

Hochgenaue, schädigungsfreie Doppelseiten-Endbearbeitung von MSM-Aktorsticks („EBMA“)

IGF-Nr.: 01IF22504N

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1: Fraunhofer-Institut für
Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU,
Chemnitz

Forschungseinrichtung 2: Fraunhofer-Institut für
Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK
Berlin



Ansprechpartner beim Fraunhofer IWU:

Jörg Schneider
+49 (371) 5397-1934
Joerg.Schneider@iwu.fraunhofer.de

Ansprechpartner beim Fraunhofer IPK:

Benjamin Hein
+49 30 39006-437
benjamin.hein@ipk.fraunhofer.de

Danksagungen

Das IGF-Projekt „Hochgenaue, schädigungsfreie Doppelseiten-Endbearbeitung von MSM-Aktorsticks“ (01IF22504N) wurde im Rahmen des Programms „Industrielle Gemeinschaftsforschung“ (IGF) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Ausgangssituation

Aktorelemente stellen zentrale Bestandteile mikromechanischer Systeme dar und finden in vielfältigen Branchen wie der Automobilindustrie, der Medizintechnik sowie dem Maschinen- und Anlagenbau breite Anwendung. Besonders attraktiv sind dabei magnetische Formgedächtnisaktoren (MSM – Magnetic Shape Memory) aufgrund ihrer kurzen Schaltzeiten, hohen Energiedichten, geringen Verschleißeigenschaften sowie des Wegfalls einer direkten elektrischen Kontaktierung. Das im Rahmen des Projekts eingesetzte einkristalline MSM-Material, eine Nickel-Mangan-Gallium-Legierung (kurz: NiMnGa) ermöglicht durch große Dehnungen unter Magnetfeldeinfluss neuartige Anwendungen in der Sensor- und Aktortechnik. Der Schlüssel zur technischen und wirtschaftlichen Etablierung von MSM-Aktoren liegt jedoch in der reproduzierbaren, großtechnischen Herstellung des MSM-Materials sowie dessen Weiterverarbeitung zu MSM-Aktorsticks. Eine wesentliche Herausforderung stellt dabei die Finish-Bearbeitung der quaderförmigen Stäbe mit typischen Abmessungen von $2 \times 3 \times 15 \text{ mm}^3$ dar, da diese nach der Vorbearbeitung material- und prozesskettenbedingt erhebliche Maßabweichungen von bis zu 8 % der Bauteillänge aufweisen. Die magnetischen Formgedächtnislegierungen eignen sich für ein breites Spektrum technologischer Anwendungen, insbesondere als Aktoren, Dämpfer oder Sensoren [ELE12, GAB17] in Bereichen wie Sicherheitstechnik, Biomedizin, Dämpfungstechnik, Nanotechnologie sowie der Mikropositionierung im Hoch- und Ultrapräzisionsbereich [HUB12, WIE13, PAG18, HUT19]. Angesichts der zunehmenden industriellen Automatisierung und der damit verbundenen steigenden Nachfrage nach Aktuatoren, ein Markt, der von 53,9 Mrd. USD (2021) auf 86,6 Mrd. USD (2027) anwachsen soll [MAR21], bieten MSM-Legierungen durch ihre technischen Vorteile und das Potenzial zur Kostensenkung vielversprechende Möglichkeiten zur Erschließung neuer Marktanteile. Insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU), die entlang der Prozesskette der Formgedächtnislegierungstechnologie tätig sind, profitieren von den im Projekt gewonnenen Erkenntnissen zur Doppelseitenbearbeitung, welche zu einer signifikanten Steigerung der Prozesssicherheit und Produktqualität beitragen. Durch gezielte Pilotanwendungen wird die Sichtbarkeit von MSM-Aktuatoren erhöht, neue Einsatzpotenziale werden identifiziert und innovative Anwendungsmöglichkeiten erschlossen. Die einzigartigen Eigenschaften der MSM-Elemente, wie hohe Dehnungen, multistabile Positionierungen, geringe Verlustleistungen bei statischer Belastung sowie eine hohe Zahl an Lastwechseln, unterstreichen ihr erhebliches Marktpotenzial [HUT19]. Um dieses Potenzial auszuschöpfen, werden im Projekt zwei skalierbare Verfahren zur Finish-Bearbeitung entwickelt und mittels Technologietransfer Unternehmen bereitgestellt, wodurch nicht nur MSM-Elemente, sondern auch weitere empfindliche Werkstoffklassen neue Anwendungen und Märkte erschließen können.

