

Titel

Qualifizierung und Anwendung von Formgedächtnisaktoren auf Kupfer-Aluminium-Basis für Anwendungen in der Automobil- und Luftfahrtindustrie

IGF-Nr.: 20551 N

Forschungseinrichtungen

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

M. Sc. Moritz Langhoff
02191 / 5921-154
langhoff@fgw.de

Jade Hochschule
Fachbereich Ingenieurwissenschaften Fachgebiet Mechatronik,
Friedrich-Paffrath-Straße 101, 26389 Wilhelmshaven
Ansprechpartner:

Prof. Dr. Karsten Oehlert
04421 / 985-2156
karsten.oehlert@jade-hs.de



Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 20551 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 Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



Ausgangssituation

Formgedächtnislegierungen (FGL) als multifunktionale Werkstoffe kommen bereits in zahlreichen Anwendungen zum Einsatz. Häufige aktorische Anwendungen sind in der Ventiltechnik und der Entriegelung zu finden [1]. Auf Grund der hohen Energiedichte und der damit verbundenen möglichen Massereduktion, sind FGL besonders für die Luftfahrt- und Automobilindustrie von Interesse. Für die meisten Anwendungen werden ausschließlich binäre NiTi Legierungen verwendet, da diese hohe Effektbeiträge und eine gute Zyklenbeständigkeit aufweisen [2]. Ein häufiger Nachteil dieser Legierung, welche die Einsatzgrenzen beschränken, ist der limitierte Temperatureinsatzbereich, welcher bis etwa 90 °C reicht. Für Anwendungen, die höhere Temperatureinsatzbedingungen haben, kann binäres NiTi nicht mehr eingesetzt werden, da entweder die Rückstellzeiten, die von der Temperaturdifferenz zur Umgebung abhängen, zu hoch für die Anwendung sind oder der Einsatz gar nicht mehr möglich ist, da das Element nur teilweise zurückgestellt werden kann. Zusätzlich sind die Rohstoffpreise dieser Legierung mit den Elementen Titan und Nickel relativ hoch. Eine Alternative zu NiTi sind kupferbasierte FGL. Diese zeichnen sich durch einen erhöhten Temperatureinsatzbereich und günstigere Basiselemente wie Kupfer und Aluminium aus [3]. Somit wären diese Legierungen für den Einsatz in Heißräumen, wie dem Motorraum beim Automobil und turbinennahe Anwendungen in der Luftfahrt interessant. In Hinblick auf die zukünftige elektromotorische Fortbewegung, können Stellantriebe von einer höheren Stelldynamik profitieren. Der technische Einsatz von kupferbasierten FGL als Aktor-Element ist jedoch weitestgehend unerprobt und bildet für den technischen Einsatz große Hürden für Entwickler, da technische Daten für den aktorischen Einsatz mit besonderem Bezug auf die zu erwartende Lebensdauer kaum bekannt sind [4]. Des Weiteren unterscheidet sich die Konstruktion und der Einsatz der Legierung von binären NiTi Legierungen, was zu einer erhöhten Entwicklungszeit führt. Das Hemmnis zum Einsatz der Technologie kann durch besseres technisches Verständnis zum Material und gute Aufbereitung von Daten und Konstruktionswissen verringert werden.

Forschungsziel

Die Konstruktion, Erprobung und die technische Einordnung von Demonstratoren mit kupferbasierten FG-Aktoren aus dem Bereich der Luftfahrt- und der Automobilindustrie waren das zentrale Forschungsziel des Vorhabens. Dazu musste zunächst das Material auf seine Eigenschaften hin charakterisiert werden, um basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen geeignete Einsatzgebiete und damit passende Demonstratoren und Konstruktionsdesigns auswählen zu können. Ein weiteres Ziel des Vorhabens war die Zusammenstellung der Erkenntnisse in einen Technologieleitfaden, welcher von der Materialauswahl, den passenden Anwendungsgebieten bis zur Konstruktion einen umfassenden Überblick zum Einsatz von Cu-FGL in Aktorsystemen bietet. Durch eine wissenschaftliche Veröffentlichung auf der SMASIS 2022 wurden die gewonnenen Erkenntnisse zur Lebensdauer im aktorischen Einsatz dem Fachpublikum nahegebracht.

Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

Zu Beginn des Vorhabens wurden die üblichen Charakterisierungsverfahren für NiTi-FGL an die Temperatur und Lastanforderungen der kupferbasierten Materialien angepasst.

