

Titel

Qualifizierung der Klebetechnik für Drahtaktoren auf FGL-Basis

IGF-Nr.: 20415 BG

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung: Institut für Werkzeugforschung und Werkstoffe (IFW)
Papenberger Straße 49, 42859 Remscheid



Ansprechpartner beim IFW: Dr. rer. nat. Romina Krieg
Telefon.: +49 (2191) 5921-179
E-Mail: krieg@fgw.de

Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 20415 BG 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.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ausgangssituation

Formgedächtnislegierungen (FGL, engl.: Shape Memory Alloys) sind metallische Werkstoffe, die sich nach einer scheinbar plastischen Verformung wieder an ihre Ursprungsgestalt erinnern und diese wieder annehmen können. Dabei können reversible Dehnungen zwischen 6-8 % erreicht werden [1]. FG-Elemente können sehr große Kräfte über mehrere 100.000 Bewegungszyklen durch eine thermisch induzierte Phasenumwandlung und der damit einhergehenden Geometrieänderung erzeugen. Im Vergleich zu anderen multifunktionalen Werkstoffen haben FGL mit Abstand das größte spezifische Arbeitsvermögen (Verhältnis von geleisteter Arbeit zu Werkstoffvolumen) [2]. Die Nutzung von FGL zur Realisierung von Aktorfunktionen hat sich in ersten Massenmärkten der Automobilindustrie, Elektronik und Ventiltechnik behauptet. Die Aktivierung erfolgt zumeist durch die umgebende Temperatur oder mittels Durchflusses mit einem elektrischen Strom. Formgedächtnislegierungen werden zumeist in Drahtform aus Nickel-Titan eingesetzt. Dies begründet sich mit der derzeit höchsten möglichen mechanischen Kraftausbeute der Elemente unter Zugbelastung im Vergleich zu anderen FG-Werkstoffen. Die erzeugten mechanischen Spannungen erreichen im Rahmen eines Dauereinsatzes Werte von 400 N/mm^2 . Folglich lässt sich mit einem $0,5 \text{ mm}$ dünnen und 100 mm langem FG-Draht eine Kraft von $78,5 \text{ N}$ und ein Stellweg von $3,5 \text{ mm}$ [3], [4] realisieren. Dieser Draht mit einem Gewicht unter 1 g erzeugt also eine höhere mechanische Ausgangsarbeit als ein Stellmotorsystem von knapp 100 g . Die massive Gewichtseinsparung birgt ein hohes Einsatzpotential für Mobilgeräte, die Automobil- und Luftfahrttechnik aber auch in anderen Branchen durch enorme mögliche Bauraum-, Gewichts- und Kosteneinsparungen. Trotz der technischen Vorteile gibt es zahlreiche Gründe, dass bislang keine nennenswerte Umsetzung von FG-Aktorlösungen erfolgte [2]. Ein wesentliches Problem besteht in den extrem hohen Zugspannungen an der Grenzfläche Draht-Peripherie bei Aktivierung. Der FG-Draht als Aktorelement muss zusätzlich elektrisch kontaktiert und ggf. gegenüber den anliegenden Werkstoffen elektrisch isoliert werden. Sowohl stoffschlüssige Verbindungen wie Löten und Schweißen als auch kraftschlüssiges Fügen mittels Crimpen sind aufgrund verschiedener Limitierungen technisch unzureichend. Beim Schweißen und Löten wird Wärme in das System eingebracht, was zu einer Veränderung der Eigenschaften des FG-Elements führt und Crimp-Verbindungen sind mechanisch weniger stabil. Entsprechend ist es notwendig ein Fügeverfahren zu etablieren, dass diese Nachteile überwindet. Sollen sich FG-Aktoren mittlerer Stückzahl in einer Vielzahl von Branchen etablieren, so muss die Einbettung des Aktors in das Gesamtsystem ohne große Änderungen im Prozessablauf realisierbar sein.

Die Klebtechnik als Fügeverfahren ist bereits in zahlreichen Branchen wie der Automobiltechnik, Elektronik und Feinwerktechnik etabliert. So lassen sich ganz unterschiedliche Metalle wie Stahl, Aluminium und Titan miteinander verbinden. Obwohl mittlerweile die Gehäuse von FG-Aktoren [5] und Folien-FG-Elementen [6], [7], [8], [9] geklebt werden, wird diese Technik zur Integration der Drähte selbst noch nicht eingesetzt. Entsprechend ist die Qualifizierung einer geeigneten Klebtechnik ein weiterer Baustein zur Realisierung einfacher Aktorlösungen auf Basis von FGL.