Forschungsziel

Aus den Ausführungen zur Ausgangssituation ergibt sich die zentrale Forschungsfrage, wie eine serienfähige, hochgenaue und planparallele Finish-Technologie für MSM-Aktorsticks entwickelt werden kann, die mechanische und thermische Einflüsse auf die Oberflächenrandschicht konsequent vermeidet bzw. auf ein Minimum reduziert. Im Fokus steht dabei die Korrektur der im Vorprozess entstandenen Maßabweichungen, um eine reproduzierbare und qualitativ hochwertige Weiterverarbeitung der MSM-Sticks zu gewährleisten. Der wissenschaftlich-technische Ansatz basiert auf der Erschließung und Erprobung zweier innovativer Doppelseiten-Planbearbeitungsverfahren: der präzisen elektrochemischen Bearbeitung (PECM) sowie der Feinschleif- und Läpp-Technologie mit Planetenkinematik (DPMP). Beide Verfahren adressieren gradierte Anforderungsprofile hinsichtlich Maßhaltigkeit und Oberflächengüte im einstelligen Mikrometerbereich und vermeiden eine nachteilige Beeinflussung der Randzoneneigenschaften. Zur Erreichung des Forschungsziels werden folgende zentrale Aspekte untersucht, darunter die Entwicklung eines kombinierten EC-Vorrichtungs- und Spannprinzips mit minimalen Spannkraften und gleichverteilten Spülbedingungen, die Konstruktion anwendungsspezifischer Läuferscheiben zur spannungsarmen Führung dünner MSM-Bauteile beim DPMP sowie die systematische Analyse von Prozesswechselwirkungen, Einfluss- und Störgrößen einschließlich der Auswirkungen von Druck- und Temperatureinflüssen auf die Bearbeitungseigenschaften der NiMnGa-Legierungen. Abschließend soll durch die gezielte Definition und Validierung reproduzierbarer Prozessführungen und Prozessfenster im Batch-Betrieb die industrielle Anwendbarkeit der entwickelten Finish-Technologien belegt werden. Die Forschungsergebnisse leisten einen wesentlichen Beitrag zur wirtschaftlichen und serienfähigen Herstellung hochpräziser MSM-Aktorsticks und eröffnen neue Einsatzpotenziale für MSM-basierte Aktorsysteme in verschiedenen Industriebereichen.

Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

Das Ziel des Vorhabens bestand darin, eine serienfähige, hochpräzise und planparallele Finish-Technologie für MSM-Aktorsticks zu entwickeln, bei der mechanische und thermische Einflüsse auf die Oberflächenrandschicht konsequent vermieden oder auf ein Minimum reduziert werden sollten. Aufbauend auf den Erkenntnissen zur Ausgangssituation wurde eine mehrstufige methodische Vorgehensweise verfolgt, die zunächst die systematische Analyse geeigneter Bearbeitungsverfahren, anschließend die Konstruktion angepasster Vorrichtungen und schließlich die Umsetzung und Validierung im Demonstratormaßstab umfasste.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden insbesondere die Verfahren der elektrochemischen Bearbeitung sowie der mechanischen Bearbeitung mittels Feinschleif- und Läpptechnologie weiterentwickelt, um hochgenaue, schädigungsfreie MSM-Aktorsticks zu fertigen.