Auf Grund der deutlich höheren Phasenumwandlungstemperaturen (PUT) im Vergleich zu binären NiTi, können Temperierkammern, die für kontinuierliches Erwärmen und Kühlen der Proben im Bereich NiTi ausgelegt sind, nicht ohne weiteres verwendet werden. Unter Last können die PUT von Cu-FGL auf über 200 °C (A_f) ansteigen, bei NiTi werden PUT von ca. 120 °C (A_f) erreicht. Eine weitere Möglichkeit der Temperaturmessung an einer FG-Probe ist die Aufzeichnung mittels einer Infrarotkamera, welche für die Messung von Metallen bspw. eine Lackierung voraussetzt, um über den Messbereich einen konstanten Abstrahlkoeffizienten zu haben. Durch die hohen Dehnwerte und der hohen Temperatur mussten verschiedene Lackierungen auf ihre Temperatur- und Dehnungsbeständigkeit getestet werden. Ein Heizungslack mit hoher Temperaturbeständigkeit wurde auch für mehrere Dehnungszyklen als geeignet angesehen. Die entstandenen Risse im Lack waren kleiner als die Auflösung der Kamera und sollten somit die Messergebnisse nicht maßgeblich verfälschen.

Somit war die Grundlage für eine zyklische elektrische Aktivierung mit paralleler Temperatur, Dehnungs- und Kraftmessung gegeben. Durchgeführte Untersuchungen am Material:

1. Lebensdaueruntersuchung bei vier Laststufen und drei Erwärmungsmodi/Dehnstufen
2. Untersuchungen zur minimal notwendigen Rückstelllast
3. Untersuchungen zu alternativen Erwärmungsmethoden
4. Untersuchungen zum superelastischen Verhalten
5. Untersuchung zur Wärmebehandlung

Für die (Lebensdauer-)Untersuchungen wurden sowohl polykristalline als auch monokristalline CuAlNi Proben (Drähte $d = 0,5$ mm) verwendet. Dabei wurden die Proben mit einer definierten Last bei Umgebungstemperatur (20 °C) zyklisch über ein Gleichstromnetzteil erwärmt und der resultierende Stellweg dabei aufgezeichnet. Der Versuch wurde bis zum strukturellen Versagen der Probe durchgeführt.

Zusätzlich wurden die FG-Elemente unterschiedlich lange erwärmt (Erwärmungsmodi). Ein Probenset wurde mit 10 A für 5s erwärmt, was in einer vollständigen Aktivierung und einer deutlichen Überhitzung von über 60 K resultierte.

Die zwei weiteren Erwärmungsmodi wurden so gewählt, dass sie 6 % und 3 % Dehnung des FG-Elements entsprachen (bei einer maximal möglichen Dehnung von 7,5 %). In Abhängigkeit von der angehängenen Last und dem eingestellten Erwärmungsmodus wurden unterschiedliche Lebensdauern erreicht.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Änderungen der PUT in Abhängigkeit von der Zyklenzahl und der Last sowie die erreichte Lebensdauer in Abhängigkeit der Last und des Erwärmungsmodus.

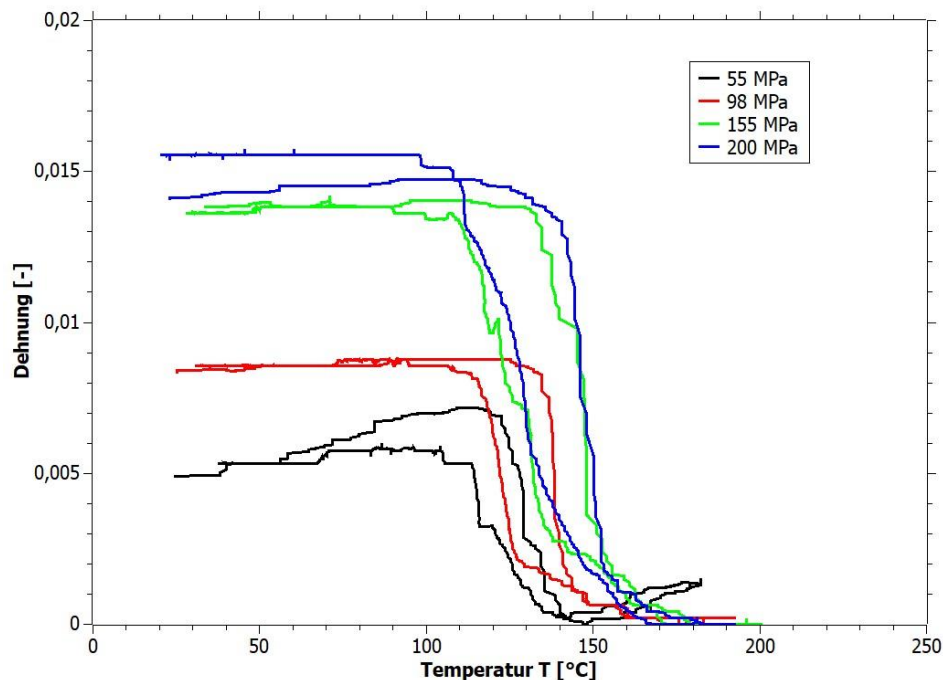


Abbildung 1: Dehnungs-Temperaturdiagramm einer polykristallinen CuAlNi Legierung bei unterschiedlicher Last

Die polykristalline Legierung (Abbildung 1) zeigt einen ansteigenden Stellweg mit steigender Last, welcher bei höchster Last von 200 MPa etwa 1,5 % beträgt und liegt damit deutlich unterhalb des realisierbaren Stellwegs von NiTi-FGL, bei denen eine Dehnung von etwa 5 % üblich ist. Der deutliche Anstieg der Dehnung bei 155 MPa deutet darauf hin, dass für die Rückstellung eine hohe Mindestlast zwischen 98 MPa und 155 MPa angenommen werden muss, um die maximal mögliche Dehnung zu erreichen. Das führt wiederum dazu, dass nur eine geringe Nutzlast, welche zusätzlich zur Rückstellkraft wirkt, angesetzt werden kann.

