

## Titel

# Zuverlässigkeitsanalyse und -prognose zur Qualitätssicherung von Formgedächtnisaktoren

IGF-Nr.: 19907 N

---

## Forschungseinrichtungen

Institut für Werkzeugforschung und Werkstoffe (IFW),  
Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid  
Ansprechpartner:

M. Sc. Yannic Zwinscher  
02191 / 5921-153  
[zwinscher@fgw.de](mailto:zwinscher@fgw.de)

Bergische Universität Wuppertal  
Lehrstuhl für Zuverlässigkeit und Risikoanalytik (LZR),  
Gaußstraße 20, 42119 Wuppertal  
Ansprechpartner:

M. Sc. Philipp Heß  
0202 / 439-5091  
[hess@uni-wuppertal.de](mailto:hess@uni-wuppertal.de)



## Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 19907 N der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. – FGW, Papenberger Straße 49, 42859 Remscheid wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



---

## Ausgangssituation

In der jüngeren Vergangenheit wurden vielfältige Aktorkonzepte auf Basis des Formgedächtniseffekts (FG-Aktoren) erarbeitet und vorgestellt (Langbein, et al., 2013). So zeigten weltweit vor allem die Entwicklungen größerer Unternehmen, dass FG-Aktoren, die bis vor wenigen Jahren noch als Nischenprodukte galten, für industrietaugliche Lösungen in hohen Stückzahlen produziert werden können. Diese Konzepte konnten die grundsätzliche Funktionsumsetzung sicherstellen und unterstrichen die Machbarkeit intelligenter Aktorlösungen. Eine Recherche der verwendeten Prüf- und Messvorrichtungen, die innerhalb von Forschungsprojekten zum Zwecke der Analyse von FG-Aktoren entwickelt wurden, zeigten viele gleiche Funktionen bei Einsatz unterschiedlicher Messmethoden im Detail (Oelschläger, 2004), (Wagner, 2005), (Schiedeck, 2009), (Lagoudas, 2008). So wurden unterschiedliche Sensorsysteme zur Erfassung der Stellwege von FG-Aktoren und Verbindungstechniken für FG-Drähte verwendet. Wie in (Czechowicz, 2012) gezeigt, beeinflusst schon allein die Wahl der Verbindungstechnik von drahtförmigen FG-Aktoren im Versuchsstand maßgeblich das dynamische, aber auch das mechanische, Systemverhalten und die Systemermüdung von FG-Drähten. Die Beispiele zeigten auch, dass die individuell entworfenen und zweckorientierten Versuchsstände keine einheitlichen und vergleichbaren Prüfbedingungen schafften. Damit konnte in der wissenschaftlichen sowie in der industriellen Prüftechnik kein direkter Vergleich unterschiedlicher Messreihen herangezogen werden. Hieraus ergab sich für die kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) ein Nachteil an Entwicklungsmöglichkeiten für smarte Aktoren auf Basis von Formgedächtnislegierungen. Wie in (Czechowicz, et al., 2011) und (Böhm, 2011) aufgeführt, ist der Entwicklungsprozess für FG-Aktoren aufgrund der unüberschaubaren Wirkungszusammenhänge komplex für KMU. Neben einem standardisierten Prüfstand fehlten ebenso die dazugehörigen und notwendigen einheitlichen Prüfmethode. Diese sollten unter Verwendung geeigneter Lastkollektive (z.B. Stellweg des Drahtes, zu bewegendes Gewichtskraft oder Umgebungstemperatur) zu reproduzierbaren Prüfergebnissen in Bezug auf das Ermüdungsverhalten, die Lebensdauer, die Degradation und die Zuverlässigkeit der FG-Aktoren bzw. FG-Aktorsystemen führen.

Abbildung 1 zeigt die Ausgangsgrößen und sekundären Funktionen eines FG-Aktorsystems in Abhängigkeit der Eingangsgrößen, konstruktiver Systemparameter und Störgrößen im Betrieb. Durch die Einflussgrößen wird die Systemermüdung der Formgedächtnisaktoren maßgeblich beeinflusst. Diese steht wiederum im starken Zusammenhang mit der Lebensdauer. Um die Lebensdauer bestimmen und nachweisen zu können, müssen die Einflussgrößen mittels eines standardisierten Prüfstandes und Prüfplans abgebildet werden. Ziel des Vorhabens war es deshalb, praxistaugliche Prüfmethode in einem standardisierten Prüfverfahren zu etablieren.

