

MSM-Greifer mit stationärer Aktuierung

MSM Gripper with Stationary Actuation

Prof. Dr. Arif Kazi, Markus Raab, Bernhard Ernst – Hochschule Aalen, Fakultät für Optik u. Mechatronik, 73430 Aalen;
Thomas Schiepp, Dr. Markus Laufenberg – ETO MAGNETIC GmbH, 78333 Stockach

Kurzfassung

Konventionelle Greifer für die Handhabung von kleinen Werkstücken sind meist um ein Vielfaches größer und schwerer als das handzuhabende Objekt. Die Energie- bzw. Medienzufuhr erfolgt über bewegte Kabel und Schläuche; diese sind verschleißanfällig. Die vorliegende Arbeit schlägt ein neues Greiferkonzept auf der Basis von magnetischen Formgedächtnislegierungen (engl. Magnetic Shape Memory Alloys, MSM) vor: Im Greifer integrierte MSM-Elemente werden über stationäre Magnetbaugruppen (elektro- oder permanentmagnetisch) an den Greif- bzw. Absetzpositionen des Werkstücks aktuiert. Der Ansatz erlaubt die Realisierung von kompakten und leichten Greifern, die zudem kabellos arbeiten. Für den Einsatz in Greifern ist insbesondere auch das magnetische Stauchen von MSM-Elementen interessant. Dieser Aspekt wird in Simulation und Experiment untersucht und ein Demonstrator für einen MSM-Greifer präsentiert.

Abstract

Conventional grippers for the handling of small work pieces usually exceed the handled object by far in weight and size. Energy and media are supplied via moving cables and hoses, which are prone to wear. This study suggests a new gripper concept utilizing Magnetic Shape Memory Alloys (MSM): the MSM elements integrated in the gripper are actuated by stationary magnet assemblies (based on permanent or electro-magnets) located at the pick-up and drop-off positions of the work piece. This approach allows for compact and light-weight grippers which do not require moving cables. For the application in grippers, the magnetic contraction of MSM elements is of particular interest. This aspect is investigated in simulation and experiment, and a demonstrator of an MSM gripper is presented.

1 Einleitung

Magnetische Formgedächtnislegierungen (engl. Magnetic Shape Memory Alloys, MSM) aus NiMnGa ändern unter dem Einfluss externer Magnetfelder ihre Gestalt. Mit kommerziellen Legierungen können Dehnungen von 6% erzeugt werden [1]. Die Reaktion erfolgt dabei um ein bis zwei Größenordnungen schneller als bei den bekannteren thermischen Formgedächtnislegierungen [2]. Die kleine Größe, das geringe Gewicht und die einfache Geometrie der MSM-Elemente bieten eine gute Grundlage für die Realisierung von kompakten und leichten Aktoren. Die innere Reibung im Material (sog. „Twinning Stress“) ermöglicht Aktoren, die ihre Position ohne externe Energiezufuhr halten.

Die genannten Eigenschaften machten MSM-Aktoren auch für Greifer in der Handhabungstechnik interessant. Gerade bei Handhabung von kleinen Werkstücken übersteigen Baugröße und Gewicht von konventionellen (elektromotorisch, elektromagnetisch oder pneumatisch angetriebenen) Greifern die des handzuhabenden Objektes oft um ein Vielfaches. Bei räumlich beengten Verhältnissen wird auch die Energie- bzw. Medienzuführung über verschleißanfällige Kabel und Schläuche zum Problem.

Ein bereits vor einigen Jahren entwickelter MSM-Greifer [3, 4] zielt auf die Handhabung von Mikro-Werkstücken. Er basiert auf einem MSM-Element von $3 \times 5 \times 9 \text{ mm}^3$, das gegen eine mechanische Feder arbeitet. Der Greifer erzeugt eine Greifkraft von 0,6 N bei einem Hub von 2,8 mm.

Neueren Datums ist ein MSM-Greifer [5], der auf einem antagonistischen Konzept basiert: Zwei MSM-Elemente wirken einander entgegengesetzt, um den Greifer zu öffnen und zu schließen. Beide MSM-Greifer haben bezogen auf Größe, Gewicht und Verkabelung keine entscheidenden Vorteile gegenüber konventionellen Greifern. Dies liegt in erster Linie an den in die Greifer integrierten voluminösen elektrischen Spulen zur Erzeugung des Magnetfelds.