Das Lebensdauerschaubild in Abbildung 2 zeigt allgemein nur eine sehr geringe Lebensdauer über alle Lastfälle hinweg. Die Probe mit 55 MPa Last zeigt erwartungsgemäß mit knapp unter 600 Zyklen die höchste Lebensdauer auf. Bei 200 MPa waren nur 20 Zyklen bis zum Versagen möglich. Auf Grund der geringen thermomechanischen Belastbarkeit und der niedrigen Zyklenstabilität des polykristallinen Materials wurden alle weiteren Versuche nur noch mit monokristallinem CuAlNi durchgeführt, welches deutlich besser Werte zeigte.

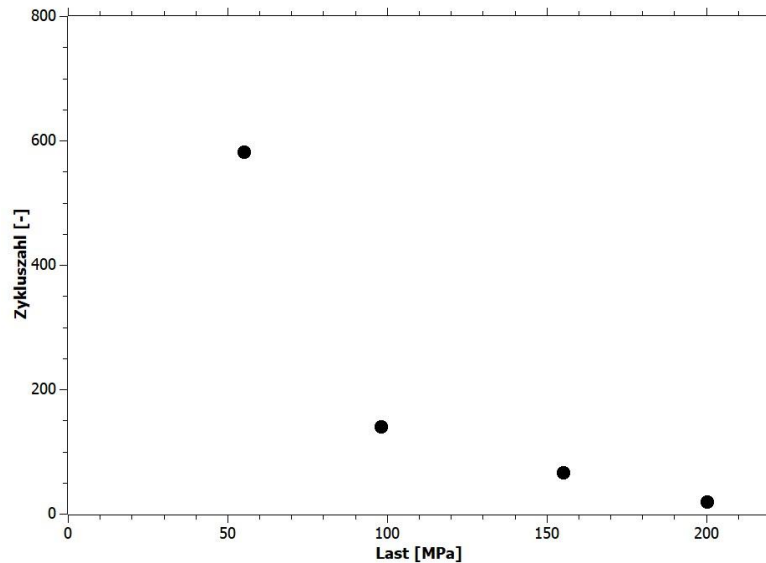


Abbildung 2: Lebensdauerschaubild der polykristallinen Cu-FGL in Abhängigkeit der Last

Die monokristalline CuAlNi Legierung wurde auf Grund der besseren technischen Eigenschaften umfangreicher getestet. Die Tests wurden wie zu vor beschrieben und wie in folgender Tabelle dargestellt, durchgeführt:

Zugspannung des Drahtes [MPa]	80 115 160 200
Erwärmungsmodus	<ol style="list-style-type: none"> 1. „Überhitzt“ (10 A, 5 s), Resultierende Dehnung: 7,5 % 2. Erwärmung bis knapp unter A_f (8 A), Resultierende Dehnung: 6 % 3. Erwärmung zu 50 % zwischen A_s und A_f (8 A), Resultierende Dehnung: 3 %

In Abbildung 3 ist das Dehnungs-Temperatur-Diagramm der monokristallinen Legierung im Erwärmungsmodus 1 dargestellt. Es zeigt sich, dass unabhängig von der Last eine maximale Dehnung von 7,5 % (maximale Dehnung wird ab 60 MPa erreicht) erreicht wird, die 160 MPa Probe zeigt einen Ausreißer, der vermutlich auf die Verarbeitung des Drahtes, bzw. den Ort der Probenentnahme (Randeffekte) zurückzuführen ist.

Es zeigen sich 2 Einflussfaktoren auf die PUT (Abbildung 4). Zum einen steigen die PUT mit ansteigender Last um 0,42 K/MPa an. Zum anderen beeinflusst die Aktivierungsstrategie des FG-Elements in Abhängigkeit von der Last die PUT. Bei „Überhitzung“ der Probe (Erwärmungsmodus 1) steigen die PUT besonders stark, was durch eine Lasterhöhung zusätzlich verstärkt wird. In Abbildung 5 ist das Lebensdauerschaubild der monokristallinen FG-Elemente dargestellt. Wie zu erwarten, resultiert die niedrigste Belastung und die geringste Dehnung zur höchsten Lebensdauer von etwa 12.500 Zyklen.