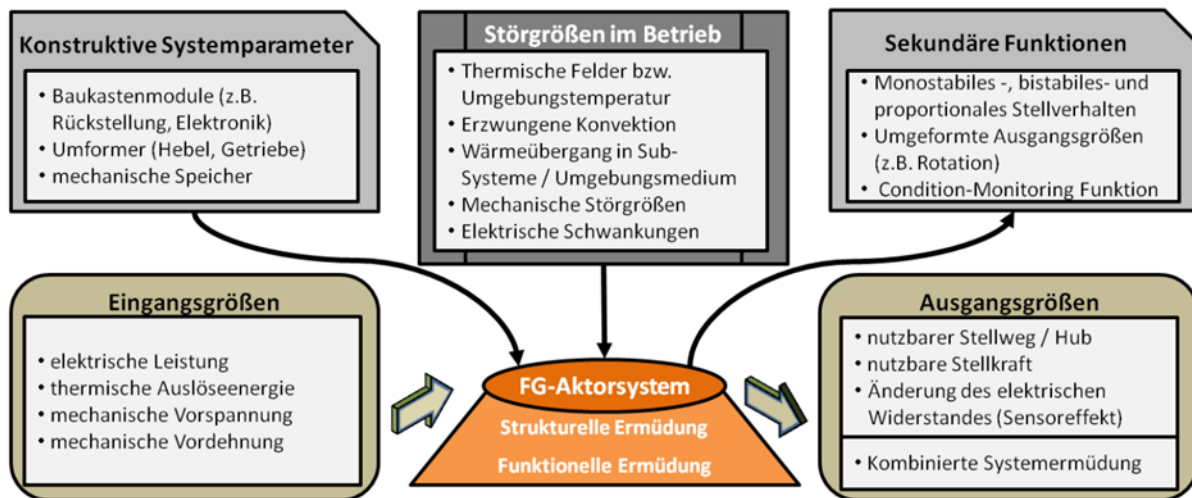


Abbildung 1: Prinzipielle Darstellung der Einflussfaktoren auf die Funktion eines FG-Aktorsystems

Für die Entwicklung von Prüfständen und Prüfmethode n diente die Automobilindustrie mit der multivariaten Produkt- und Prozessoptimierung bezüglich der Lebensdauer und Zuverlässigkeit als ideales Beispiel, da dort solche Methoden über Jahrzehnte hinweg etabliert wurden. Es gibt in der Automobilindustrie eine Vielzahl von Methoden, Algorithmen, Richtlinien und Normen (VDA, 2004), die zuverlässige Aussagen im Hinblick auf die Lebensdauer, die Zuverlässigkeit und die Beherrschbarkeit von Produkten und Prozessen ermöglichen. Für KMU ist der Aufwand einer Lebensdauerprüfung im Entwicklungsprozess aufgrund der geringen Abschalt dynamik sehr hoch und kann z.B. bei 250.000 Zyklen mehrere Monate in Anspruch nehmen. Ein Test von Elektromagneten gleicher Lebensdauer und Leistungsklasse würde allerdings nur drei bis fünf Tage in Anspruch nehmen. In Verbindung mit mehreren Iterationsstufen ergeben die Lebensdauer tests einen nicht zu bewältigenden Entwicklungsaufwand, der die Einsatzpotentiale und technischen Vorteile der Technologie erheblich reduziert. Die fehlenden standardisierten und einheitlichen Prüfstände und Prüfmethode n zur Bewertung von FG-Aktoren sind ein maßgeblicher Grund, warum der breite industrielle Einsatz von FG-Aktorkomponenten trotz erfolgreicher Produktentwicklungen oftmals scheitert.

Aktoren basierend auf Formgedächtnislegierungen bieten gegenüber anderen Aktorprinzipien einige Vorteile. Dazu zählen eine hohe Energiedichte, eine geräuschlose Arbeitsweise sowie eine Unempfindlichkeit gegen Magnetfelder und Chemikalien. Trotz der genannten Vorteile wurde der Einsatz dieser Technologie häufig durch folgende Umstände nicht umgesetzt:

- Ohne Informationen über die Auswirkungen verschiedener Einflussgrößen auf die Formgedächtnisaktoren, lässt sich kaum abschätzen, wie diese die Lebensdauer der Aktoren beeinflussen.
- Ohne ein standardisiertes Erprobungsprogramm (Versuchsstand, Prüfplan, Prüfablauf, Auswertung der Versuchsdaten etc.), lassen sich keine vergleichbaren und verlässlichen Aussagen über das Verhalten der Aktoren und deren Lebensdauer treffen.

