temperature in terms of a qualitative criteria.

1 Einleitung

Unkonventionelle Aktorkonzepte können völlig neue Anwendungsfelder eröffnen oder bereits bestehende, bewährte Aktorsysteme ersetzen und einen entsprechend höheren Nutzen generieren. Aktorsysteme auf der Basis von Formgedächtnislegierungen (FGL) bieten verschiedene, entscheidende Vorteile und damit genug Potential für vielfältige Anwendungen. Obwohl sich FG-basierte Aktoren besonders durch ihre kompakte Bauweise und ihr geringes Gewicht für den Einsatz im Flugzeugbau eignen, haben sich in dieser Branche erst wenige Anwendungen entsprechender Systeme etablieren können. Ein Grund dafür ist die Temperaturabhängigkeit dieser Aktorsysteme, da sie durch Erwärmung ausgelöst werden und von der Umgebungstemperatur beeinflusst werden.

Um FG-Aktoren, trotz dieser Einschränkung, für mehr Anwendungsbereiche – nicht nur im Flugzeugbau – nutzbar zu machen, soll im Rahmen dieser Arbeit die Basis geschaffen werden, um den Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Aktivierung zu erkennen und ein entspre-

chendes Regelsystem zum Ausgleich dieser Einflüsse entwickeln zu können. Dazu wurde exemplarisch mit einem FG-Aktor gearbeitet, der als Verriegelungssystem für den Einsatz im Flugzeuginnenraum konzipiert wurde.

2 Formgedächtnislegierungen

FGL gehören zu den Funktionswerkstoffen oder „Smart Materials“. Sie zeichnen sich dadurch aus, sich trotz einer starken Verformung wieder an eine eingeprägte Form „erinnern“ zu können [1]. Diese Rückverformung wird durch die Erwärmung über eine bestimmte Umwandlungstemperatur, die von der Legierungszusammensetzung abhängt, ausgelöst [2].

Dieser Effekt basiert auf der reversiblen, diffusionslosen Phasentransformation zwischen einer Tieftemperaturphase (Martensit) und einer Hochtemperaturphase (Austenit) (siehe **Bild 1**) [3]. Das Material kann im Martensit stark verformt werden. Wird es über die Umwandlungstemperatur A_s erhitzt, beginnt die Umwandlung in Austenit und es nimmt wieder seine ursprüngliche Form ein. Über der Temperatur A_f liegt das Material in reinem Austenit vor.

Nach dem Abkühlen unter M_f , kann die martensitische Legierung wieder verformt und erneut aktiviert werden. Diese Phasenumwandlung ist hysteresebehaftet. [1,4]

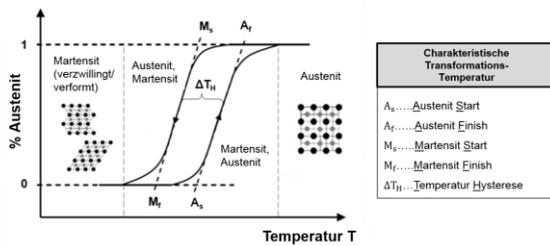


Bild 1 Phasenumwandlung von FGL [5]

Bei der Rückumwandlung in den Martensit treten hohe Kräfte auf, die in der Aktorik genutzt werden. Ein Draht, der sich bei Aktivierung zusammenzieht und durch eine mechanische Last gedehnt wird, ist die einfachste Form eines FG-Aktors. [6,7] Die Aktivierung von FG-basierten Aktoren wird hauptsächlich durch Joulsche Erwärmung realisiert, da Bestromung meistens die effizienteste und am einfachsten zu kontrollierende Erwärmung gewährleistet. [8]

FGL bieten verschiedene Vorteile, durch die sie sich besonders für den Einsatz in der Aktorik eignen: Hohes Kraftpotential (3MJ/m^3), hohe Energiedichte (10W/g), geringer Energiebedarf, geringes Gewicht, kurze Aktivierungszeit und die Möglichkeit, einfache und kompakte Systeme zu realisieren. [2,9,10]. Besonders das Leichtbaupotential ist für die Verwendung im Flugzeugbau interessant. Außerdem bietet dieses „Smart Material“ den integrierten Sensoreffekt (oder „Self-Sensing“). Dieser Effekt erlaubt Rückschlüsse auf Aktorzustand und -position durch während der elektrischen Aktivierung aufgenommene Daten, wie z.B. den Materialwiderstand [2,4,11]. Er bildet die Basis für das in dieser Arbeit beschriebene Zustandsüberwachungssystem.