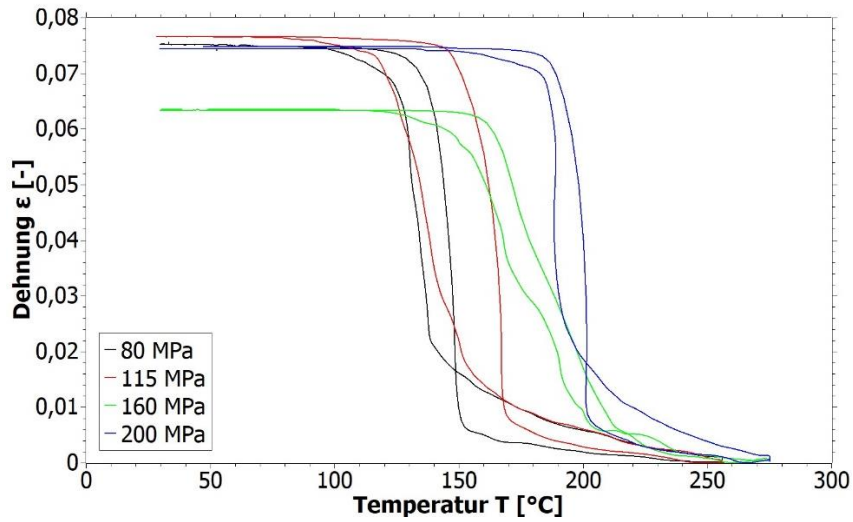


Abbildung 3: Dehnungs-Temperaturdiagramm der monokristallinen CuAlNi Legierung

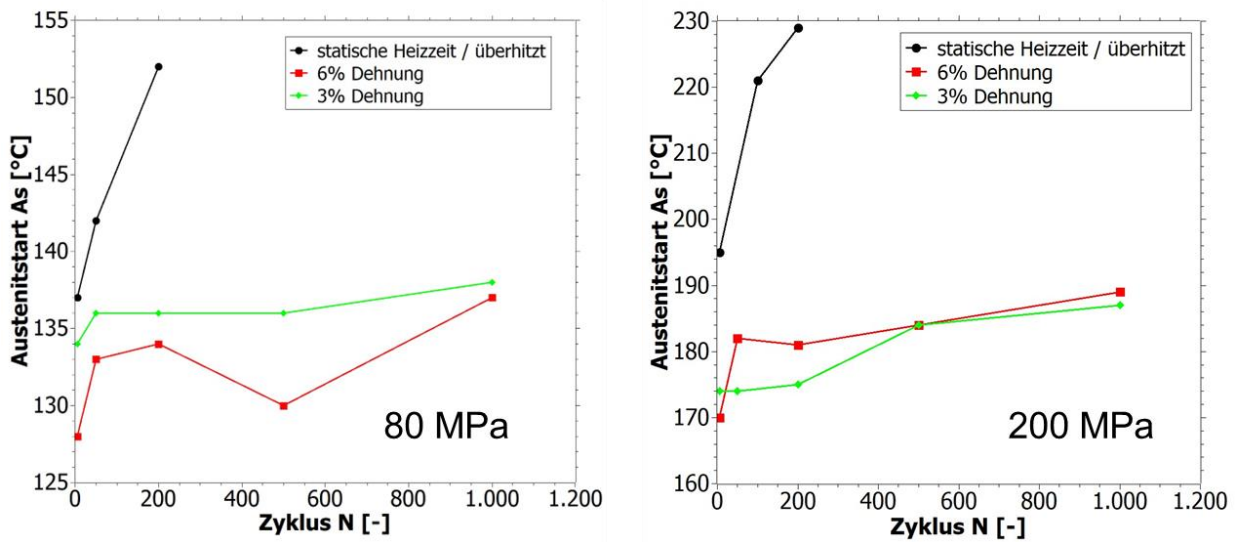


Abbildung 4: Vergleich der Änderung der PUT entsprechend der Erwärmungsmodi und von 80 MPa zu 200 MPa

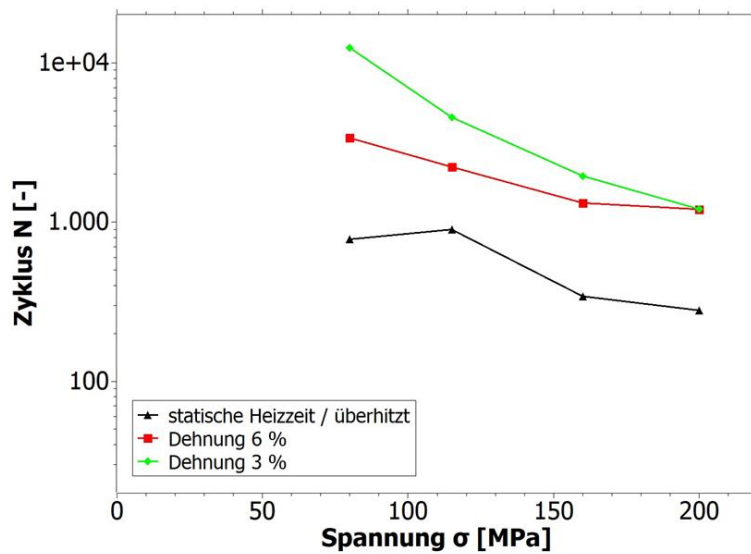


Abbildung 5: Lebensdauerschabild der monokristallinen CuAlNi Legierung

Ein großes Potential zur Verbesserung der Lebensdauer des monokristallinen FG-Elements wird in einer glatteren Oberfläche des Aktormaterials gesehen.