- Ein im Vergleich zu konventioneller Technologie besteht ein deutlich erhöhter Zeitaufwand beim Erproben/Testing.

Diese Unsicherheiten bzw. Nachteile erschwerten potenziellen Nutzern den Einstieg in die Entwicklung mit Formgedächtnismaterialien.

---

### **Forschungsziel**

Unkonventionelle Aktorlösungen auf FGL-Basis erreichen nur dann eine ausreichende Akzeptanz, wenn vereinheitlichte Testanforderungen an die Produkte entstehen/entwickelt werden, um verlässliche sowie reproduzierbare Aussagen über das Verhalten der Aktoren und deren Lebensdauer treffen zu können. Ziel des Projektes war die Schaffung von normierten, einheitlichen Testbedingungen durch die Entwicklung einer standardisierten Prüfmethode inklusive einer an die technischen Prüfbedingungen für FG-Aktorsysteme angepassten Messausrüstung. Die Erarbeitung standardisierter Funktions-, Handhabungs-, Sicherheits- und Lebensdauertests für FG-Aktorsysteme diente als Grundlage für die Konkretisierung industrietauglicher, universeller Versuchsstände. In diesem Zusammenspiel sollten die optimierten Arbeitsschritte der Prüfverfahren geplant und strukturiert werden, um eine spätere Vergleichbarkeit der Ergebnisse möglich zu machen. Nach der Entwicklung sollte der Prüfstand unter der Verwendung statistischer Prozesskontrollmethoden auf Basis einer empirischen Studie validiert und anschließend daran Musterszenarien aus dem projektbegleitenden Ausschuss analysiert werden. Parallel dazu war eine Untersuchung einer Zuverlässigkeitsprognose vorgesehen.

---

### **Vorgehensweise und Forschungsergebnisse**

Zu Beginn wurde eine Recherche der verbreiteten Einsatzgebiete der FG-Aktorik durchgeführt, auf deren Basis eine Übersicht der verschiedenen Anforderungsklassen in der FG-Aktorik erstellt wurde. Aus den Erkenntnissen konnten definierte Wertebereiche für die Anforderungen an den standardisierten Versuchsstand abgeleitet werden. Dabei wurden folgende Randbedingungen herausgearbeitet:

- Minimaler Drahtdurchmesser: 0,2 mm
- Maximaler Drahtdurchmesser: 0,5 mm
- Minimale Drahtlänge: 50 mm
- Maximale Drahtlänge: 250 mm
- Maximale Dehnung: 8 %
- Minimale Umgebungstemperatur: RT
- Maximale Umgebungstemperatur: 70 °C
- Anzahl parallelaufender Kanäle: 3

Um aus den Versuchen möglichst viele Informationen für die Versuchsauswertung zu generieren, wurde zudem festgelegt, dass folgende Größen während des Versuchs aufgezeichnet werden:

- Stellweg des Drahtes in mm
- Geleistete Kraft des Drahtes in N
- Spannung in V
- Strom in A
- Umgebungstemperatur in °C
- Zykluszahl

Zudem konnten anhand von Daten aus Vorversuchen des IFW sowie dem Datensatz eines Dauerversuchs eines Mitglieds des projektbegleitenden Ausschusses begonnen werden das Prognosetool zu konzipieren und das Einlesen der Daten zu automatisieren. Die vorhandenen Datensätze bildeten dabei die Grundlage für die Ausgabeform der Daten des zu entwickelnden Versuchsstandes.

Anhand der Analyse der Daten eines Versuchsstandes für Vorversuche wurden Störeinflüsse ermittelt, um sicherzustellen, dass die Prüfmethode des zu entwickelnden Versuchsstandes nicht auf die zu prüfenden Proben einwirken konnte. Dabei wurde deutlich, dass selbst kleine Abweichungen der Umgebungstemperatur das Verhalten der Formgedächtnisaktoren beeinflussen. So zeigt die folgende Abbildung den Zusammenhang zwischen Stellwegen der Aktoren und der Umgebungstemperaturen aus Wetterdaten. Daraus ergab sich die Notwendigkeit einer Einhausung des Versuchsstandes sowie einer klimatisierten Prüfumgebung.