Im industriellen Einsatz nehmen Greifer häufig ein Werkstück an einer fest vorgegebenen Position auf und setzen es an einer anderen fest vorgegebenen Position wieder ab. Vor diesem Hintergrund schlägt die vorliegende Arbeit eine Trennung von MSM-Element und Magnetfeld-Erzeugung vor [6]: Das MSM-Element ist im Greifer integriert, während das Magnetfeld durch ortsfeste Baugruppen an den Greif- bzw. Absetzpositionen des Werkstücks erzeugt wird („stationäre Aktuierung“, s. Bild 1).

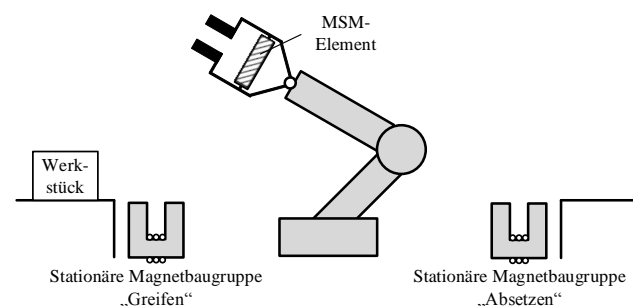


Bild 1 Trennung von MSM-Element (im Greifer) und Magnetfeld-Erzeugung („stationäre Aktuierung“)

Die funktionale Trennung zwischen bewegtem MSM-Element und stationären Magnetfeld-erzeugenden Baugruppen führt zu sehr kompakten und leichten Greifern. Diese benötigen keine bewegte Verkabelung; sie sind einfach und robust.

Die räumliche Trennung der Positionen für das Öffnen und Schließen des Greifers ermöglicht eine flexible Gestaltung der ortsfesten Magnetbaugruppen bis hin zur Nutzung von Permanentmagneten. Die magnetische Feldstärke wird über den Abstand zwischen Permanentmagnet und MSM-Element gesteuert: Nähert sich der Greifer der stationären Magnetanordnung, so führt er die vorgesehene Bewegung (Greifen bzw. Loslassen des Werkstücks) aus – die magnetische Formgedächtnislegierung wird als „intelligentes Material“ genutzt. Seltene-Erden-Permanentmagnete besitzen eine hohe Energiedichte; dies ermöglicht räumlich sehr kompakte stationäre Baugruppen. Weiterhin kann auf eine Ansteuerung vollständig verzichtet werden, was Aufwand und Kosten reduziert.

Das folgende Kapitel 2 stellt zunächst grundsätzliche Konzeptüberlegungen zu MSM-Greifern an. Kapitel 3 untersucht experimentell, ob ein MSM-Element für die Betätigung eines Greifers ausreichende Kräfte entwickelt, wenn es mittels Permanentmagnet-Baugruppen magnetisch gedehnt und gestaucht wird. Kapitel 4 geht dann auf den realisierten Demonstrator für einen MSM-Greifer ein. In Kapitel 5 wird schließlich das Konzept für einen elektromagnetisch aktuierten MSM-Greifer für höhere Greifkräfte vorgestellt.

2 Greiferkonzepte

Dieses Kapitel untersucht verschiedene Anordnungen von MSM-Elementen in einem Greifer. Anschließend werden stationäre Magnetbaugruppen mit Permanent- bzw. Elektromagneten analysiert. Das Kapitel schließt mit der Darstellung sinnvoller Kombinationen.

2.1 Anordnung der MSM-Elemente

Wird ein MSM-Element einem Magnetfeld ausgesetzt, das senkrecht zur seiner Achse gerichtet ist, so dehnt es sich in Achsrichtung aus, während es in Magnetfeldrichtung volumenerhaltend kontrahiert. Für die Realisierung von Aktoren wurde bislang überwiegend die Dehnung des Materials in Achsrichtung genutzt. In der typischen Aktor-Konfiguration dehnt sich das MSM-Element gegen eine mechanische Feder, die die Rückstellbewegung übernimmt („Push“-Aktor, s. Bild 2a). Ebenfalls gebräuchlich ist eine antagonistische Anordnung, bei der sich zwei MSM-Elemente wechselweise dehnen („Push-Push“-Aktor [7], s. Bild 2b). Ein dritter Ansatz nutzt gleichzeitig die magnetfeld-induzierte Dehnung und Stauchung eines MSM-Elements („Push-Pull“-Aktor [8], s. Bild 2c).

Ein MSM-Greifer mit stationärer Aktuierung erhält seine Greifkraft zwischen Greif- und Absetzposition aufgrund der inneren Reibung im MSM-Element ohne externe Energiezufuhr aufrecht. Der in Bild 2a dargestellte „Push“-Aktor mit Rückstellfeder kann das nicht gewährleisten.