Vorwettbewerbliche Untersuchungen zum Kleben von FG-Elementen sind für einzelne KMU aufgrund der Komplexität der gegenseitigen Einflussfaktoren wirtschaftlich nicht tragbar, so dass insbesondere kleine Unternehmen eine Erschließung der Technologie scheuen. Ziel dieses Forschungsvorhabens war es daher, das Kleben als Fügeverfahren von FG-Drähten mit Metall- und Kunststoffelementen zu qualifizieren. Die Verdringung als aufwändige kraftschlüssige Alternative soll dann nur noch für die mechanisch unbedenklichen elektronischen Kontaktierungen verwendet werden. Es wurde ein wissenschaftlich fundiertes Basiswissen über die Auswahl und den Einsatz von Klebstoffen sowie den Oberflächenpräparationsprozessen der FG-Drähte und der verwendeten Metalle und Kunststoffe erstellt. Ebenfalls wurde eine klebegerechte Fuge konstruiert, welche die speziellen Herausforderungen der FG-Technik (temperaturabhängige Längenänderung von bis zu 8 % und dementsprechend hohe Scherkräfte) berücksichtigt.

Forschungsziel

Das Ziel des Forschungsvorhabens war die Qualifizierung von Klebeverbindungen für FG-Aktoren sowie dessen Etablierung als weiterer industrieller Fügeprozess. Dieses Hauptziel lässt sich in 4 Teilziele untergliedern:

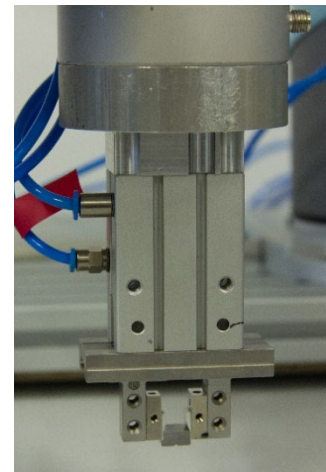
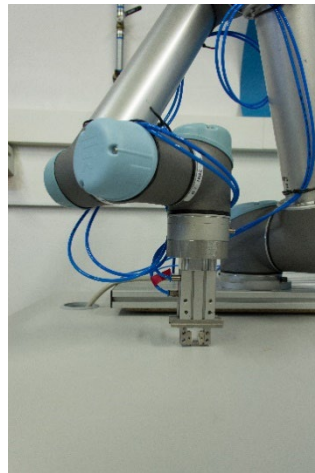
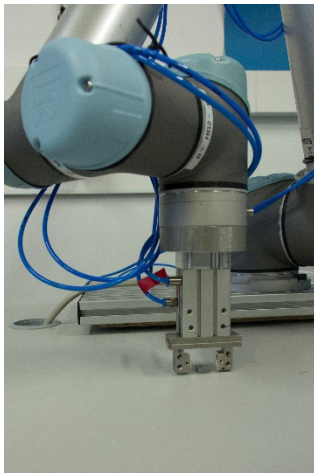
1. Erstes Teilziel war der Nachweis der grundsätzlichen Eignung einer Klebeverbindung in der Aktorik.
 2. Das zweite Teilziel bestand in dem Abgleich der ausgewählten Klebstoffe und Prozesstechniken mit den in den Produkten eingesetzten Werkstoffen.
 3. Das dritte Teilziel war die Untersuchung der Eigenschaften der Klebeverbindung in aktorischen Beispielanwendungen mit der Erstellung eines Leitfadens für Anwender.
 4. Das abschließende vierte Teilziel war die Erschließung des klebebasierten Fügeverfahrens im teilautomatisierten Prozess.
-

Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

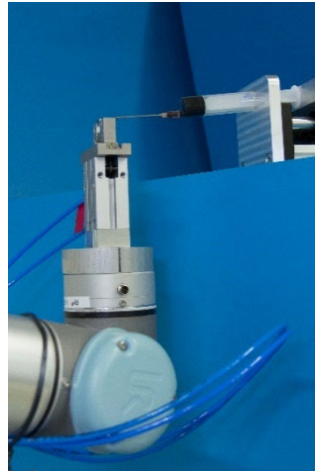
In dem Forschungsvorhaben wurde die Klebung in einer, in quaderförmigen Elementen, gefrästen Rille realisiert. Gefertigt wurden die Quader aus den Werkstoffen Stahl (1.0038), Aluminium (EN AW-2007), PVC, GFK und PA6. Getestet wurden vier zweikomponentige Epoxidharzklebstoffe. Die FG-Drähte mit einem Durchmesser von 0,5 mm wurden verschiedenen chemischen Oberflächenbehandlungen unterzogen. Es wurden statische und dynamische Versuche der Klebefugen bis zum Versagen des Systems FG-Element-Klebefuge-Quader durchgeführt. Der Werkstoff der Quader, der verwendete Klebstoff sowie die durchgeführten Oberflächenpräparationen des FG-Elements hatten keinen nennenswerten Einfluss auf die Ergebnisse. Die Klebung versagte durchweg in Form eines Adhäsionsbruchs in der Grenzfläche Draht-Klebstoff. Das konnte darauf zurückgeführt werden, dass die Rauheit des Drahtes um mindestens