3 Formgedächtnisbasierte Verriegelungseinheit

Bei dem hier betrachteten FG-Aktor handelt es sich um ein Verriegelungssystem, welches für den Einsatz im Flugzeuginnenraum, primär für das Verschließen von Lavatory- und anderen Kabinentüren, konzipiert wurde. **Bild 2** zeigt das CAD-Modell der Verriegelungseinheit. Der Aktor hat zwei Endpositionen, die stromlos durch einen Rastmechanismus [A] gehalten werden. Dieser Mechanismus sichert die Aktorposition vor allem gegen umweltbedingte Vibrationen. Der Stellweg wird durch zwei entgegengesetzte FG-Drähte [B] generiert, die gleichzeitig den jeweils anderen Draht wieder zurückstellen. Dieses Prinzip wird als Agonist-Antagonist-Prinzip bezeichnet [8]. Wenn ein Draht bestromt wird, zieht er sich zusammen und zieht das Stellelement in die eine Endposition. Wird dann der andere Draht aktiviert, bewegt er das Stellelement in die andere Endposition und zieht gleichzeitig den abgekühlten ersten Draht wieder in die Länge. So kann auf ein externes Rückstellelement (wie z.B. eine Feder) verzichtet werden.

Die FG-Drähte werden mit Crimpverbindungen in Blöcken aus Kunststoff mit hoher Wärmeformbeständigkeit [C] befestigt, da das Gehäuse aus PLA besteht und so der Temperatur der aktivierten Drähte und den zugehörigen Zugkräften nicht standhalten würde. Ein Einsatz aus dem gleichen Material [D] im Stellelement [E] isoliert gleichzeitig die FG-Elemente voneinander. Das Stellelement wird in zwei Gleitlagern [F] geführt.

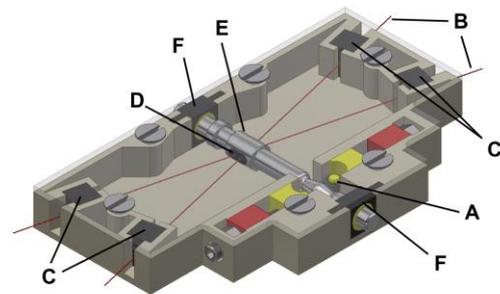


Bild 2 FG-basiertes Verriegelungssystem für den Flugzeuginnenraum

Für das System wird der vortrainierte FG-Aktordraht SmartFlex90 der Firma SAES Getters mit einem Durchmesser von 0,3mm eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine NiTi-Legierung mit einer Umwandlungstemperatur von 90°C . Er erzeugt eine Längenänderung von 3,5% und damit einen gesamten Stellweg zwischen den beiden Endpositionen von 7mm.

3.1 Temperaturabhängigkeit der Aktivierung

Das Aktorverhalten und die benötigte Aktivierungsenergie sind abhängig von der Umgebungstemperatur. Die Temperaturanforderungen an ein elektromechanisches System, das im Flugzeuginnenraum (einem temperatur- und luftdruckgeregelten Bereich in einem Verkehrsflugzeug) eingesetzt wird, lassen sich in Überlebenstemperatur (Survival Temperature) und Funktionstemperatur (Operating Temperature) unterteilen [12]. Die entsprechenden Grenzwerte sind in **Tabelle 1** aufgeführt:

Tabelle 1 Temperaturanforderungen an elektromechanische Systeme im Flugzeuginnenraum [12]