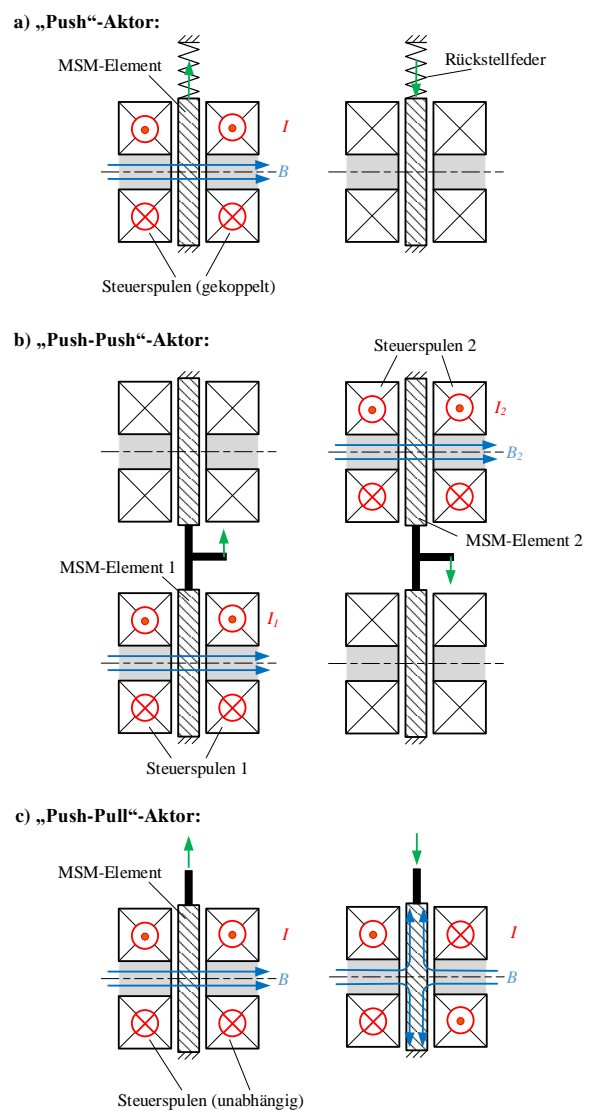
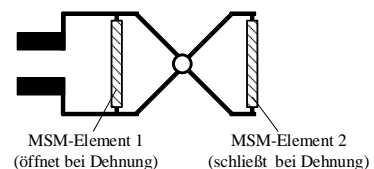


Bild 2 Bauformen von MSM-Aktoren

Analog zu Bild 2b kann ein MSM-Greifer aber zwei antagonistisch angeordnete MSM-Elemente enthalten, die sich beim Öffnen und Schließen wechselweise dehnen („Push-Push“-Greifer, s. Bild 3a). Alternativ kann ein einzelnes MSM-Element wechselweise magnetisch gedehnt und gestaucht werden („Push-Pull“-Greifer, s. Bild 3b).

a) „Push-Push“-Greifer:



b) „Push-Pull“-Greifer:

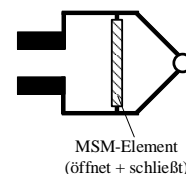


Bild 3 Anordnungen der MSM-Elemente im Greifer

2.2 Stationäre Magnetbaugruppen mit Permanentmagneten

Neben der Anordnung der MSM-Elemente ist auch die Auslegung der stationären Magnetbaugruppen entscheidend für die Greiferfunktion. Konkret stellt sich die Frage, ob ausreichend hohe magnetische Flussdichten von $>0,6$ T mit Hilfe von Permanentmagneten aus seltenen Erden (z.B. NdFeB) realisiert werden können. Speziell die Erzeugung des „stauenden“ Magnetfeldes parallel zur Achse des MSM-Elements stellt dabei eine Herausforderung dar.

Zur Beantwortung dieser Fragen wurden verschiedene Permanentmagnet-Anordnungen mit 2D-Magnetfeld-Simulationen untersucht. Senkrecht zur Achse des MSM-Elements ausgerichtete Magnetfelder lassen sich über gleichsinnig ausgerichtete Permanentmagneten realisieren. Die Magnetfeld-Simulation von zwei gleichsinnig angeordneten NdFeB-Magneten (jeweils 25×5 mm² in einem Abstand von 3,3 mm) ergibt eine gleichmäßige Flussdichte von mehr als 0,9 T über die gesamte Länge des MSM-Elements (s. Bild 4).