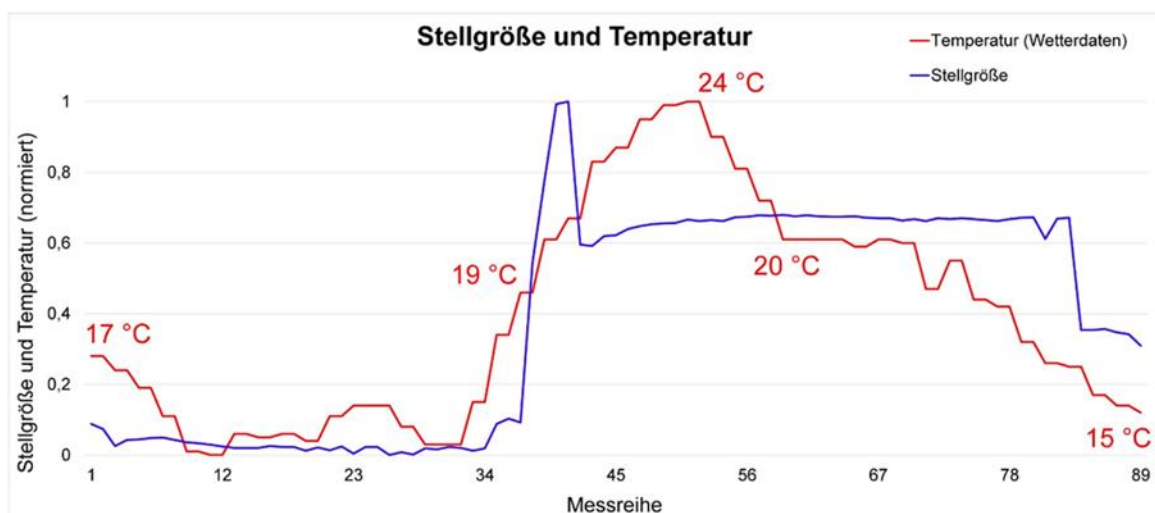


Abbildung 2: Normierte Darstellung von Stellgröße und Temperatur über Messreihen [n]

Die ermittelten Störeinflüsse wurden während der Konzipierung und Konstruktion des Versuchsstandes berücksichtigt. Innerhalb des Projektes wurden zwei Versuchsstände neu konstruiert und aufgebaut. Zum einen wurde ein Versuchsstand

für Messungen bei Raumtemperatur aufgebaut, welcher über kontaktlose Lasersensoren zur Wegmessung verfügt. Diese Sensoren arbeiten sehr genau und beeinflussen den Versuch nicht durch Reibungskräfte. Ein zweiter Versuchsstand mit potentiometrischen Wegsensoren wurde für die Verwendung innerhalb einer Klimakammer aufgebaut. Die Wegsensoren können bei niedrigeren/höheren Umgebungstemperaturen arbeiten und die Elektronik befindet sich außerhalb der klimatisierten Umgebung. Damit der Versuchsstand in der Kammer aufgebaut werden kann, wurde dieser in horizontaler Form aufgebaut. Die Last auf den Draht wird dabei durch Federn ausgeübt, wodurch sich ein weiterer Lastfall realisieren lässt.