eine Zehnerpotenz niedriger war als die der verwendeten Quadermaterialien. Einen großen Einfluss auf die Reproduzierbarkeit einer Klebefuge hatte die Montage des Drahtes und der Quader. Sie erforderte eine präzise Positionierung des Drahtes in der Rille unter Einhaltung eines vorher definierten Abstands.

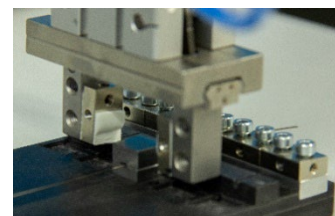
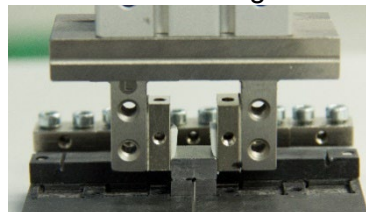
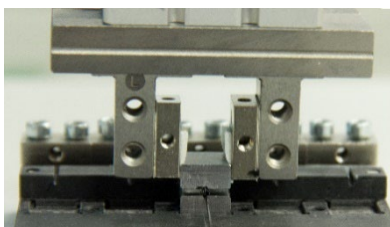
Der Klebstoffauftrag in die Klebstoffrinne des Quaders und das Übereinanderlegen der Quader für die Verklebung wurde durch einen teilautomatisierten Prozess mit einem Roboter erfolgreich durchgeführt (Abbildung 1).



Roboter positionieren und Quader greifen



Klebstoff auftragen



Quader auf unteren Quader positionieren und Greifer öffnen

Abbildung 1: Halbautomatische Klebung eines Aktors

Es wurde die Verklebung von sowohl pseudoelastischem als auch aktorischem FG-Material mit Stahl (1.0038), Aluminium (EN AW-2007), PVC, GFK und PA6 untersucht.

Eine funktionstüchtige Verklebung von pseudoelastischem Material, in der Weise, dass die Zugspannungen vollständig in den Draht geleitet werden und es im Draht zur Umwandlung Austenit-Martensit kommt, konnte nicht erzielt werden. Die Klebung absorbierte die angelegten Zugspannungen vollständig. Ob aus einer umfangreicheren Strukturierung der FG-Oberfläche eine bessere Haftung des Klebstoffs resultieren würde, die die Übertragung der Zugkräfte in das FG-Elemente erlaubt, bevor es zum Adhäsionsbruch kommt, konnte im Vorhaben nicht untersucht werden.

Für aktorische Drähte konnten folgende Ergebnisse erzielt werden:

Für Zug-Belastungen unterhalb von 100 N lassen sich Drahtaktoren auf FGL-Basis zuverlässig mithilfe der Klebtechnik fügen, da statische und dynamische Kräfte zu keinem Versagen der Klebefuge führten. In dieser Größenordnung lagen auch die gemessenen Kräfte, die bei gecrimpten Drähten in einem Versagen resultieren. Der Kontakt mit Betriebsstoffen wie Kühlschmierstoffen reduziert die aushaltbaren Kräfte, lies sie aber nicht unter 100 N absinken. Die Einwirkung einer Wasserdampf-atmosphäre angereichert mit Salz (Salzsprühnebeltest) mit anschließender Trocknung hatte keinen Einfluss auf die Klebung. Bei dynamischen Versuchen in einer Heizkammer ($T_{\max} = 100 \text{ °C}$) wurde lediglich die T-abhängige Verringerung des E-Moduls des FG-Drahtes festgestellt. Es trat allerdings kein Versagen der Klebefuge auf.

Zwei Lastfälle, die beim Einsatz von FG-Drähten in Aktoren üblich sind, wurden getestet.

