

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges
Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales
Veröffentlichungsdatum
18. Februar 2016 (18.02.2016)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2016/023922 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

H01L 41/06 (2006.01) H02N 2/02 (2006.01)
H01L 41/12 (2006.01) F16K 31/06 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2015/068500

(22) Internationales Anmeldedatum:
11. August 2015 (11.08.2015)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2014 111 388.8
11. August 2014 (11.08.2014) DE

(71) Anmelder: FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR
FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG
E.V. [DE/DE]; Hansastraße 27 c, 80686 München (DE).

(72) Erfinder: NEUBERT, Holger; Jägerstraße 23a, 01099
Dresden (DE). EHLE, Fabian; Sebnitzer Straße 37, 01099
Dresden (DE). ZISKE, Johannes; Friedensstraße 37,
01097 Dresden (DE).

(74) Anwalt: PITTSCH, Matthias; Lippert, Stachow & Partner,
Krenkelstraße 3, 01309 Dresden (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,

AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW,
BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK,
DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM,
GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP,
KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME,
MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ,
OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA,
SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM,
TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM,
ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,
GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST,
SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG,
KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH,
CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE,
IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO,
RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM,
GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

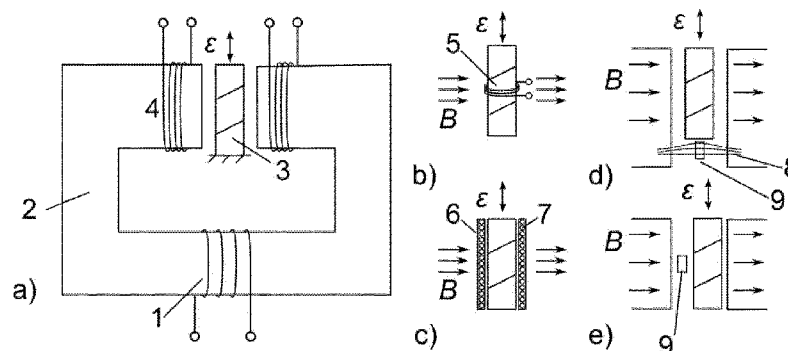
- hinsichtlich der Identität des Erfinders (Regel 4.17 Ziffer i)
- hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, ein Patent zu
beantragen und zu erhalten (Regel 4.17 Ziffer ii)

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: ACTUATOR ARRANGEMENT COMPRISING A MAGNETIC SHAPE-MEMORY ALLOY

(54) Bezeichnung : AKTORANORDNUNG MIT MAGNETISCHER FORMGEDÄCHTNISLEGIERUNG

FIG. 6



(57) Abstract: The invention relates to an actuator arrangement which comprises an actuating element which is composed of a magnetic shape-memory material, a solenoid which can be driven and has at least one ferromagnetic flux-conducting element and at least one field coil which is arranged on the flux-conducting element, wherein the actuating element is arranged in an air gap in the flux-conducting element in such a way that a magnetic field which is generated by driving the solenoid penetrates the actuating element and causes the length of the actuator element to change, wherein the actuator arrangement has a measuring means which generates a measurable electrical signal, the value of said electrical signal changing depending on the expansion of the magnetic shape-memory material and the current which is impressed into the solenoid.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2016/023922 A1



-
- hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, die Priorität einer früheren Anmeldung zu beanspruchen (Regel 4.17 Ziffer iii) — **Veröffentlicht:** mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

Die Erfindung betrifft eine Aktoranordnung, die ein Stellelement aus einem magnetischen Formgedächtnismaterial, einen ansteuerbaren Elektromagneten mit mindestens einem ferromagnetischen Flussleitelement und mindestens einer auf dem Flussleitelement angeordneten Erregerspule umfasst, wobei das Stellelement in einem Luftspalt des Flussleitelements so angeordnet ist, dass ein durch Ansteuern des Elektromagneten erzeugtes magnetisches Feld das Stellelement durchdringt und eine Längenänderung des Stellelements bewirkt, wobei die Aktoranordnung ein Messmittel aufweist, das ein messbares elektrisches Signal erzeugt, dessen Betrag sich abhängig von der Dehnung des magnetischen Formgedächtnismaterials und dem in den Elektromagneten eingeprägten Strom ändert.