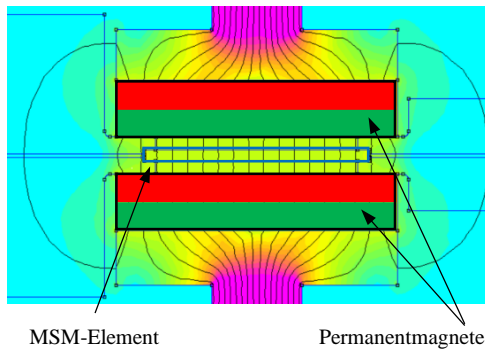


Bild 4 Feldverlauf bei gleichsinnigen NdFeB-Magneten

Schwieriger ist die Erzeugung von parallel zur Achse des MSM-Elements gerichteten Magnetfeldern. Eine gegensinnige Anordnung von Permanentmagneten analog zu Bild 2c ergibt in der Simulation nur in den Randbereichen des MSM-Elements ausreichend hohe magnetische Flussdichten (s. Bild 5).

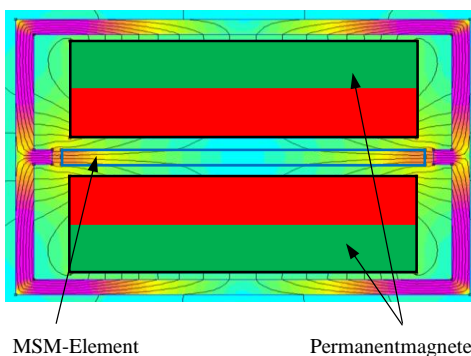


Bild 5 Feldverlauf bei gegensinnigen NdFeB-Magneten

Eine gleichmäßigere Verteilung der Flussdichte erhält man bei einer Anordnung der Permanentmagneten parallel zur Achse des MSM-Elements. Aufgrund des langen Luftspalts ergab die Simulation hier allerdings nur Flussdichten

von $<0,5$ T. Lenkt man den magnetischen Fluss an den Enden der Permanentmagnete aber mit einer Halbch-Anordnung zum MSM-Element hin um, dann lassen sich Flussdichten von 0,75 T und mehr realisieren (vgl. Bild 6). Auch hier haben die Permanentmagnete sehr kompakte Querschnitte (jeweils 21×5 mm² in einem Abstand von 5 mm).

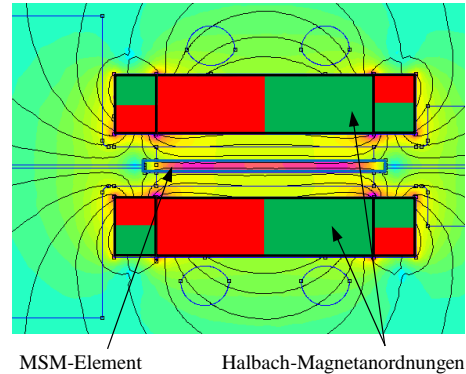


Bild 6 Feldverlauf bei symmetrischer Halbch-Anordnung

Die dargestellten Simulationsergebnisse zeigen, dass sich mit NdFeB-Magneten ausreichend starke Magnetfelder nicht nur für eine Dehnung, sondern auch für eine Stauung der MSM-Elemente in einem Greifer realisieren lassen. Für die Stauung eines MSM-Elements erscheint die spiegelsymmetrische Halbch-Anordnung der Magnete gut geeignet. Die betrachteten Magnetbaugruppen sind mit einem Footprint von max. 25×15 mm² sehr kompakt.

2.3 Stationäre Magnetbaugruppen mit Elektromagneten

Stationäre Baugruppen mit Elektromagneten bauen größer als solche mit Permanentmagneten. Der Einsatz von Elektromagneten hat aber den Vorteil, dass sich der Zeitpunkt der Greiferbetätigung von der räumlichen Position des Greifers entkoppeln lässt. Zudem lassen sich ggf. störende Reluktanzkräfte auf den Greifer minimieren.

Parameterstudien zeigten, dass sich mit üblichen Magnetspulen (1122 Windungen, 2,8 A Spulenstrom) in einem Luftspaltquerschnitt von 5×5 mm² magnetische Flussdichten von 1 T und mehr erzeugen lassen. Der Bauraum einer solchen stationären Baugruppe wurde mit ca. $45 \times 60 \times 70$ mm³ abgeschätzt. Bei der Optimierung der Flussdichte hilft eine Ansträgung der Pole (s. Bild 7).