Im Projektstrang der elektrochemischen Bearbeitung wurde zunächst eine elektrochemische Charakterisierung der verwendeten NiMnGa-Legierung vorgenommen. Von Mitgliedern des PA bereitgestelltes Halbzeug-Material wurden zu Beginn zu Zylindern mit den Abmessungen $d = 11,96 \text{ mm}$ und einer Höhe $h = 30 \text{ mm}$ vorbereitet. Hierfür wurde eine eigens entwickelte elektrochemische Abtragsvorrichtung eingesetzt, bestehend aus Elektrolytführung, Formkathode, elektrischer Abschirmung und einem Universal-Probenhalter, welche eine stabile Fixierung und elektrische Kontaktierung der Probenkörper gewährleistete. Die anschließende elektrochemische Werkstoffcharakterisierung erfolgte gemäß DIN SPEC 91399 unter Variation von Spannung, Pulsdauer und Senkgeschwindigkeit bei Verwendung einer Natriumnitratlösung als Elektrolyt. Mit der Nachrüstung einer KEEP-Unit zur aktiven Einstellung des Passivierungsverhaltens konnte die Auflösungseffizienz signifikant gesteigert werden, insbesondere im Bereich niedriger Stromdichten. Während im ursprünglichen Zustand ein stabiler Abtrag erst ab einer Stromdichte von ca. 45 A/cm^2 einsetzte, wurde mit KEEP-Unit bereits ab einer Stromdichte von 30 A/cm^2 ein linearer und homogener Materialabtrag erreicht. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden Voruntersuchungen zur Gestaltung geeigneter Elektrodensysteme durchgeführt. In weiteren PECM- und ECM-Versuchsreihen wurden die Auswirkungen der Prozessparameter auf Oberflächenrauheit, Maßhaltigkeit und Gefügeintegrität untersucht. Dabei zeigten sich für den PECM-Modus besonders glatte und homogene Oberflächen bis $R_z \leq 0,52 \text{ }\mu\text{m}$ sowie eine sehr gute Maßhaltigkeit mit Parallelitätswerten $P \leq 4 \text{ }\mu\text{m}$. Geringe Pulslängen und moderate Senkgeschwindigkeiten erwiesen sich als vorteilhaft. Ergänzend wurden Simulationen der elektrochemischen Prozessbedingungen durchgeführt, um den Einfluss der geometrischen Auslegung der Abtragsvorrichtung auf die Feldverteilung im Arbeitsspalt zu bewerten. Hierbei konnte gezeigt werden, dass insbesondere die Höhe der formgebenden Kathodenfläche und eine präzise Streustromisolation entscheidend zur Erzielung homogener Abtragsbedingungen beitragen. Fertigungstoleranzen wie ein Offset zwischen Kathode und Isolation wirken sich hingegen negativ auf die Bearbeitungsqualität aus. Aufbauend auf den Voruntersuchungen wurden Demonstrator-Aktorsticks gefertigt. Die Bearbeitung erfolgte im liegenden Zustand in einer zweistufigen Prozessstrategie, bei der alle vier planparallelen Seiten der MSM-Sticks elektrochemisch bearbeitet wurden. Im direkten Vergleich erwies sich der ECM-Modus als schneller, jedoch wies der PECM-Modus eine bessere Oberflächenhomogenität und Maßgenauigkeit auf. Besonders hervorzuheben ist, dass bei beiden Verfahren keine Beeinträchtigung der Oberflächenrandschicht auftrat. Abschließende magnetomechanische Tests bei Mitgliedern des PA belegten, dass die mittels ECM

bearbeiteten MSM-Sticks eine Steigerung sowohl der Work Output Density (WOD) als auch der magnetisch induzierten Dehnung (MFIS) zeigten. Somit kann künftig der ursprünglich notwendige Elektropolierprozess entfallen, ohne die funktionellen Eigenschaften der Sticks zu beeinträchtigen. Insgesamt konnte durch die elektrochemische Bearbeitung, insbesondere im PECM-Modus, eine hochpräzise, gratfreie und funktional hochwertige Bearbeitung der MSM-Aktorsticks realisiert werden, welche eine wesentliche Grundlage für die weitere Entwicklung serienfähiger Finish-Prozesse bildet.