- Bei dem ersten Lastfall, thermische Aktivierung unter Stromdurchfluss, wurden zyklische Bestromungsversuche durchgeführt. Dabei wurden die Stromstärke (max. 3 A) und die Bestromungszeit (max. 5 s) bis zum Versagen der Klebefuge erhöht. Insgesamt konnten so über 3600 Zyklen unter wachsender thermischer (Aktivierungs-)Belastung realisiert werden. Unter Dauerbestromung wurden Maximal-Temperaturen bis 150 °C in der Nähe der Klebefuge gemessen, wobei die Quader aus Metall die Wärme besser ableiteten als die Quader aus Kunststoff.
- Der zweite Lastfall wurde als Bogenaktor (Abbildung 2) umgesetzt. Ein vergleichbarer Aktor wird kommerziell mit vercrimpten FG-Drähten angeboten. Es konnten Gewichte (max. 3,7 kg) um bis zu 2,5 mm gehoben werden und somit vergleichbare Ergebnisse zu gecrimpten Aktoren erzielt werden

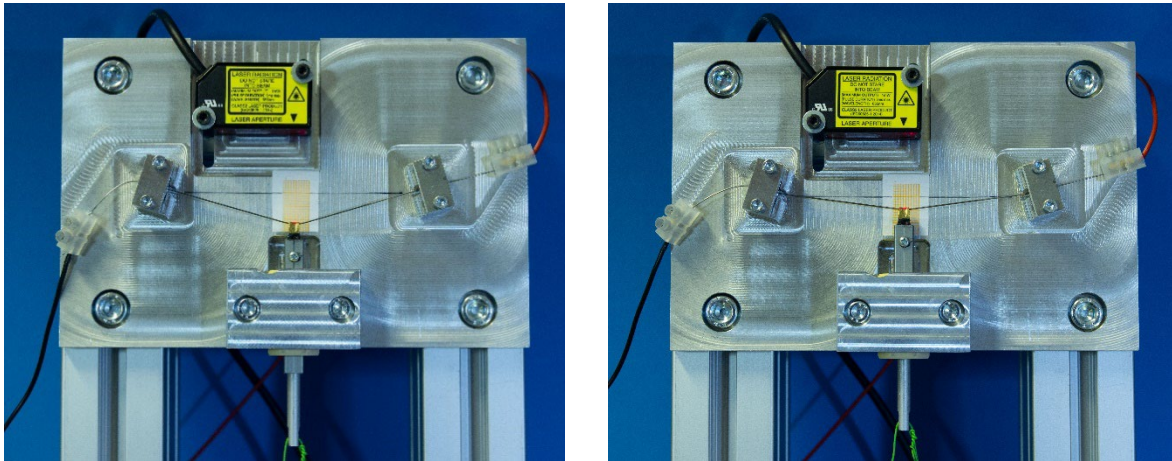


Abbildung 2: Bogenaktor mit einem Gewicht von 1068 g ohne Aktivierung (links) und mit Aktivierung ($I = 2800 \text{ mA}$, rechts)

Aus dem Forschungsvorhaben ist ein Merkblatt entstanden, das dem Anwender Empfehlungen an die Hand gibt, wie er die Verbindungstechnik Crimpen durch das Kleben ersetzen oder ergänzen kann und die Verklebung der FG-Komponenten mit dem Aktorgehäuse durchführt. Die Auswahl der zu verwendenden Materialien und die Auslegung des Aktors wie Drahtdurchmesser, Drahtlänge, durch die FG-Komponente zu erzeugende Kräfte und zu erzeugende Stellwege sowie die Bauform des Gehäuses sollten vor der Auslegung der Klebefuge schon durchgeführt worden sein. Ebenso hat der Einsatztemperaturbereich des gesamten Aktors als auch durch den Betrieb entstehende Bauteiltemperaturen im Vorfeld bekannt zu sein.

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 Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, www.fgw.de, angefordert werden.

Weitere Informationen erhalten Sie bei Dr. rer. nat. Romina Krieg unter
+49 (2191) 5921-179

Literatur:

- [1] K. Otuska und C. Wayman, Shape Memory Materials, Cambridge University Press, 1999.
- [2] S. Langbein und A. Czechowicz, Konstruktionspraxis Formgedächtnistechnik, Potential – Auslegung – Beispiele, Springer Vieweg, 2013.
- [3] T. W. Duerig, K. N. Melton und D. Stöckel, Engineering Aspects of Shape Memory Alloys, Burlington: Elsevier Science, 1990.

- [4] M. Schwartz, Smart Materials, CRC Press, 2009.
- [5] P. Kuszneruk, „Shaped memory alloy (sma) valve assembly for controlling pressurized air supply to air cells in a vehicle seat,“ 08.02.2018.
- [6] M. Kohl, „Entwicklung von Mikroaktoren aus Formgedächtnislegierungen,“ 2001.
- [7] Y. Liu, „Formgedächtnis – Mikroventile mit hoher Energiedichte,“ 2003.
- [8] C. Megnin, „Formgedächtnis-Mikroventile für eine fluidische Plattform,“ 1993.
- [9] K. D. Skrobanek, „Entwicklung von Mikromembranaktoren mit NiTi-Formgedächtnislegierungen,“ 1998.