Aktoranordnung mit magnetischer Formgedächtnislegierung

Die Erfindung betrifft einen kraftgeregelten Aktor mit
5 magnetischer Formgedächtnislegierung und dessen Verwendung.

Magnetische Formgedächtnislegierungen sind eine relativ neue Klasse von Festkörperaktoren. Sie ändern in verhältnismäßig geringen äußeren Magnetfeldern ($< 1 \text{ T}$) ihre Form. Diese Formänderung ergibt sich aus der Bewegung von

10 Zwillingsgrenzen innerhalb einer martensitischen Phase, was zu einer Dehnung des Einkristalls führt. Nähere Ausführungen dazu sind in EP 0 997 953 A1 oder in der zugehörigen Veröffentlichung (Ullakko, K.; et al. Appl. Phys. Lett., 69, 1996, 1966-1968) zu finden. Besonders große und

15 langzeitstabile magnetfeldinduzierte Dehnungen werden in Ni_2MnGa -Legierungen beobachtet. Aktuelle Legierungen weisen Dehnungen von 6 % bei Druckspannungen bis ca. 2,0 MPa auf. Daraus ergeben sich Energiedichten größer 100 kJ/m^3 . Maximale

Betriebsfrequenzen liegen im einstelligen kHz-Bereich und

20 Zyklenfestigkeiten von $>10^8$ Zyklen sind gemessen worden.

Aufgrund dieser vorteilhaften Eigenschaften leitet sich die aktorische Nutzung dieser Legierungen ab. Die dafür am häufigsten genutzte Grundstruktur ist eine quaderförmige Probe, die parallel zu den kürzesten Kanten mit einem

25 äußeren Magnetfeld B beaufschlagt wird. Dies bewirkt eine Bewegung der Zwillingsgrenzen, sodass sich das Element entlang der längsten Kanten dehnt und bei angeschlossener Last Arbeit verrichtet. Die Rückstellung des Elements erfolgt durch eine Kraft bzw. Druckspannung σ entgegen der
30 Ausdehnungsrichtung.

Unter den elektrisch angetriebenen Greifern dominieren solche mit rotatorischen elektromagnetischen oder elektrodynamischen Antrieben. Ohne zusätzliche Rückstellelemente sind in der offenen Steuerkette keine

stabilen Positionen anfahrbar. Ein beliebig langsames, das Greifobjekt schonende Anfahren einer bestimmten Greifposition ist somit nur durch zusätzliche Übersetzungs- und Koppelgetrieben und/oder Rotations-Translations-Umformer möglich. Diese Elemente verringern einerseits den Gesamtwirkungsgrad, erzeugen andererseits zusätzlichen Bauraum und bewegte Masse. Ist die Greifkraft zu steuern, oder zu regeln oder eine Greifobjekterkennung nötig, ist dies über die Begrenzung des Motorstroms nur ungenau möglich bzw. sind zusätzliche Sensoren nötig. Diese sind häufig nicht in den Antrieb integriert, sodass auch hierbei zusätzliche Bauteile und somit Bauraum und Masse anfallen.

Während Greifer mit thermischen Formgedächtnislegierungen (SMA) Stand der Technik sind, werden in wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Schutzrechten kaum Greifer mit Aktoren aus magnetischen Formgedächtnislegierungen (MSM) beschrieben. In WO 99/045631 A1 und WO 97/003472 A1 ist der Einsatz von MSM-Aktoren im Bereich der Automatisierung und der Manipulatoren lediglich erwähnt. Ein Prototyp ist in *J. Guldbakke, et.al. ACTUATOR 2008, pp. 880-882* veröffentlicht. Bisher nicht beschrieben ist die gleichzeitige Ausnutzung des magnetischen Formgedächtnismaterials für aktorische und sensorische Aufgaben in der Greiftechnik.