Im Projektstrang der Feinschleif- und Läpptechnologie wurden mechanische Trennverfahren wie kraftgeregeltes Schleifen untersucht. Hier zeigte sich, dass eine präzise Steuerung der Prozesskraft F_P essenziell für die Erzielung hoher Oberflächengüten bei gleichzeitiger Wahrung der Gefügestruktur war. Initiale Prozesskräfte von $F_P = 50 \text{ N}$ führten zu Bruchschäden, während eine Reduktion stabile Bearbeitungsprozesse ermöglichte. Besonders wirksam war die Kombination eines D6-Diamantkorns in keramischer Bindung mit einem Stahlgrundkörper, die eine hohe Formstabilität und gleichmäßige Materialtrennung sicherstellte. Ergänzend wurden simulationsgestützte Ansätze zur präziseren Prozessauslegung identifiziert. Die Untersuchungen zur Läppbearbeitung zeigten hingegen eine signifikante Verschlechterung der Oberflächenqualität im Vergleich zum Ausgangszustand. Intensive mechanische Eingriffe führten zu einer Oberflächen- und Randzonenschädigung, insbesondere bei hoher Flächenpressung p_F und unsachgemäßer Auswahl des Läppgemischs. Trotz schrittweiser Verfeinerung der Läppkörner blieb die Vermeidung von Mikrodeformationen kritisch. Werkstoffspezifische Untersuchungen bestätigten, dass MSM-Sticks im martensitischen Zustand eine höhere Robustheit gegenüber mechanischen und elektrochemischen Beanspruchungen aufwiesen. Ein eigens entwickelter Probenhalter, der eine konstante, geringe Prozesskraft F_P erzeugte, bestätigte die Vorteile einer passiven Kraftregelung. Als weiterer Ansatz wurde die Finish-Bearbeitung mittels Doppelseitenplanschleifen mit Planetenkinematik (kurz: DPMP) untersucht. Erste Versuche zeigten ähnliche Trends wie bei der Einseitenbearbeitung. Während das martensitische Gefüge gut bearbeitet werden konnte, traten beim austenitischem Gefüge Ausbrüche und Facettierungen auf, bedingt durch lokale mechanische und thermische Belastungsspitzen. Zur Analyse von Rissbildungen wurden hochauflösende REM-Untersuchungen durchgeführt. Es zeigte sich, dass temperaturabhängige Veränderungen während der Probenpräparation die Oberflächenstruktur beeinflussen konnten. Durch angepasste Präparation mit Kryotechnik sowie Schutzschichten ließ sich der Einfluss minimieren und rissfreie Bearbeitungen nachweisen. Weitere Optimierungsversuche zeigten, dass die wirkende Prozesskraft pro Aktorstick $F_{P,AS}$ einen entscheidenden Einfluss auf die Bearbeitungsergebnisse hat. Eine Prozesskraft von $F_{P,AS} \leq 5 \text{ N}$ und ein spezifischer Anpressdruck $p_A < 0,2 \text{ N/mm}^2$ erwiesen sich als zielführend. Auch die Schleifscheibendrehzahl n_S und die Drehzahl des Innenstiftkranzes n_i mussten niedrig

gewählt werden, um Oberflächenschädigungen zu vermeiden. Eine reduzierte Abtrennrates $\Delta \dot{h}_w$ sowie eine regelmäßige Konditionierung der Schleifscheiben verbesserten die Ergebnisse signifikant. Die Vorgabe einer konstanten Abtrennrates $\Delta \dot{h}_w$ erwies sich gegenüber einer konstanten Prozesskraft F_P als vorteilhafter. Mittels Pearson-Korrelationsanalyse wurden Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und Qualität der Aktorsticks quantitativ ermittelt. Ein hohes Stick-Ronden-Verhältnis zeigte aufgrund der dadurch resultierenden, niedrigen Anpressdrucks p_A einen positiven Einfluss auf die Produktqualität, während eine hohe Prozesskraft $F_{P,AS}$ die Planparallelität P und die Oberflächenintegrität negativ beeinflusste. Höhere Abtrennrates $\Delta \dot{h}_w$ korrelierten ebenfalls mit einer Verschlechterung der Oberflächenqualität. Mit Hilfe dieser Erkenntnisse konnte eine Anzahl an Aktorsticks $x_{AS} \leq 60 \%$ schadungsfrei im Batch-Betrieb bearbeitet werden. Die Ursache der beobachteten Ausschussquote $q_A \geq 40 \%$ konnte nach aktuellem Stand nicht eindeutig identifiziert werden. Die erhöhte Ausschussquote q_A lässt sich primär auf das komplexe Zusammenwirken multipler Einfluss- und Störgrößen zurückführen. Hierzu zählen unter anderem temperaturabhängige Effekte sowie mechanisch induzierte Belastungen infolge zyklischer Lastwechsel. Zudem könnten materialbedingte Eigenschaften der Aktorsticks einen maßgeblichen Einfluss auf das Prozessverhalten ausüben. Zur systematischen Erfassung und Analyse dieser Einflussfaktoren ist eine weiterführende Entwicklung der Maschinen- und Anlagentechnik erforderlich. Zusätzlich ergibt sich weiteres Optimierungspotenzial, insbesondere hinsichtlich der präzisen Fixierung und Führung der Aktorsticks innerhalb der Läuferscheiben. Auch die Integration in-situ-fähiger Messsysteme zur kontinuierlichen Erfassung thermomechanischer Parameter erscheint vielversprechend, um die Prozessstabilität und -sicherheit signifikant zu erhöhen. Der entwickelte DPMP-Prozess stellt dabei eine zentrale Grundlage für die weiterführende Entwicklung eines serienreifen Finish-Prozesses dar – unter Berücksichtigung technologischer, wirtschaftlicher sowie anwendungsbezogener Anforderungen.

Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens stand die Demonstration einer serientauglichen, hochpräzisen Finish-Technologie für MSM-Aktorsticks im Fokus, die sowohl mechanische als auch thermische Schädigungen der Oberflächenrandschicht minimieren sollten. Die Untersuchungen umfassten die elektrochemische Bearbeitung am Fraunhofer IWU sowie die Feinschleif- und Lapptechnologien am Fraunhofer IPK. Zu Beginn der Arbeiten am Fraunhofer IWU wurde die elektrochemische Bearbeitbarkeit der verwendeten NiMnGa-Legierungen systematisch charakterisiert. Die Untersuchungen zeigten, dass sich unter Verwendung von Natriumnitrat als Elektrolyt und dem Einsatz einer KEEP-Unit ab einer Stromdichte von 36 A/cm^2 ein stabiler und linearer Materialabtrag einstellt. Im Rahmen der Voruntersuchungen konnte zudem bestätigt werden, dass eine Bearbeitung mittels elektrochemischen

Abtragens möglich ist, ohne dass eine Schädigung der Oberflächenrandschicht erfolgt. Während zunächst eine stehende 4-Seitenbearbeitung im PECM-Modus eingesetzt wurde, zeigte sich, dass aufgrund der Herausforderungen bei der Probenfixierung und elektrischen Kontaktierung eine Umstellung auf die liegende 2-Seitenbearbeitung notwendig war, um den Anforderungen an Prozesssicherheit und Bauteilqualität gerecht zu werden. Die Hauptuntersuchungen bestätigten die prinzipielle Eignung beider elektrochemischer Verfahren, sowohl PECM als auch ECM, für die Finish-Bearbeitung der MSM-Sticks. Die Fertigung mit ECM-Parametern erwies sich dabei hinsichtlich Bearbeitungszeit t_B und Maßgenauigkeit als vorteilhaft, während PECM-Parameter eine homogenere Oberflächenstruktur ermöglichten, jedoch mit niedrigeren Senkgeschwindigkeiten einhergingen. Im PECM-Modus zeigte sich die Ausbildung von Graten, die in der ECM-Bearbeitung weitgehend vermieden werden konnte. Magnetomechanische Funktionstests der im ECM-Modus bearbeiteten Demonstrator-Aktorsticks belegten sogar eine minimale Steigerung der Leistungsdichte sowie eine durchweg erhöhte magnetisch induzierte Dehnung (MFIS) im Vergleich zu den Ausgangszuständen. Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, dass die ECM-Bearbeitung eine störschichtfreie Maßbearbeitung ermöglicht, wodurch der vormals notwendige Elektropolierprozess nach der Maßbearbeitung entfallen kann.

Parallel dazu wurden am Fraunhofer IPK umfassende Untersuchungen zur mechanischen Bearbeitung mittels Feinschleiß- und Lápptechnologie durchgeführt. Die systematische Variation der Prozessparameter, insbesondere der Drehzahl n , der Prozesskraft F_P , der Korngröße d_k sowie der Flächenpressung p_F , ermöglichte signifikante Verbesserungen der Oberflächenqualität. Dabei zeigte sich, dass eine Reduktion der Flächenpressung p_F in Kombination mit einem optimal abgestimmten Schleifmedium die gemittelte Rautiefe R_z nachhaltig verbesserte. Ergänzende Untersuchungen zum kraftgeregelten Einseitenplanschleifen bestätigten, dass durch die gezielte Reduktion der Prozesskraft F_P stabile Bearbeitungsprozesse mit gleichmäßiger Materialtrennung realisiert werden konnten, wobei gemittelte Rautiefen im Bereich von $0,62 \mu\text{m} \leq R_z \leq 0,82 \mu\text{m}$ erreicht wurden. Basierend auf den positiven Ergebnissen der Einseitenbearbeitung wurde die anwendungsspezifische DPMP-Technologie weiterentwickelt. Durch sukzessive Anpassung der Prozesskraft pro Aktorstick auf Werte zwischen $1 \text{ N} \leq F_{P,AS} \leq 5 \text{ N}$ sowie die Feinjustierung der Drehzahlen n konnten rissfreie Oberflächen der martensitischen Gitterstruktur erzielt werden. Die erreichte Planparallelität der bearbeiteten Aktorsticks betrug $P_{AS} < 10 \mu\text{m}$, und eine Maßhaltigkeit innerhalb von $N \pm 0,01 \text{ mm}$ konnte zuverlässig umgesetzt werden. Dabei erwies sich der Einsatz von Schleifscheiben mit Kunstharzbindung aufgrund ihrer dämpfenden Eigenschaften als besonders vorteilhaft gegenüber keramischen Bindungen. Im Rahmen der Bearbeitung von Demonstrator-Bauteilen von zehn Aktorsticks konnte ein Anteil von $a_{AS} \leq 60 \%$ der Sticks schädigungsfrei gefertigt werden. Die beobachtete Ausschussquote von $q_A \geq 40 \%$ ließ sich nach aktuellem Stand nicht eindeutig einer einzelnen Ursache zuordnen, sondern wurde als Resultat eines komplexen Zusammenwirkens verschiedener Einflussgrößen