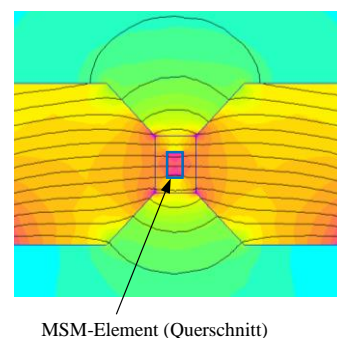


Bild 7 Feldverlauf bei Elektromagnet mit angeschrägten Polen

Schwieriger ist allerdings wiederum die Realisierung von Magnetfeldern, die parallel zur Achse des MSM-Elements orientiert sind. Es ist z.B. konstruktiv kaum möglich, das MSM-Element in der Mitte einer stromdurchflossenen Spule anzuordnen, da sich der Greifer – typischerweise montiert an einem Roboterarm o.ä. – ungehindert aus der Magnetbaugruppe herausbewegen können muss. Bei gegensinnigen Magnetfeldern führt der Feldverlauf zu ungleichmäßig verteilten Flussdichten; Stauchung und Stellkraft des MSM-Elements bleiben gering (vgl. Bild 5). Die elektromagnetische Erzeugung von parallel zur Achse des MSM gerichteten Magnetfeldern wurde daher in dieser Studie nicht weiter verfolgt.

2.4 Konzepte für Greifersysteme

Das antagonistische Prinzip basiert auf einem wechselseitigen Dehnen von MSM-Elementen. Es erfordert nur senkrecht zur Achse der MSM-Elemente gerichtete Magnetfelder. Diese können mit Elektromagneten einfach realisiert werden. Entsprechend bietet es sich an, die elektromagnetische Aktuierung mit einer „Push-Push“-Anordnung von MSM-Elementen (vgl. Bild 3a) zu kombinieren.

Mit Hilfe von stationären Permanentmagnet-Baugruppen ist es dagegen möglich, ein MSM-Element wechselweise magnetisch zu dehnen und zu stauchen. Hier erscheint auch eine „Push-Pull“-Anordnung der MSM-Elemente (vgl. Bild 3b) sinnvoll.

Die Kapitel 3 und 4 dieser Veröffentlichung betrachten die Realisierung eines „Push-Pull“-Greifers in Kombination mit ortsfesten Permanentmagnet-Baugruppen. Kapitel 5 stellt dann einen „Push-Push“-Greifer vor, bei dem das Magnetfeld über stationäre Elektromagnet-Baugruppen erzeugt wird.

3 Experimentelle Untersuchungen

Im folgenden Schritt wurde in einem Teststand experimentell untersucht, welche Kräfte ein MSM-Element beim Dehnen und Stauchen durch Permanentmagnet-Baugruppen entwickelt. Speziell zum magnetischen Stauchen von MSM-Elementen lagen bislang nur wenig experimentelle Ergebnisse vor.

Für die Experimente wurde ein MSM-Element mit einer Größe von $1 \times 2,5 \times 20 \text{ mm}^3$ der Fa. Adaptamat Oy herangezogen. Die Magnetbaugruppe für das Dehnen wurde mit gleichsinnig angeordneten NdFeB-Magneten realisiert (beidseits $25 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$, vgl. Bild 4). Die Baugruppe für das Stauchen basierte auf einer symmetrischen Halbach-Anordnung (Magnetvolumina von je $25 \times 6 \times 6 \text{ mm}^3$, vgl. Bild 6). Die mittleren Flussdichten im MSM-Element wurden für die Dehnungs-Magnete mittels 3D-Magnetfeld-Simulationen zu ca. 0,65 T abgeschätzt. Für die Stauchungs-Magnete ergab die Berechnung mittlere Flussdichten zwischen 0,4 T (MSM-Element gedehnt, $\mu_r=2$) und $>1 \text{ T}$ (MSM-Element gestaucht, $\mu_r>10$). Bild 8 zeigt Aufnahmen von Versuchsstand und Halbach-Magnetbaugruppe.