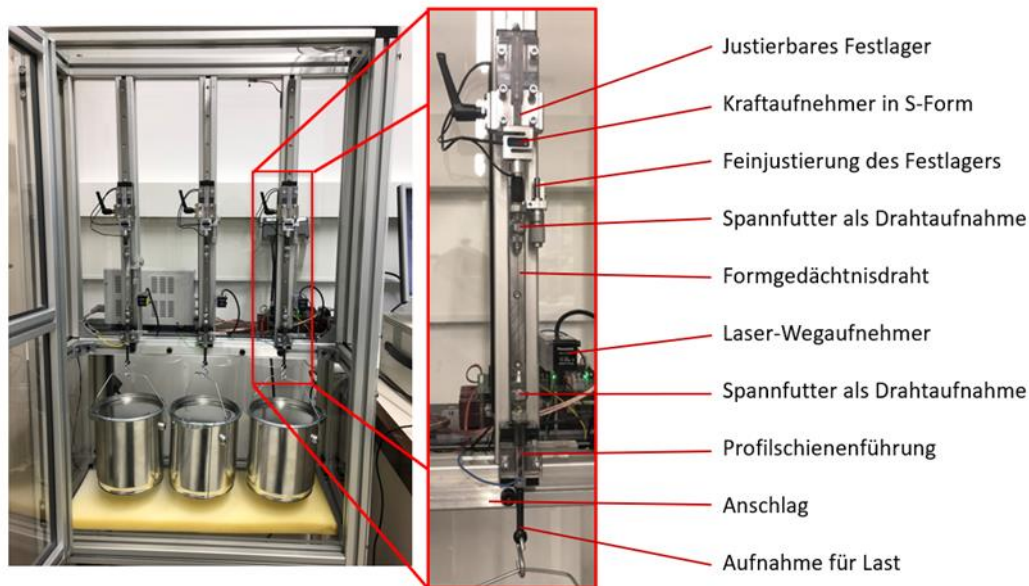


Abbildung 3: vertikaler Versuchsstand für die Prüfung bei Raumtemperatur

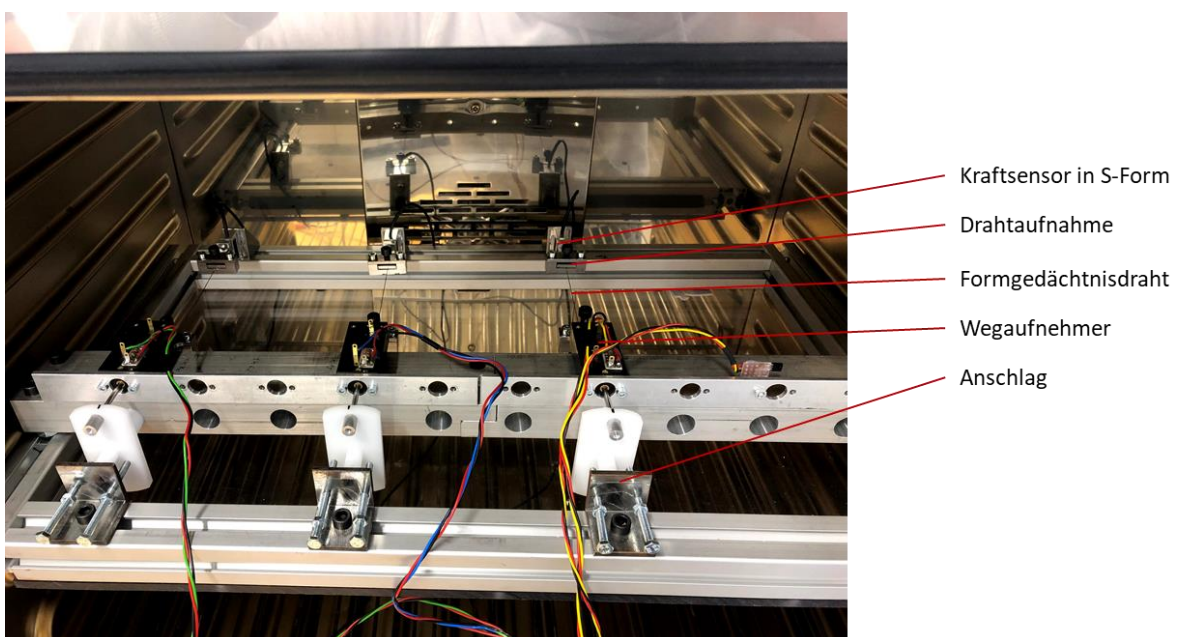


Abbildung 4: horizontaler Versuchsstand für die Prüfung in einer klimatisierten Umgebung

Anhand der durchgeführten Versuchsreihen wurden anschließend Prognosemodelle entwickelt. So lässt sich das Verhalten eines zu prüfenden Aktors mit dem Verhalten der im Projekt durchgeführten Versuchsreihen vergleichen und somit über die Steigung der Abnahme des Stellweges zu Beginn des Versuchs eine Aussage darüber treffen, nach wie vielen Zyklen die Probe versagen wird. Innerhalb des Projektes wurden Versuchsreihen mit variierenden Lasten sowie variierenden Stromstärken zur Aktivierung durchgeführt, welche als Basis zum Abgleich dienen.