Basierend auf den Ergebnissen wurden technische Einsatzgebiete erarbeitet und bezogen auf die gemessenen Eigenschaften der Legierung bewertet. So konnten passende Einsatzgebiete für das Material gefunden und anschließend in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss Demonstratoren für eine Konstruktion ausgewählt werden. Die Wahl fiel im Automobilbereich auf eine Tankdeckelverriegelung und ein Kaltstartventil, im Luftfahrtbereich auf die Entriegelung einer Sauerstoffmaskenklappe und eine Absperrklappe, wie sie im Flugzeug beispielsweise für den Treibstoff verwendet wird. Bei den Konstruktionen wurde im Besonderen darauf geachtet, dass die gegebene Bauraumrestriktion, wenn möglich nicht überschritten wird und zugleich eine Gewichtsreduktion zu erreichen ist. Im ersten Schritt wurde der IST-Zustand eines Originalbauteils identifiziert. Dies umfasst die Masse des Gesamtsystems, bestehend aus den Teilmassen „Aktorsystem und mechanisches System“. Durch den digitalen Nachbau konnte zugleich auch das Volumen (Bauraum) des Originalsystems bestimmt werden und diente als Referenz für die darauffolgenden Konstruktionen der Demonstratoren. Zwei der umgesetzten Demonstratoren werden im Folgenden kurz vorgestellt:

Kaltstartventil (KSV)

Das Kaltstartventil befindet sich bei Verbrennungsmotoren im Motorraum und reguliert die zusätzliche Einspritzung von Treibstoff im kalten Zustand des Motors. Dabei wird das Ventil durch einen Elektromagneten geöffnet und geschlossen. Die Öffnungszeit ist dabei von der Außentemperatur abhängig und kann bei sehr kalten Temperaturen von -20 °C bis zu 30 s geöffnet sein. Mit der konstruierten Lösung unter Nutzung von monokristallinen CuAlNi-Drahtelementen ist eine Gewichtsreduktion von 12 % und eine Bauraumreduktion von 16 % möglich. Da generell neben der Verwendung von FG-Drahtelementen auch Federelemente möglich sind, wurde die Konstruktion auch als Federvariante umgesetzt. So ist sowohl im Bauraum als auch beim Gewicht weiteres Potential zur Reduktion vorhanden. Die Versuche konnten jedoch nur mit Drahtelementen durchgeführt werden, da zum Zeitpunkt des Forschungsvorhabens im Bereich der Cu-FGL aktorische Federn noch wenig erforscht sind und entsprechend nicht hergestellt werden.

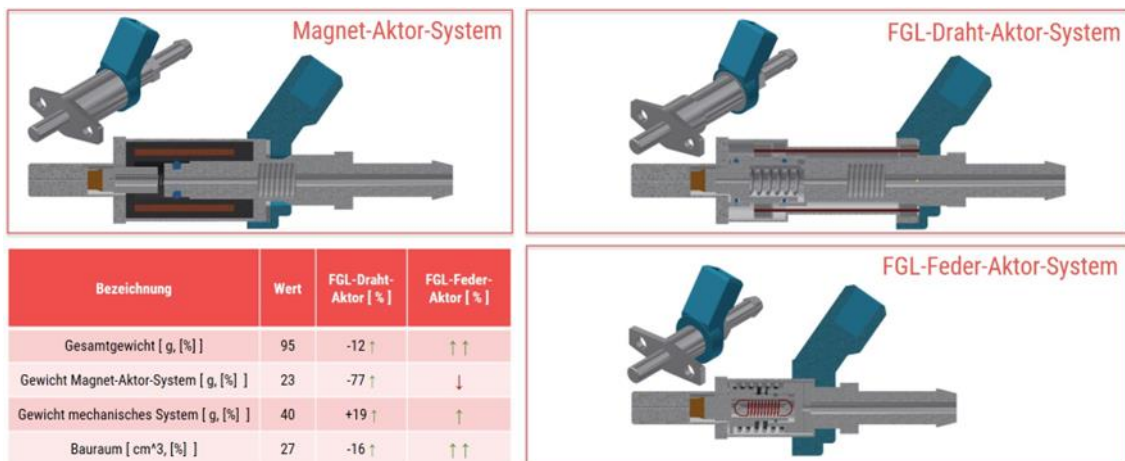


Abbildung 6: Konzepte Kaltstartventil

Das konstruierte Aktorsystem wurde gefertigt und sowohl mit NiTi-FGL als auch mit den untersuchten Kupfer-FGL bestückt, vermessen und mit dem üblichen Magnet-Aktor-System verglichen. Dabei wurden zum einen Zyklenbeständigkeit und Energiebedarf betrachtet. Für die bessere Datenaufnahme am Demonstrator wurde dieser vereinfacht und mit einem Ausschnitt versehen, um den Stellweg messen zu können. Es wurde darauf geachtet, die Funktion des Demonstrators dabei nicht zu beeinflussen (Abbildung 7).