Die rein sensorische Nutzung von magnetischen Formgedächtnislegierungen ist unter anderem in:

- WO 2003/078922 A1
- WO 2013/079794 A1
- US 2013/091954 A1
- DE 10 2010 032 690 A1

beschrieben. Hierbei wird jedoch kein konkreter Zusammenhang

zur Aktorik und insbesondere nicht zur Greiftechnik hergestellt. Damit sind auch die Möglichkeiten der integrierten Greifobjekterkennung, Greifkraftregelung usw. bisher nicht erfasst.

5 Nachteile der bisherigen Lösungen im Hinblick auf die Aktorik:

- keine von der Greiferposition unabhängige Greifkraft bei bestimmtem Ansteuerstrom,
- Kraftgradient über dem Weg verhindert quasistatische
10 (langsame) Zustellung der Greiforgane,
- keine stabile Position an jeder Hubposition ohne Rückstellelement,
- stromlos keine oder nur sehr geringe hysteresesebedingte Haltekräfte,

15 Nachteile der bisherigen Lösungen im Hinblick auf die integrierte Sensorik:

- keine intrinsische Greifobjekterkennung, Weg- oder Kraftmessung

Aufgabe der Erfindung ist es, einen miniaturisierten,
20 funktionsintegrierten Antrieb für Greifer zu entwickeln.

Die Erfindung beschreibt einen Antrieb mit einem Bauelement aus einer magnetischen Formgedächtnislegierung zur vorzugsweisen, aber nicht ausschließlichen Anwendung in Greifern oder anderen mechanischen Endeffektoren in der
25 Handhabungsautomatisierung. Neben dem Aufbringen von Greifkraft und Greifweg wird das magnetische Formgedächtnismaterial ausgenutzt, um eine integrierte Greifkraftsteuerung in offener oder geschlossener Steuerkette sowie eine integrierte Positionsmessung der

Greiffeffektoren zu realisieren.

Aus eigenen Messungen und einer Vielzahl an Veröffentlichungen ist bekannt, dass magnetische Formgedächtnislegierungen über den Großteil ihres nutzbaren Hubs eine nahezu lineare Kraft-Weg-Kennlinie aufweisen. Dies erlaubt eine einfache Steuerung der Greifkraft in Abhängigkeit von dem eingeprägten Strom. Weiterhin ist die Blockierkraft im feldfreien Zustand, die sich aus Probenquerschnitt und der sog. Zwillingspannung (twinning stress) σ_{Tw} ergibt, nahezu wegunabhängig. Das Vorhandensein eben dieser inneren Materialspannung ermöglicht weiterhin, dass eine stabile Position an nahezu jeder Hubposition realisierbar ist. Dadurch wird ein beliebig langsames Anfahren einer Position erst möglich.

Die Polarisierung der Martensitvarianten verhält sich, solange die Legierung magnetisch nicht gesättigt ist, etwa proportional zur Dehnung des Elements. Da sich die Polarisierung senkrecht zur eingeprägten, aktorisch genutzten Erregerflussdichte komplementär ändert, diese Richtung aber vektoriell nur mit einem geringen Feld beaufschlagt wird, ergibt sich eine weitere Möglichkeit, intrinsisch die Position zu ermitteln.

Über die Kenntnis des eingeprägten Stroms und ein Rechenmodell lässt sich indirekt die Greifkraft bestimmen und somit - bei geschlossener Steuerkette - auch regeln. Die zugrundeliegenden Zusammenhänge sind schematisch in Fig. 7 dargestellt:

Bei adäquater Gestaltung des Magnetkreises erzeugt der Erregerstrom im magnetischen Formgedächtniswerkstoff ein hinreichend homogenes Magnetfeld, dessen Feldstärke in der Probe überall nahezu gleich ist. Die resultierende Polarisierung in der Probe ist werkstoffspezifisch sowohl vom Dehnungszustand als auch von der Feldstärke abhängig.

Bei Kenntnis dieses Zusammenhangs in einem Rechenmodell kann aus Erregerstrom und gemessener magnetischer Flussdichte oder Polarisierung auf die Dehnung geschlossen werden.

5 Polarisierung und Flussdichte sind wiederum über magnetische Feldkonstante und Feldstärke, die aus dem Strom bekannt ist, miteinander verknüpft.