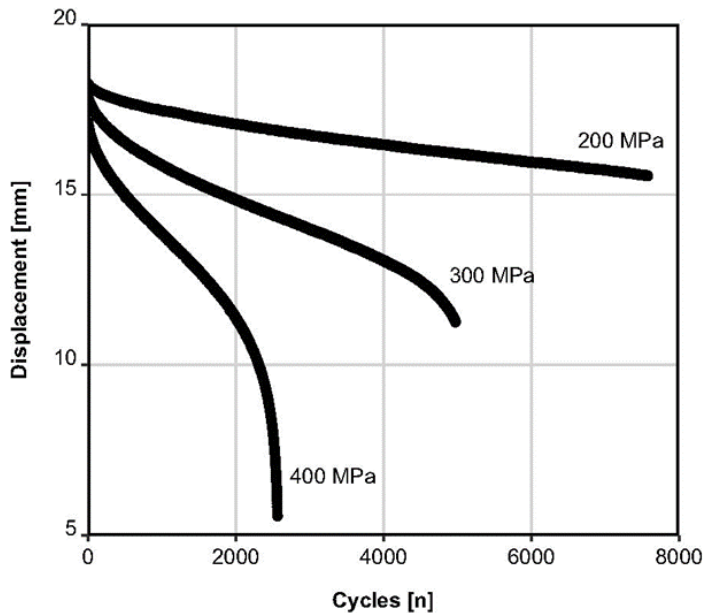


Abbildung 5: Ermüdungsversuch bis zum Ausfall exemplarisch gezeigt für drei unterschiedliche Lasten

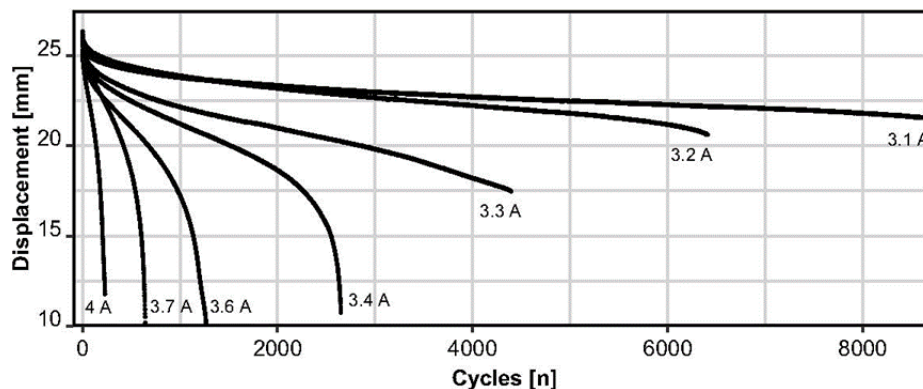


Abbildung 6: Ermüdungsversuch bis zum Ausfall exemplarisch gezeigt für sieben unterschiedliche Stromstärken

Die folgende Übersicht beschreibt die während des Vorhabens erreichten Forschungsergebnisse:

- 1) Aus der Recherche und der anschließenden Definition der Anforderungsklassen konnten Anforderungen an den Versuchsstand formuliert werden. Zudem lag nach der Analyse verschiedener Datenstrukturen aus vorhandenen Versuchsreihen eine Ausgangsbasis für die Programmierung aller bevorstehenden Auswertungen der Ermüdungsversuche vor. Dadurch wurde die Grundlage für Auswertestrategien geschaffen.
- 2) Darauf aufbauend wurde ein Auswertetool zu entwickelt, welches im Verlauf des Projekts stetig angepasst und erweitert werden konnte. Ein automatisiertes Laden/Einlesen von Prüfstandsdaten, erste Berechnungen sowie Plots wurden realisiert. Es wurden zudem erste Erkenntnisse für die Spezifizierung von kritischen Prüfkomponenten erzielt. Außerdem wurden resultierend aus den Recherchen Schnittmengen zur Definition der Wertebereiche des zu konstruierenden Prüfstands ermittelt.
- 3) Erste umfangreichere Auswertungen und Analysen wurden durchgeführt. Durch die Untersuchungen wurde deutlich, dass bei der Konzipierung und Entwicklung des neuen Prüfstands zwingend eine thermische Entkopplung von der Umgebungstemperatur (Housing), im Idealfall jedoch eine Klimatisierung des Prüfbereichs, erforderlich war.
- 4) Durch Vorversuche wurden kritische Parameter bzw. Störeinflüsse auf den Versuchsablauf identifiziert und im Anschluss eliminiert. Maßgeblich waren dies schwankende Temperaturen im Bereich des Prüfstands sowie Probleme bei der zuverlässigen Kontaktierung der Proben.
- 5) Es wurden zwei universell einsetzbare Prüfstände für Ermüdungsversuche von FG-Drähten entwickelt. Ein Prüfstand ist in vertikaler Ausführung konzipiert und für Versuche im klimatisierten Labor (20 °C) vorgesehen. Der zweite Prüfstand ist in horizontaler Bauweise konzipiert und für den Einsatz in einer Klimakammer (-20 °C bis 100 °C) geeignet. Beide Prüfstände prüfen bis zu drei Aktoren (Drähte) parallel. Prüfelektronik als auch Messtechnik zeichnen Messwerte in hoher Auflösung auf (bis zu sechs Werte pro Sekunde), sodass jeder Betätigungszyklus detailliert aufgezeichnet wird.
- 6) Es wurden mit fünf unterschiedlichen Prüfständen fünf Versuchsreihen mit wiederum unterschiedlicher Anzahl an Messreihen erzeugt. Dabei wurden zudem jeweils unterschiedliche Lasten bzw. Lastszenarios eingesetzt. Insgesamt wurden 6 Versuchsreihen durchgeführt. Die Versuchsreihen beinhalten insgesamt 32 Versuche mit jeweils unterschiedlich vielen Aktoren. Insgesamt wurden 138 Aktoren innerhalb des Projekts getestet und ausgewertet. Im Rahmen einer Publikation wurden zu den 130 getesteten Aktoren noch 10 Aktoren (mittels Monte Carlo Simulation) simuliert.
- 7) Es wurde ein Auswertetool (unter anderem auch Ansätze für verschiedene Prognosealgorithmen) mit der Programmiersprache R zur Auswertung der erzeugten Messdaten der getesteten Drähte entwickelt. Das Tool liest Prüfstandsdaten automatisiert ein und wertet die Daten im Anschluss (ebenfalls automatisiert) aus.



Die Analyse der Daten verfolgt dabei zwei Ziele. Zum einen werden Anhaltspunkte für ein bevorstehendes Versagen der Drähte ermittelt. Zum anderen wurde ein Ansatz zur Prognose der (verbleibenden) Lebensdauer entwickelt. Das Auswertetool wurde während der Laufzeit des Projekts kontinuierlich weiterentwickelt und auf alle erzeugten Versuchsreihen angewandt. Es konnte beispielhaft die Entwicklung eines anwendbaren Prognosemodells gezeigt werden.

Folgende Publikationen wurden innerhalb der Projektlaufzeit veröffentlicht. Detaillierte Informationen zu den Prognosemodellen können dort entnommen werden.

Heß, P. und Bracke, S.: Zuverlässigkeitstechnik bei Formgedächtnisaktoren: Entwicklung von Prüfstandstechnik und Erprobungsprogramm, in Gesellschaft für Qualitätswissenschaft e.V. (Ed.), Potenziale Künstlicher Intelligenz für die Qualitätswissenschaft. Heidelberg: Springer-Verlag GmbH.

Heß P. und Bracke S. Reliability and degradation analysis of smart material actuators [Konferenz] // Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference (ESREL 2019) / Hrsg. Beer M. und Zio E. (Eds.). - Hannover: Research Publishing Services, Singapore, 2019. - 22-26 September.

Heß P. und Bracke S. Smart material actuators as a contributor for IoT-based smart applications and systems: Analyzing prototype and process measurement data of shape memory actuators for reliability and risk prognosis [Artikel] // Journal of Advances Mechanical Design, Systems and Manufacturing 14, JAMDSM0026. - 2020.

Heß P. und Bracke S. An approach to predict the lifetime of shape memory actuators based on Accelerated Testing measurements [Konferenz] // The 30th European Safety and Reliability Conference ESREL and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference RAMS -paper accepted-. - Venice, Italy : [s.n.], 2020a. - 1-6 November.