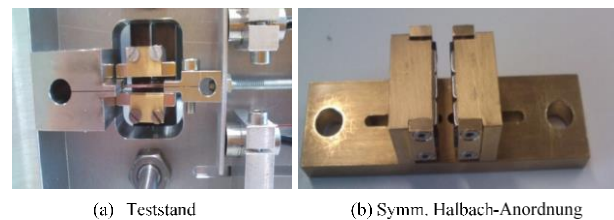


Bild 8 Testaufbau für die Messung von Stell- und Haltekraften

In den Versuchen wurde die generierte Kraft in Abhängigkeit von der Auslenkung des MSM-Elements aufgezeichnet. Zunächst wurde die gleichsinnige Magnetanordnung zur Erzeugung von Dehnungen getestet: Das MSM-Element konnte sich unter der Wirkung des Magnetfelds bis zu einem mechanischen Anschlag dehnen; dort wurde jeweils die generierte Stellkraft gemessen. Anschließend kam die symmetrische Halbach-Anordnung zum Einsatz: Das MSM-Element kontrahierte unter der Wirkung des Magnetfelds bis zu dem an verschiedenen Position fixierten Anschlag, an dem wiederum die ausgeübte Stellkraft gemessen wurde. Bild 9 zeigt die vom MSM-Element generierte Stellkraft für Dehnung bzw. Stauchung (jeweils drei Messreihen).

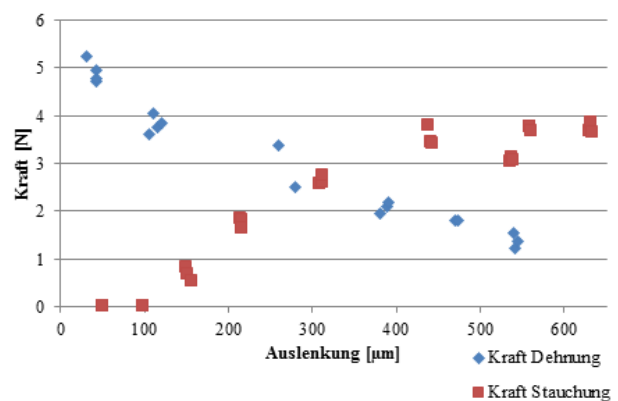


Bild 9 Generierte Stellkraft für Dehnung und Stauchung

Bei der Dehnung betrug die maximale Druckkraft ca. 5 N, sie nahm näherungsweise linear mit der Auslenkung ab. Die gemessenen Werte passen sehr gut zu Messungen, die zuvor mit demselben MSM-Element in einem Aktor bei einer Flussdichte von 0,6 T gemacht worden waren.

Bei der Stauchung erzeugte das MSM-Element eine Zugkraft von maximal ca. 4 N, also etwas weniger als bei der Dehnung. Interessanterweise hängt die erzeugte Kraft über weite Bereiche weniger stark von der Auslenkung ab – bei einem MSM-Greifer ein durchaus wünschenswerter Effekt. Eine mögliche Erklärung für die geringere Abhängigkeit der generierten Kraft von der Auslenkung ist, dass die magnetische Flussdichte im MSM-Element aufgrund der steigenden Permeabilität des MSM-Materials mit der Kontraktion zunimmt. Der hieraus resultierende Kraftanstieg wirkt der Abhängigkeit der Kraft von der Auslenkung entgegen und kompensiert diese teilweise. Zur Klärung dieses Effekts sind aber weitere Analysen erforderlich.

Die Versuchsreihe weist nach, dass ein einzelnes MSM-Element ausreichende Kräfte für das Öffnen und Schließen eines Miniatur-Greifers erzeugen kann. Insbesondere liegt die generierte Stellkraft bei der Stauchung in derselben Größenordnung wie die Kraft bei einer Dehnung, und der Verlauf der Kraft über die Auslenkung ist eher günstiger. Bei dem im folgenden Kapitel beschriebenen Demonstrator wurde die magnetische Stauchung des MSM-Elements für den eigentlichen Greifvorgang genutzt.

4 Greifer-Demonstrator

Bei einem MSM-Greifer sollte das MSM-Element eine gute Balance zwischen magnetisch generierbarer Stellkraft und Haltekraft ohne Magnetfeld aufweisen. Im Demonstrator wurde ein MSM-Element mit den Abmessungen $2 \times 3 \times 15 \text{ mm}^3$ (d.h. ca. der doppelten Querschnittsfläche des Elements in Kap. 3) der Fa. ETO MAGNETIC GmbH verwendet. Entsprechend lag die Haltekraft mit ca. 3 N bei ca. dem doppelten Wert (Twinning Stress bei beiden Elementen ca. 0,5 MPa). Die Magnetbaugruppen wurden analog zu Kap. 3 realisiert. Bei der Magnetanordnung für das Dehnen des MSM-Elements (d.h. das Öffnen des Greifers) konnte auf einen der beiden Permanentmagnete verzichtet werden, da die Kraft des MSM-Elements für das Öffnen des Greifers mehr als ausreichend war.