Abbildung 7: KSV-Demonstrator eingebaut im Versuchsstand

Abbildung 8 zeigt die Änderung des Stellweges im zyklischen Verlauf. Der Demonstrator hat nach etwas über 3.000 Zyklen versagt. Verglichen mit den vorangegangenen Lebensdaueruntersuchungen, passt die erreichte Lebensdauer zu der im Demonstrator gegebenen Belastung des Drahtes. Im zeitlichen Verlauf ist der Stellweg des Aktors nach anlegen der Spannung über 3 verschiedene Zyklen (60, 1.000 und 3.000 Zyklen) aufgetragen. Es zeigt sich, dass der Aktor mit steigender Zykluszahl zunehmend später reagiert. Dies ist auf den Anstieg der PUT (wie auch Abbildung 4 entnommen werden kann) mit zunehmender Zykluszahl zurückzuführen. Aufgrund der sukzessiv höheren zu erreichenden Temperatur wird bei gleichbleibender Erwärmungsleistung mehr Zeit benötigt um die PUT zu überschreiten.

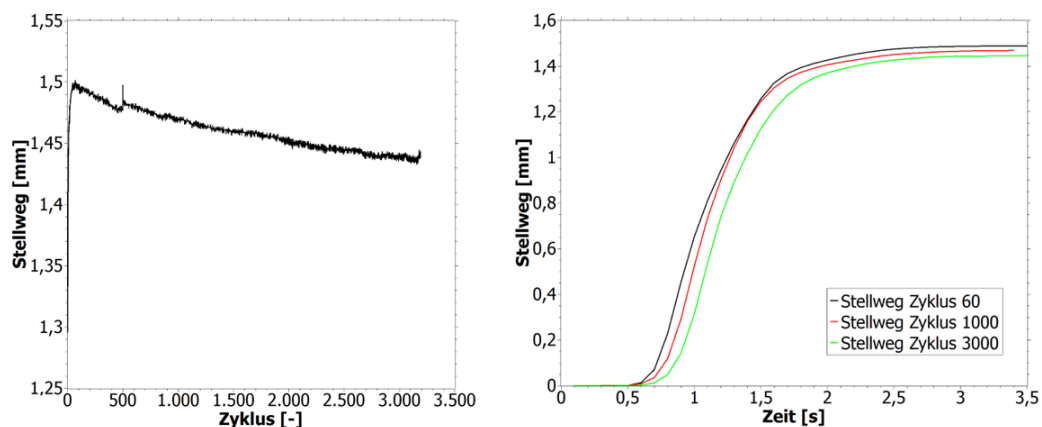


Abbildung 8: Stellwegänderung des KSV, betückt mit monokristallinem CuAlNi (links), Stellweg im zeitlichen Verlauf ausgewählter Zyklen

Im Benchmarkvergleich zeigt sich der aktuell noch große Nachteil der kupferbasierten FGL deutlich. Im Lebensdauervergleich mit NiTi FGL konnte nach 60.000 Zyklen noch kein Aktorversagen festgestellt werden. Auch eine Abnahme des Stellweges ist nicht festzustellen. Hingegen schafft der Demonstrator umgesetzt mit NiTi-Elementen im vorgegebenen Bauraum nicht den geforderten Stellweg, da die monokristalline Legierung in etwa 7,5 % Dehnung, die NiTi-FGL 5% Dehnung zulässt. Im Vergleich dazu ist davon auszugehen, dass das Originalbauteil mit Elektromagnet mit hoher Wahrscheinlichkeit mehrere 100.000 Zyklen erreichen wird.

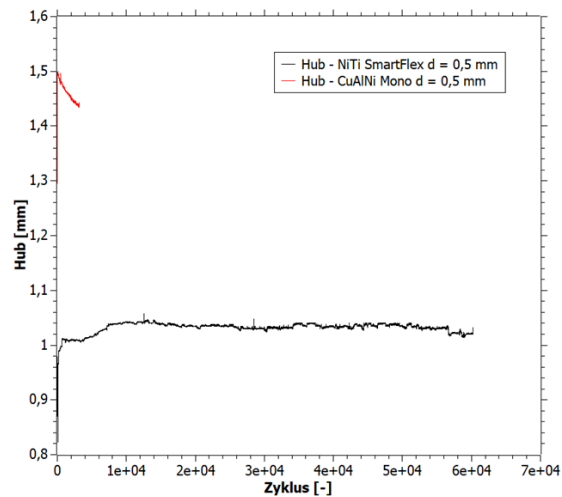


Abbildung 9: Vergleich des KSV bestückt mit CuAlNi monokristallinem Draht und NiTi-Draht

Der energetische Vergleich während des Betriebs wurde sowohl mit dem Originalbauteil als auch den FGL-Varianten berechnet. Die Basis für die Berechnung waren die vorangegangenen Messungen und Messungen am original KSV. Wärmeverluste wurden nach Methoden der Thermodynamik für zwei Szenarien (+20 °C und -30°C) berechnet. Für das Original-KSV wurde in erster Näherung angenommen, dass der Elektromagnet unabhängig von der Außentemperatur den gleichen Strom für eine Auslösung und das Offenhalten des KSV benötigt.