Heß P. und Bracke S. Mass customization potential of shape memory technology: Degradation analysis of smart material alloy actuators [Konferenz] // CIRPe 2020 - 8th CIRP Global Web Conference - Flexible Mass Customization -paper submitted-. - 2020b.

---

## **Zusammenfassung**

Die Formgedächtnisaktoren bieten aufgrund zahlreicher Vorteile die Möglichkeit konventionelle Antriebe ersetzen zu können. Dazu zählen neben dem geringen notwendigen Bauraum, dem geringen Gewicht und der hohen Biokompatibilität die hohe Energiedichte. Neben den wenigen Massenanwendungen von pseudoplastischen Formgedächtniselementen in der Medizintechnik, werden Formgedächtnisaktoren zurzeit nur selten in Großserien eingesetzt, was hauptsächlich an den aufwendigen Prüf- und damit verbundenen Entwicklungszeiten liegt. Besonders hinderlich dabei ist im Entwicklungsprozess die Frage nach der ZQF – IGF 19907 N

Lebensdauer, die heute noch nicht zuverlässig eingeschätzt werden kann, da es bisher keine umgesetzten Prognosewerkzeuge für FG-Aktoren gibt. Durch die geringe Aktordynamik von FG-Aktoren kann ein Test mehrere Monate in Anspruch nehmen. Damit verlängert sich die Entwicklungszeit rein durch die iterative Optimierung der Lebensdauer durch mehrere Iterationen maßgeblich. Zudem sind die Versuche zwischen Unternehmen kaum vergleichbar, da die Versuchstechnik noch nicht genormt ist.

Um die Entwicklungszeit von Formgedächtnisaktoren maßgeblich zu verkürzen, wurde während dieses Vorhabens ein standardisierter Versuchsstand sowie Prognoseverfahren zur Abschätzung der Lebensdauer von FG-Aktoren entwickelt.

Gerade mittelständischen Unternehmen ohne tiefreichendes Vorwissen im Bereich der Formgedächtnistechnik kann mit den gemachten Ergebnissen die Entwicklung von zuverlässigen FG-Aktoren ermöglicht werden.

---

Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichtes bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, [www.fgw.de](http://www.fgw.de), angefordert werden.

Weitere Informationen erhalten Sie bei Herrn M. Sc. Yannic Zwinscher unter 02191 5921-153.

## Literatur

**Langbein S. und Czechowicz A.** Konstruktionspraxis Formgedächtnistechnik [Buch]. - [s.l.] : Springer Vieweg, 2013. - ISBN 3834819573.

**Oelschläger L** Numerische Modellierung des Aktivierungsverhaltens von Formgedächtnisaktoren am Beispiel eines Schrittantriebes // Dissertation. - Ruhr-Universität Bochum : Lehrstuhl für Produktionssysteme, 2004. - ISBN 3-8322-2671-0.

**Wagner M.F.-X.** Ein Beitrag zur strukturellen und funktionalen Ermüdung von Drähten und Federn aus NiTi-Formgedächtnislegierungen // Dissertation. - Ruhr-Universität Bochum : Lehrstuhl für Werkstoffwissenschaften, 2005. - ISBN 3-86515-030-6.

**Schiedeck F.** Entwicklung eines Modells für Formgedächtnisaktoren im geregelten dynamischen Betrieb // Dissertation. - Leibniz Universität Hannover : Institut für Dynamik und Schwingungen, 2009. - ISBN 978-3-941416-23-9.

**Lagoudas D.** Shape Memory Alloys - Modelling and Engineering Applications [Buch]. - [s.l.] : Springer Fachbuch, 2008. - ISBN 0-387-476-84-9.

**Czechowicz A.** Adaptive und adaptronische Optimierungen von Formgedächtnisaktorsysteme für Anwendungen im Automobil // Dissertation. - Ruhr-Universität Bochum : Shaker Verlag, 2012. - ISBN 3844014330.

**Czechowicz A. und Langbein S.** Die Form denkt mit [Artikel] // Fachzeitschrift Mechatronik F+M. - [s.l.] : Hanser Verlag, 11-12 2011. - S. 20-23.

**Böhm A.** = Newsletter / Hrsg. FGL-Netzwerk. - 2011. - Bd. 2. Ausgabe.

**VDA** Verband der Automobilindustrie: Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten. - 2004. - Bd. Band 3 Teil 2. - ISSN 0943-9412.