Im Demonstrator wird der Bewegungsfreiheitsgrad des Greifers über ein Festkörpergelenk („Biegebalken“) realisiert. Die Auslenkung des MSM-Elements wird durch die Hebelverhältnisse im Greifer verdoppelt, seine Kraft hingegen halbiert. Der Greifer wurde exemplarisch für das Greifen von zylinderförmigen Objekten mit 15 mm Durchmesser ausgelegt (s. Bild 10).

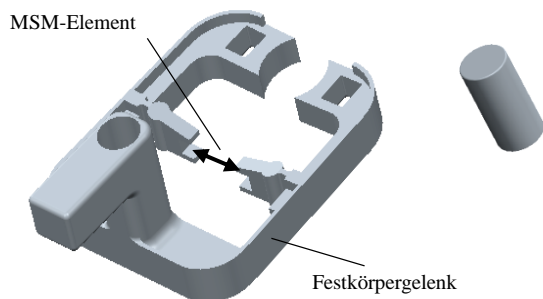


Bild 10 Geometrie von Greifer und Werkstück

Die Greifermechanik wurde mit einem 3D-Druckverfahren aus Kunststoff gefertigt. Der Greifer ist drehbar gelagert und kann manuell zwischen der Greif- und der Absetzposition des Werkstücks geschwenkt werden (s. Bild 11).

Der 9 g schwere Demonstrator greift zuverlässig Objekte, die mehr als das Doppelte seines Eigengewichts wiegen. Der Reibkontakt zwischen Greifer und Werkstück wurde dabei nicht optimiert. Die Haltekraft des MSM-Elements würde erwarten lassen, dass noch schwerere Objekte manipuliert werden können. Allerdings erwies sich die Kunststoff-Struktur des Greifers als zu nachgiebig. Bei einer Optimierung der Steifigkeit und ggf. einer zusätzlichen

mechanischen Federvorspannung des MSM-Elements sollte sich die Tragkraft des Greifers deutlich erhöhen lassen.

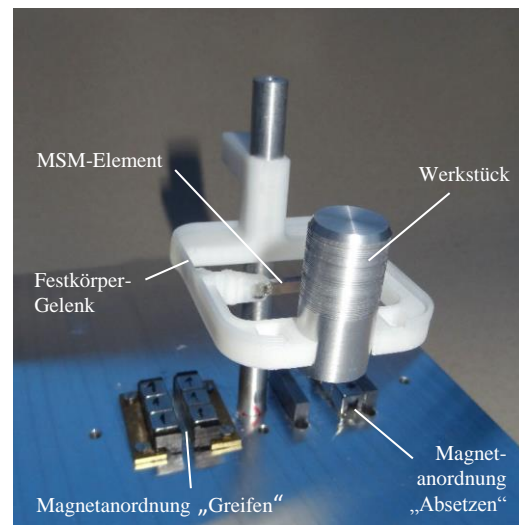


Bild 11 Demonstrator für MSM-Greifer

5 Elektromagnetisch aktiver MSM-Greifer

Mit dem Demonstrator konnte gezeigt werden, dass ein Miniatur-MSM-Greifer kleine Werkstücke greifen und halten kann. Das Schalten des Greifers erfolgt dabei über stationäre Permanentmagnet-Baugruppen.

Das Manipulieren von größeren Werkstücken erfordert größere Greiferkräfte, die ohne externe Energiezufuhr aufrechterhalten werden. Die Greiferkraft wird aber durch die Haltekraft der MSM-Elemente bestimmt. Die Haltekraft kann erhöht werden, indem MSM-Elemente mit größeren Querschnitten und höherem Twinning Stress gewählt werden. Diese Elemente erfordern aber stärkere Magnetfelder, die wiederum über stationäre Elektromagnete generiert werden können. Bild 12 zeigt die konstruktive Ausführung eines elektromagnetisch aktuierten MSM-Greifersystems für größere Werkstücke, der auf einer antagonistischen („Push-Push“) Anordnung von MSM-Elementen (analog zu Bild 3a) beruht. Die antagonistischen MSM-Elemente sind im Greifer in einer deformierbaren Kniehebelstruktur angeordnet.