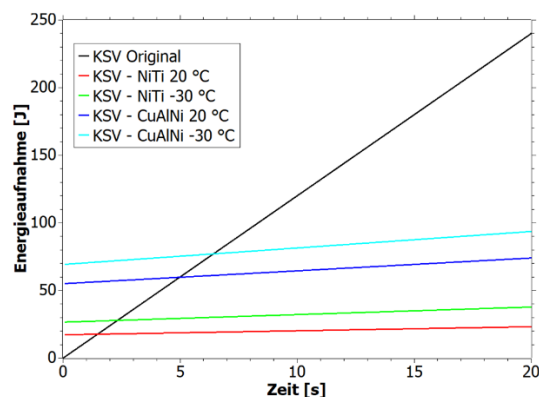


Abbildung 10: Energieaufnahme des KSV bei im zeitlichen Verlauf

Abbildung 10 zeigt die aufgenommene Energie der verschiedenen Aktorsysteme im zeitlichen Verlauf. Die FG-Varianten beginnen mit einer „Startenergiemenge“ da für die Erwärmung der Drähte bereits Energie aufgewendet wurde. Der Elektromagnet schaltet nahezu instantan und beginnt deshalb im Nullpunkt. Im weiteren zeitlichen

Verlauf bestimmen bei den FG-Varianten die konvektiven Verluste die notwendige Halteenergie. Es ist zu erkennen, dass die Variante mit NiTi-Elementen bereits nach 2 s und die Variante mit Cu-Elementen nach 5 s einen energetischen Vorteil gegenüber dem Magnetventil aufweisen.

Sauerstoffmaskenentriegelung

Der Bauraum und das Gewicht der Sauerstoffmaskenentriegelung wurde einem „pneumatisch“ auslösendem System entnommen, bei welchem die Entriegelung über den Druck einer zentralen Sauerstoffversorgung geschieht. Andere Systeme werden mit einem Elektromagneten entriegelt, die Sauerstoffkartusche befindet sich bei diesen Systemen lokal. Die Umsetzung einer NiTi-basierten Entriegelung als Substitution zur elektromagnetischen Variante wurde bereits vom Fraunhofer IWU [5] durchgeführt und konnte für dieses Vorhaben als Referenz verwendet werden. Abbildung 11 zeigt die Konstruktion des Systems mit Cu-FG-Draht. Die Gewichtsreduktion gegenüber der „pneumatischen“-Variante liegt bei 11 % und die erreichbare Bauraumreduktion bei 20 %. Da nicht eindeutig festgelegt werden konnte, was bei einem zentral versorgten System als Aktor gewertet wird, wurde dieser Vergleich nicht durchgeführt. Verglichen mit der konventionellen elektromagnetischen Variante fällt die Gewichtsreduktion deutlich höher aus. In etwa 80% des Gewichtes könnten gegenüber der elektromagnetischen Variante eingespart werden. Der Bauraum musste hingegen um 7% größer ausgeführt werden.

Bezeichnung	Wert
Gesamtgewichtsreduktion [%]	11 ↓
Gewichtsreduktion Aktor-System [%]	-
Gewichtsreduktion mechanisches System [%]	-
Bauraumreduktion [%]	20 ↓

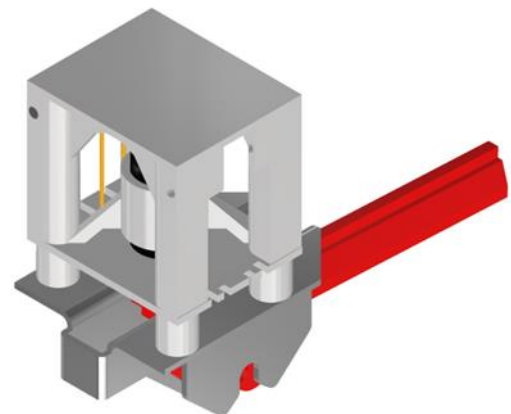


Abbildung 11: Konstruktion Sauerstoffmaskenentriegelung

Im vergleichenden Test wurde für diese Anwendung als sicherheitsrelevantes System, die Auslösegeschwindigkeit und die dazu aufgewendete Energie betrachtet. Im Falle der FG-Systeme ist die Auslösegeschwindigkeit abhängig von der Stromstärke und der Umgebungstemperatur.