	<i>Survival Temperature</i>	<i>Operating Temperature</i>	<i>Temperature Change</i>
Minimum:	-55°C	-20°C	2°C/min
Maximum:	70°C	55°C	

Das Aushalten der Überlebenstemperatur in einer der beiden Endpositionen stellt für den Aktor kein Problem dar, da die maximale Temperaturanforderung unterhalb der Aktivierungstemperatur der FG-Drähte liegt. Wie vorangegangene Untersuchungen am Aktor [13] gezeigt haben, ist die Funktionsfähigkeit mit einer herkömmlichen zeitbasierten Aktivierung jedoch nicht über den gesamten Bereich der Funktionstemperatur gegeben. Zeitbasiert bedeutet in diesem Fall, dass immer mit den gleichen Parametern

(Spannung, Stromstärke und Bestromungszeit) bestromt wird. Für Langzeitversuche werden die Aktordrähte wechselseitig nach einer festgelegten Abkühlzeit erneut aktiviert.

Bei hoher Umgebungstemperatur (ab ca. 40°C) reduziert sich der absolute Stellweg eines Aktivierungszyklus (siehe **Bild 3**), da die minimale Abkühlzeit, die bei Raumtemperatur ermittelt wurde, nicht mehr ausreicht, damit sich die FG-Drähte vollständig in den Martensit zurückwandeln. Bei 70°C liegt der Stellweg nur noch bei 4mm. Grundsätzlich ist damit die Funktionalität des Aktors noch gegeben. Ob dieser eingeschränkte Stellweg noch eine zuverlässige Verriegelung gewährleistet, muss abhängig von der jeweiligen Anwendung entschieden werden und es müssen entsprechende Sicherheiten einkalkuliert werden. Ob durch die dauerhafte teilweise Aktivierung und die dadurch entstehenden Kräfte durch die antagonistische Anordnung eine Schädigung der Drähte und damit Auswirkungen auf die Lebensdauer einhergehen, kann durch weitere Langzeittests untersucht werden.

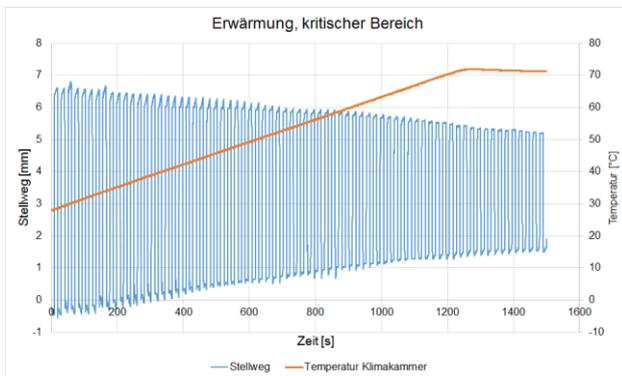


Bild 3 Aktorstellweg bei Erwärmung im kritischen Bereich [13]

Bei niedriger Umgebungstemperatur ist die Funktionalität ab ca. 3,5°C nicht mehr gegeben. **Bild 4** zeigt deutlich, dass der Aktordraht bei dieser Temperatur nicht mehr vollständig aktiviert wird und so die erzeugte Kraft nicht ausreicht, um den Rastmechanismus zu überwinden. Die Verriegelung ist also bei niedriger Umgebungstemperatur nicht mehr funktionsfähig.

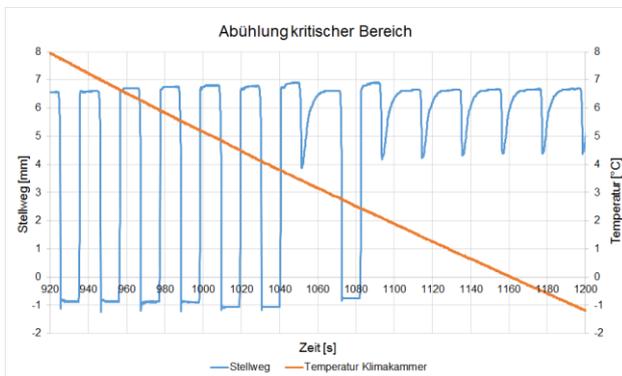


Bild 4 Aktorstellweg bei Abkühlung im kritischen Bereich [13]