interpretiert, darunter temperatur- und belastungsinduzierte Effekte sowie mögliche werkstoffbedingte Inhomogenitäten. Für eine vollständige Aufklärung dieser Effekte wird eine weiterführende Maschinen- und Prozessentwicklung empfohlen. Zudem wurde identifiziert, dass eine verbesserte Fixierung und Führung der Aktorsticks innerhalb der Läuferscheiben sowie die Integration von in-situ-Messsystemen zur Erfassung thermomechanischer Einflussgrößen wesentliche Potenziale zur weiteren Steigerung der Prozesssicherheit und Bauteilqualität bieten.

Insgesamt belegen die Ergebnisse des Forschungsvorhabens, dass sowohl die elektrochemische Bearbeitung im ECM-Modus als auch die weiterentwickelten mechanischen Bearbeitungsverfahren zentrale Beiträge zur Erreichung einer hochpräzisen, randschichtschonenden und wirtschaftlichen Finish-Bearbeitung von MSM-Aktorsticks leisten können. Die entwickelten Technologien bilden somit eine belastbare Grundlage für die zukünftige industrielle Anwendung von MSM-basierten Aktorsystemen.

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.

Literaturverzeichnis:

ELE12	N.N.: Neuartige Aktoren für Industrie, Medizintechnik und Automobilbau. Elektronikpraxis. November 2012. S. 64 - 65.
GAB17	Gabdullin, N.; Khan, H.: Study of Non-Homogeneity of Magnetic Field distribution in Single-Crystal Ni–Mn–Ga Magnetic Shape Memory Element in Actuators Due to Its Anisotropic Twinned Microstructure. IEEE Transactions on magnetics, vol. 53, No. 3, 03/2017.
HUB12	Hubert, A.; Calchand, N.; Le Gorrec, Y.; Gauthier, J.-Y.: Magnetic Shape Memory Alloys as smart materials for micro-positioning devices. Advanced Electromagnetics, August 2012, S. 1 - 10.
HUT19	Hutter, M.; Raab, M.; Kazi, A.; Wolf, F.; Gundesweiler, B.: Magnetic Flux Control through Magnetic Shape Memory Alloys in Reluctance Actuators. ETG-Fachbericht 159: IKMT 2019, 10.-11.09.2019, S. 58 - 63.
MAR21	MarketAndMarket: Market Research Report - Actuators Market by Actuation (Electrical, Pneumatic, Hydraulic), Type (Linear, Rotary), Application (Industrial Automation, Robotics, Vehicles & Equipment), Vertical (Automotive, Electronics, Healthcare), and Region - Global Forecast to 2027. URL: https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/global-actuators-market-9465451.html?gclid=Cj0KCQjwvO2IBhCzARIsALw3ASq0QXSQR7unnXNv3ueaDPgGjx7BYpaeUooASc3DWlvZBKfGamuVEsaAgHpEALw_wcB . (Zugriff: 17.08.2021).
PAG18	Pagounis, E.; Müllner, P.: Material and Actuator Solutions for Advanced Magnetic Shape Memory Devices. 16th International Conference on New Actuators, Bremen, Germany, 25 – 27. Juni 2018. S. 205 - 211.
WIE13	Wiedemann, D.: Permanent Magnet Reluctance Actuators for Vibration Testing. Dissertation, Technische Universität München, 2013.