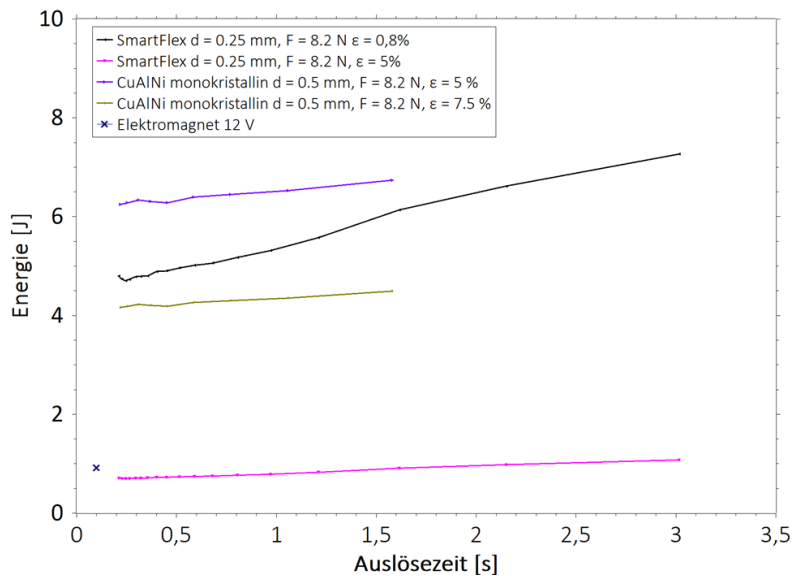


Abbildung 12: Vergleich der Energie und der Auslösegeschwindigkeit bei 20 °C von FG-Aktorik und dem elektromagnetischen System

Im energetischen Vergleich (Abbildung 12) zeigt sich, dass die elektromagnetische Umsetzung die schnellste Auslösezeit und zusammen mit einer NiTi-Variante die niedrigste Auslöseenergie aufweist. Die aufgewendete Energie ist vor allem vom Grad der Ausnutzung der Legierung abhängig. Bei hohem Ausnutzungsgrad (hoher Dehnung des Materials, aber geringerer Lebensdauer) kann das Stellelement kleiner dimensioniert werden, was in einer geringeren zu erwärmenden Masse und in weniger für die Auslösung benötigter Energie resultiert. Da alle Systeme im Flugzeug gleichzeitig ausgelöst werden, muss ein Kompromiss aus der maximal zur Verfügung stehenden Leistung und der Auslösegeschwindigkeit gefunden werden.

Die Substitution von elektromagnetischen Sauerstoffmaskenentriegelungen durch FG-basierte Aktorik mit dem Vorteil einer hohen Massereduktion ist für die Luftfahrtindustrie ein sinnvoller Schritt. Auf Grund der Umgebungstemperatur von ca. 20 °C im Kabinenraum ist die Variante mit binärem NiTi vorzuziehen, da die PUT zur Anwendung passen und die Energieaufnahme während der Auslösung geringer ausfällt.

Zusammenfassung

Formgedächtnislegierungen auf Kupferbasis wurden vermessen und auf ihre Lebensdauer im verbauten Zustand hin getestet und in technische Demonstratoren überführt. Die Ergebnisse zeigen die prinzipielle Eignung der Legierung als Aktormaterial und den Vorteil der hohen Dehnbarkeit der Legierungen in der monokristallinen Ausführung. Die Begrenzung der Lebensdauer ist aktuell noch der größte Nachteil, da dadurch das Potential als Substitutionsantrieb deutlich verringert wird. Durch eine bessere Oberflächenbehandlung des Aktorelements wird vermutlich mittelfristig eine Verbesserung in der Lebensdauer zu erwarten sein. Allgemein sollten die Einsatztemperaturen der Anwendung zum Material passen. Je näher die Umgebungstemperatur bei NiTi-Anwendungen an M_f gelangt, desto mehr wird der Einsatz von kuperbasierten FG-Elementen auf Grund von höherer Schaltdynamik und höheren Temperatureinsatzgrenzen relevant.

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, angefordert werden.

Weitere Informationen erhalten Sie bei Herrn M. Sc. Moritz Langhoff unter 02191 5921-154 oder per E-Mail an langhoff@fgw.de.

- [1] J. Mohd Jani, M. Leary, A. Subic, und M. A. Gibson, „A review of shape memory alloy research, applications and opportunities“, *Materials & Design*, Bd. 56, S. 1078–1113, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.11.084.
- [2] S. Langbein und A. Czechowicz, *Formgedächtnistechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021. doi: 10.1007/978-3-658-17904-5.
- [3] S. Najah Saud Al-Humairi, „Cu-Based Shape Memory Alloys: Modified Structures and Their Related Properties“, in *Recent Advancements in the Metallurgical Engineering and Electrodeposition*, U. Basheer Al-Naib, D. Vikraman, und K. Karuppasamy, Hrsg. IntechOpen, 2020. doi: 10.5772/intechopen.86193.
- [4] H. Fu, S. Song, L. Zhuo, Z. Zhang, und J. Xie, „Enhanced mechanical properties of polycrystalline Cu–Al–Ni alloy through grain boundary orientation and composition control“, *Materials Science and Engineering: A*, Bd. 650, S. 218–224, 2016, doi: 10.1016/j.msea.2015.10.037.
- [5] W.-G. Drossel, H. Kunze, A. Bucht, L. Weisheit, und K. Pagel, „Smart3 – Smart Materials for Smart Applications“, *Procedia CIRP*, Bd. 36, S. 211–216, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2015.01.055.