Um eine Phasenwandlung und damit die Auslösung des Aktorsystems auch bei niedrigen Umgebungstemperaturen

zu gewährleisten, muss die Aktivierungsenergie erhöht werden. Das kann durch veränderte Bestromungsparameter, wie eine längere Bestromungszeit, erreicht werden. Um die Einflüsse der Umgebungstemperatur auf die Aktoraktivierung zu erkennen, wird ein Zustandsüberwachungssystem benötigt. Auf Basis eines solchen Systems kann in späteren Weiterentwicklungen ein Regelsystem entstehen, das die Bestromungsparameter entsprechend der Umgebungstemperatur anpasst und so eine zuverlässige Phasenumwandlung und die Funktionalität des Verriegelungssystems sicherstellt.

4 Zustandsüberwachungssystem

FG-Aktoren verfügen über einen integrierten Sensoreffekt, auch Self-Sensing genannt [2], der auch zur Zustandsüberwachung der Aktoren im Betrieb genutzt werden kann. Self-Sensing basiert hauptsächlich auf der zeitlichen Änderung des elektrischen Widerstands während der Aktivierung bedingt durch die Gefügeumwandlung [14]. Da angestrebt wird, den Aktorzustand mittels Mikrocontroller zu überwachen, wird der zeitliche Verlauf der Stromstärke bei konstanter Spannung während der Aktivierung überwacht. Dies spart den Schritt zur Berechnung des Widerstandes aus der Stromstärke auf dem Mikrocontroller.

In früheren Arbeiten konnte dieser Effekt dazu genutzt werden, die Blockade von Aktordrähten zu detektieren [15]. Der qualitative Verlauf der Stromstärke eines bei der Aktivierung gehemmten FG-Drahts unterscheidet sich stark von dem eines ungehemmten Drahts, sodass ein einfacher Prüfalgorithmus zur Blockadedetektion abgeleitet werden konnte. Aus Lebensdaueruntersuchungen von FG-Drähten ist bekannt, dass der elektrische Widerstand quantitativ pro Zyklus über die Lebensdauer ansteigt (und somit die Stromstärke sinkt). Dieses Phänomen kann grundsätzlich zu einer Lebensdauerprognose des Aktordrahts verwendet werden. Eine konkrete und zuverlässige Umsetzung steht noch aus.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Blockadedetektion für den betrachteten Aktor zu verifizieren und zusätzlich ein qualitatives Merkmal zu identifizieren, welches den Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Aktoraktivierung anzeigt.

4.1 Versuchsaufbau

Um das Verhalten des Verriegelungssystems bei wechselnder Umgebungstemperatur und im Betrieb zu untersuchen, wurde folgender Versuchsaufbau genutzt (siehe **Bild 5**):