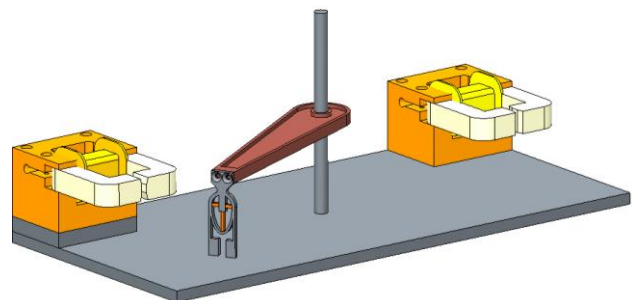


Bild 12 MSM-Greifer mit elektromagnetischer Aktuierung

6 Zusammenfassung

Stationär aktuierte MSM-Greifer können über elektro- oder permanentmagnetische Baugruppen an den Greif- und Absetzpositionen des Werkstücks geöffnet bzw. geschlossen werden. Die Aktuierung mit Seltene-Erden-Permanentmagneten ist einfach und kompakt; sie bietet sich insbesondere bei sehr kleinen Werkstücken an. Die elektromagnetische Aktuierung kann größere Greif- und Haltekräfte generieren. Ihr Hauptvorteil besteht darin, dass der Zeitpunkt der Betätigung des Greifers unabhängig von der räumlichen Position ist. Für eine elektromagnetische Aktuierung erscheinen antagonistische „Push-Push“-Greifer mit zwei MSM-Elementen am besten geeignet. Permanentmagnetisch aktuierte Greifer können hingegen auch nach dem „Push-Pull“-Prinzip mit einem einzelnen MSM-Element arbeiten.

Existierende MSM-Aktoren arbeiten überwiegend über die Dehnung der MSM-Elemente. In dieser Studie wurde speziell auch das magnetische Stauchen von MSM-Elementen untersucht. Für das permanentmagnetische Stauchen wird ein symmetrisches Halbach-Array vorgeschlagen. Simulationen zeigen, dass sich hiermit magnetische Flussdichten von >1 T erreichen lassen. Im Experiment waren die Kräfte beim Stauchen etwas niedriger als beim Dehnen (ca. 4 N ggü. 5 N bei einem MSM-Element von $1 \times 2,5 \times 20$ mm³).

Basierend auf den vorangehenden Untersuchungen wurde ein Demonstrator für einen MSM-Greifer aufgebaut. Der Greifer wurde mit einem 3D-Druckverfahren in Kunststoff hergestellt. Der 9 g schwere Greifer greift Objekte mit seinem doppelten Eigengewicht zuverlässig. Es wird erwartet, dass ein in Bezug auf Steifigkeit und Haltekraft optimierter Greifer deutlich schwerere Objekte manipulieren kann.

Das Konzept für einen MSM-Greifer für schwerere Werkstücke beruht auf antagonistisch angeordneten MSM-Elementen in einer deformierbaren Kniehebel-Kinematik; das Schalten des Greifers erfolgt über stationäre Elektromagnet-Baugruppen. Es ist geplant, den Prototyp eines solchen MSM-Greifers auf der Hannover Messe 2015 vorzustellen.

7 Literatur

- [1] Janocha, H.: *Unkonventionelle Aktoren*. München: Oldenbourg Verlag, 2013.
- [2] Suorsa, I.; Pagounis, E.; Ullakko, K.: *Magnetic shape memory actuator performance*. J. Magn. Mater. (2004), S. 2029-2030.
- [3] Guldbakke, J.-M.; Rolfs, K.; Mecklenburg, A.; Raatz, A.; Hesselbach, J.; Schneider, R.: *A miniaturized gripper driven by magnetic shape memory alloy single actuator*. In: Actuator 2008. 9.-11. Juni 2008, Bremen. S. 880-882.
- [4] https://www.tu-braunschweig.de/iwf/fup/mf/forschung/mechatronik_adaptronik-und-smart-materials/mfgl-aktoren/index.html
- [5] Laufenberg, M.: *Advanced magnetic shape memory technology based on MAGNETOSHAPE® materials*. In: Exhibition Forum of Actuator 2014, 23.-25. Juni 2014, Bremen.
- [6] Patentanmeldung DE 10 2014 110 954.6 der ETO MAGNETIC GmbH (unveröffentlicht)
- [7] Gauthier, J.; Hubert, A.; Abadie, J.; Lexellent, C.; Chaillet, N.: *Multistable actuator based on magnetic shape memory alloys*. In: Actuator 2006. 14.-16. Juni 2006, Bremen. S. 787-790.
- [8] Holz, B.; Riccardi, L.; Janocha, H.; Naso, D.: *MSM Actuators: Design Rules and Control Strategies*. Advanced Engineering Materials (2012), 14-8, S. 668-681.