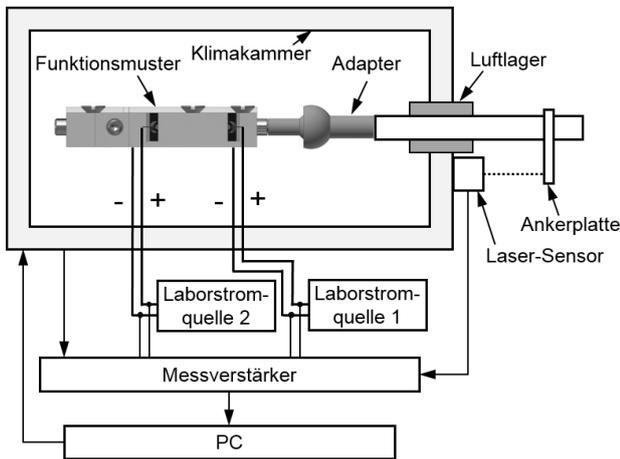


Bild 5 Versuchsaufbau für Umgebungstemperaturversuche

Der FG-Aktor wurde horizontal in eine Klimakammer des Typs SU-221 von ESPEC CORP montiert und durch zwei programmierbare Netzteile vom Typ TOE 8805 von TOELLNER Electronic Instrumente GmbH zeitbasiert wechselseitig aktiviert. Die Bestromungsparameter sind in **Tabelle 2** aufgelistet. Am Stellelement des Aktors ist mittels eines Kugelgelenks und eines Adapters ein Verlängerungsstück befestigt. Dieses Verlängerungsstück wird durch ein Luftlager in der Wand der Klimakammer geführt. Außerhalb der Kammer ist daran eine Ankerplatte befestigt, die dem Lasersensor OADM 12U6460/S35A der Firma Baumer Holding AG als Reflektor zur Stellwegmessung dient. Zusätzlich werden von den Leitungen zur Bestromung die Aktivierungsparameter (jeweils Spannung und Stromstärke) abgenommen. Ein Messverstärker vom Modell MX840A von Hottinger Baldwin Messtechnik und ein Messrechner verarbeiten die Messsignale mit einer Messfrequenz von 50Hz.

Tabelle 2 Bestromungsparameter des Verriegelungsaktors

Spannung	Stromstärke	Bestromungsdauer	Abkühlzeit bis Positionswechsel
2,2V	1,6A	1,3sec	9sec

Der Temperaturverlauf, bei dem der Betrieb des Aktors getestet wird, ist in **Bild 6** dargestellt. Die Messung beginnt bei Raumtemperatur (23°C). Dann wird die Temperatur auf -20°C (das Minimum der verwendeten Klimakammer) abgesenkt und dort für 30min gehalten. Daraufhin wird die Temperatur bis zur maximalen Überlebens-temperatur von 70°C erhöht und dort ebenfalls für 30min gehalten. Zuletzt wird die Temperatur wieder kontrolliert auf Raumtemperatur abgesenkt.

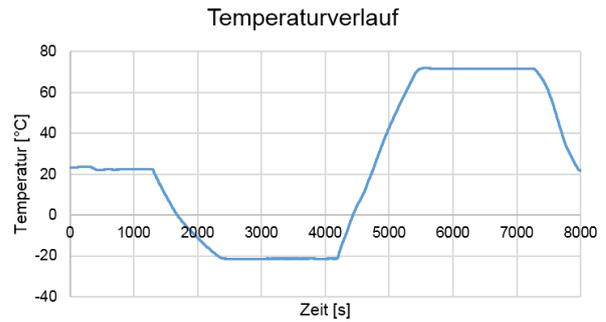


Bild 6 Verlauf der Umgebungstemperatur bei Aktorbetrieb

Während des gesamten Temperaturverlaufs wird der Aktor zeitbasiert wechselseitig aktiviert. Dabei werden die Temperatur der Klimakammer, der Aktorstellweg und für jeden Aktordraht jeweils die anliegende Spannung und Stromstärke gemessen.

4.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Umgebungstemperaturversuche vorgestellt. Es soll ein Prüfkriterium im zeitlichen Verlauf der Stromstärke für einen Aktivierungszyklus ermittelt werden, anhand dessen die Zustände „Unterkühlung“ und „Überhitzung“ abgeleitet werden können. Bei diesem Test wird „Unterkühlung“ bei der minimalen Umgebungstemperatur von -22°C und eine Überhitzung bei der maximalen Überlebens-temperatur von 70°C angenommen. Bei beiden Extremtemperaturen ist die Funktionalität des Aktors eingeschränkt (siehe **Kapitel 3.1**). In beiden Fällen müssen die Bestromungsparameter angepasst werden um bei unterkühlen die Funktion des Aktors sicherzustellen bzw. bei Überhitzung einer Schädigung des FG-Materials vorzubeugen.

In den folgenden Diagrammen (siehe **Bild 7-9**) sind jeweils zwei Aktivierungszyklen pro Aktordraht zusammen mit dem resultierenden Stellweg des Stellelements bei verschiedenen konstanten Umgebungstemperaturen dargestellt.

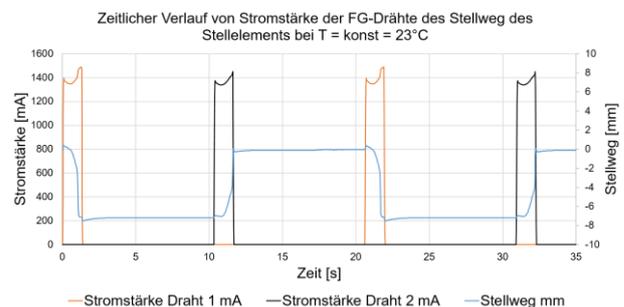


Bild 7 Stellweg und Stromstärke bei 23°C Umgebungstemperatur

Der Verlauf der Stromstärke bei einer Umgebungstemperatur von 23°C ähnelt teils einem parabelförmigen Verlauf (Draht 2) wobei der Hochpunkt der Kurve der letzte Wert der Bestromung ist. Bei Draht 1 sinkt der Wert nach Erreichen des Hochpunkts wieder leicht ab, sodass hier keine Parabel vorliegt, sondern eher ein kubischer Verlauf. Das

Stellglied schaltet zuverlässig und generiert die konstruktiv ausgelegten 7 mm Stellweg.

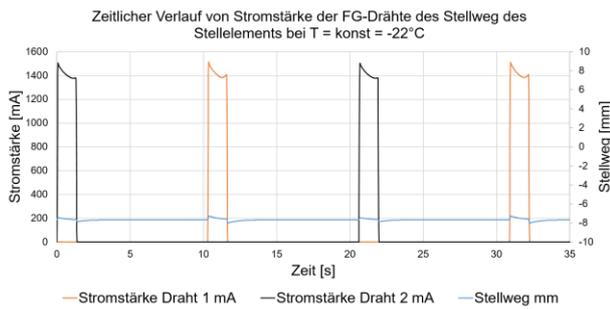


Bild 8 Stellweg und Stromstärke bei -22°C Umgebungstemperatur

Bei einer Umgebungstemperatur von -22°C ähnelt der Verlauf bei beiden Aktordrähten einer Parabel mit einem Hochpunkt zu Beginn der Bestromung. Dieser Verlauf entspricht dem Verlauf bei einer Blockade des Aktordrahts in vorangegangenen Untersuchungen [15]. Das Stellelement kann den Rastmechanismus nicht überwinden, was mechanisch einer Blockade gleichkommt. Der Aktor generiert nur ca. 1 mm Stellweg und verbleibt dabei in seiner Endposition.

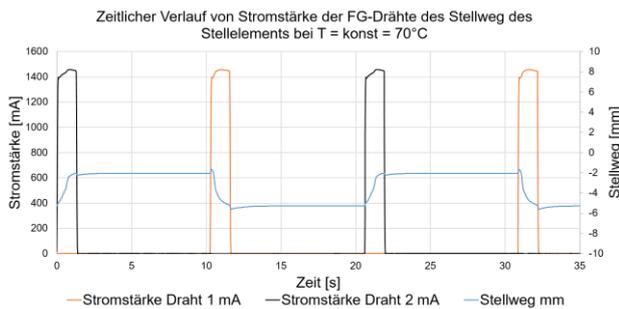


Bild 9 Stellweg und Stromstärke bei 70°C Umgebungstemperatur

Der Verlauf bei einer Umgebungstemperatur von 70°C ist nicht klar definierbar. Nach einem Anstieg der Stromstärke erreicht der Wert eine Hochpunktlage um abschließend leicht abzufallen. Der Stellweg reduziert sich auf 4 mm.

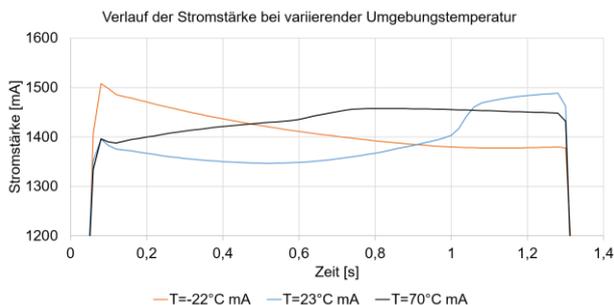


Bild 10 Stromstärken der Aktoraktivierung bei verschiedenen Umgebungstemperaturen

In Abbildung 10 sind beispielhaft die Bestromungsprofile bei allen drei betrachteten Umgebungstemperaturen in einem Diagramm dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich

das Maximum des Bestromungsverlaufs pro Aktivierungszyklus bei den untersuchten Temperaturprofilen verschiebt.

4.3 Auswertung

Ziel der Überwachung der Stromstärke ist das Erkennen des Einflusses der Umgebungstemperatur auf die Aktoraktivierung um den zuverlässigen Betrieb des Aktors bei variierender Umgebungstemperatur sicherstellen zu können. Bei Detektion einer Unterkühlung bzw. Überhitzung sollen die Bestromungsparameter über ein entsprechendes Regelsystem angepasst werden, um die Funktionalität des Aktors sicherzustellen. Das vielversprechendste Kriterium, um diese Einflüsse zu erkennen, ist hier die Lage des Hochpunkts des Stromstärkeverlaufs während der Bestromung. Die hier betrachteten verschiedenen Umgebungstemperaturen können durch die Bestimmung der Hochpunktposition in der Aktivierungskurve eindeutig identifiziert werden.

Dieses Verfahren beinhaltet jedoch einige Schwächen: Der Zustand „Unterkühlung“ ist nicht vom Zustand „Blockade“ zu unterscheiden. Würde die Aktivierungsenergie im Fall einer Blockade aus unbekanntem Grund jedoch erhöht werden, besteht die Gefahr einer Schädigung des FG-Drahtes und somit der Einschränkung oder Zerstörung der Aktorfunktionalität. Es muss also eine kontinuierliche Überwachung der Umgebungstemperatureinflüsse durch das Zustandsüberwachungssystem stattfinden, um identifizieren zu können, ob die Blockade durch ein Absinken der Umgebungstemperatur oder andere Faktoren hervorgerufen wird.

Ein weiterer kritischer Aspekt ist, dass bisher zwar große Temperaturunterschiede identifiziert werden können, allerdings liegt die Grenztemperatur, ab der die Aktorfunktion eingeschränkt ist, bei 3,5°C. Es muss also untersucht werden, ob der genaue Punkt, ab dem eine Unterkühlung vorliegt und die Aktivierungsenergie nicht mehr ausreicht, damit der Aktordraht den Rastmechanismus überwindet, identifiziert und vielleicht sogar vorausgesagt werden kann. Es gilt herauszufinden, ob durch eine Trendkontrolle nach ISERMANN [16] ein Absinken bzw. Ansteigen der Umgebungstemperatur zuverlässig überwacht werden kann. Idealerweise ist die Genauigkeit hier so hoch, dass rechtzeitig vor einem Ausfall des Stellelements die Bestromungsparameter angepasst werden können um die Aktorfunktionalität sicherzustellen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der Arbeit war es, eine sensorlose Temperaturüberwachung in eine Beispielanwendung für einen FG-Aktor im Flugzeuginnenraum zu integrieren. Tests mit dem Aktor haben gezeigt, dass bei sehr hoher oder niedriger Umgebungstemperatur die Funktion des Aktors mit einer einfachen zeitbasierten Steuerung nicht immer gewährleistet werden kann. Durch eine Überwachung des zeitlichen Verlaufs der Stromstärke während der Aktoraktivierung können große Temperaturdifferenzen bestimmt werden. In Zukunft sind die identifizierbaren Temperaturdifferenzen

durch weitere Versuchsreihen mit gezielter Überwachung der Aktivierungskurve zu minimieren.

Das hier vorgestellte Kriterium verhindert nicht den Ausfall des Verriegelungssystems. Es liefert aber die Basis, um ein Regelungssystem zu entwickeln, das bei einer Verschiebung der Hochpunktlage der Aktivierungskurve rechtzeitig die Bestromungsparameter anpassen kann, um einen Aktorausfall, der durch zu starke Veränderungen der Umgebungstemperatur bedingt ist, zu verhindern.

Gleichzeitig können ergänzende Langzeitversuche weitere Daten zur Lebensdauerprognose durch Self-Sensing liefern, um in Zukunft diesen Aspekt der Zustandüberwachung ebenfalls integrieren zu können.

6 Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen des Projektes FLAAI (Förderkennzeichen: 20E1307).

7 Literatur

- [1] Otsuka, K.; Wayman, C. M.: *Shape Memory Materials*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [2] Lagoudas, D. C.: *Shape memory alloys. Modeling and engineering applications*. Boston, MA: Springer, 2008.
- [3] Hornbogen, E. *Legierungen mit Formgedächtnis*. Opladen: Westdeutscher Verlag, 1991.
- [4] Gumpel, P.; Gläser, S.; Jost, N., et al.(Hrsg.): *Formgedächtnislegierungen. Einsatzmöglichkeiten in Maschinenbau, Medizintechnik und Aktuatorik*. Renningen: expert-Verlag, 2004.
- [5] Lygin, K.: *Eine Methodik zur Entwicklung von umgebungsaktivierten FG-Aktoren mit geringer thermischer Hysterese am Beispiel der Heizungs- und Klimatechnik*. Bochum, Ruhr-University Bochum, 2014.
- [6] Stork, H.: *Aufbau, Modellierung und Regelung von Formgedächtnis-Aktorsystemen*. Düsseldorf: VDI Verlag, 1997.
- [7] Kristen, M.: *Untersuchung zur elektrischen Ansteuerung von Formgedächtnis-Antrieben in der Handhabungstechnik*. Braunschweig, Mechanik-Zentrum der Technischen Universität Braunschweig, 1994.
- [8] Kohl, M.: *Entwicklung von Mikroaktoren aus Formgedächtnislegierungen*. Institut für Mikrostrukturtechnik, Universität Karlsruhe (TH). Karlsruhe, 2002.
- [9] Jani, J.M., Leary, M., Subic, A., Gibson, M.A.: *A review of shape memory alloy research, applications and opportunities*. Materials and Design 56, 2014.
- [10] Treppmann, D.: *Thermomechanische Behandlung von NiTi*. Fortschrittsbericht VDI Serie 5 Nr. 462, 1997.
- [11] Schiedeck, F., Mojrzisch, S.: *Improvement of SMA Actuator performance using self sensing*. Proceedings of the International Conference on New Actuators, ACTUATOR2008-P104, 2008.
- [12] RTCA, Inc. : *RTCA DO-160: Environmental Conditions and Test Procedures for Air-borne Equipment*, 1997.
- [13] Otibar, D.; Weirich, A.; Kortenjann, M.; Kuhlenkötter, B.: *A Preliminary Investigation of Temperature Dependency of a Shape Memory Actuator with Time-Based Control in Aircraft Interiors*. IOP Conference Series: Material Science and Engineering 216 (2017), 012009.
- [14] Rathmann, C., Fleczonek, B. and Kreimeier, D: *An investigation using self-sensing to estimate the lifetime of shape memory actuators*. In: Proceedings of the SICASE 2015 Seoul International Conference on Applied Science, 2015.
- [15] Rathmann, C.; Theren, B.; Fleczonek, B.; Kuhlenkötter, B.: *Experimental Validation of Condition Monitoring for Electrically Activated Shape Memory Alloys for an Unlocking Device*. IOP Conference Series: Material Science and Engineering 216 (2017), 0120
- [16] Isermann, R. (Hrsg.): *Überwachung und Fehlerdiagnose. Moderne Methoden und ihre Anwendungen bei technischen Systemen*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994.