Mit derart bestimmter Dehnung und Flussdichte sowie dem Vorzeichen der zeitlichen Flussdichteänderung kann auf der Basis der werkstoffspezifischen Hysterese zwischen

10 Flussdichte, mechanischer Spannung und Dehnung auf die mechanische Spannung und damit die Kraft am Abtrieb des magnetischen Formgedächtniselements geschlossen werden.

Zur Messung der magnetischen Flussdichte können aus dem Stand der Technik bekannte Messverfahren ausgenutzt werden,

15 beispielsweise:

1. Messung der magnetischen Flussdichte des Luftspaltstreufeldes im oder neben dem Luftspalt durch

20 a. einen magnetischen Sensor (beispielsweise auf dem Hall-Effekt basierende Sensoren, wie vorgeschlagen für einen Drucksensor in DE 10 2010 032 690 A1 oder auf anderen magnetoresistiven Effekten wie z.B. dem GMR-, AMR- oder TMR-Effekt beruhende Magnetfeldsensoren),

b. eine oder mehrere Messspulen im Magnetkreis, wobei

25 i. eine Erregerspule des Elektromagneten gleichzeitig zur Messung genutzt wird, oder/und

30 ii. eine oder mehrere zusätzliche Messspulen im Magnetkreis ein ferromagnetisches Flussleitstück umschließend, vorzugsweise in unmittelbarer Nähe des Arbeitsluftspalts des

Magnetkreises angeordnet sind, oder/und

- iii. eine oder mehrere zusätzliche Messspulen das MSM-Element umschließend, vorzugsweise in eine Probeführung integriert sind (wie in US 2013/091954 A1 für einen Sensor vorgeschlagen)

Mit Messspulen können nur magnetische Flussänderungen erfasst werden. Zum Fluss durch die Spule und damit zur Flussdichte kommt man durch Zeitintegration der in der Spule induzierten Spannung. Im Fall b.i ist diese induzierte Spannung der den Spulenstrom treibenden Spannung überlagert (entgegengerichtet). In den Fällen b.ii und b.iii wird sie in unabhängigen Messspulen erzeugt. In allen Fällen ist die Zeitintegration erforderlich.

Alternativ kann die Messung folgendermaßen erfolgen:

2. Messung der Induktivität durch

- a. Messung der Resonanzfrequenz eines Schwingkreises, verstimmt durch die Reluktanzänderung des MSM-Elements,

- b. Auswertung der elektrischen Zeitkonstante des Magnetkreises, beeinflusst durch die Reluktanzänderung des MSM-Elements (Konzept überprüft in WO2003078922)

Bei der Messung der Änderung der Resonanzfrequenz eines Schwingkreises wird eine Messspule des Schwingkreises wie in den obigen Beispielen angeordnet wird. Der Schwingkreis kann beispielsweise aus der Erregerspule selbst oder einer zweiten, um das Stellelement gelegten oder gewickelten Spule sowie einem mit dieser Spule parallel oder seriell verschalteten Kondensator bekannter und konstanter Kapazität bestehen. Der Schwingkreis ist Teil einer Messschaltung zur

Bestimmung der Resonanzfrequenz des Schwingkreises.

Die Zeitkonstante des Magnetkreises ist definiert als

$$\tau = L/R.$$

5 Aus dem zeitlichen Verlauf des Stromanstiegs di/dt über der angelegten treibenden Spannung $u(t)$ kann auf die Induktivität geschlossen werden. Bei bekanntem Spulenwiderstand R kann die differentielle Induktivität L_{diff} aus di/dt bestimmt werden:

$$L_{diff} = (u - R \cdot i) / (di/dt)$$

10 Die Induktivität L ergibt sich aus L_{diff} :

$$L = \int (L_{diff}(i) di) / i$$

Aus der Induktivität kann auf die Polarisierung der MSM-Probe geschlossen werden, wenn die anderen Elemente im induktivitätsbestimmenden Magnetkreis bekannt sind.

15 Die Rückstellung des Elements erfolgt bevorzugt durch einen zuschaltbaren Antrieb, der beispielsweise als elektromagnetischer (wie beispielsweise in DE 10 2012 108 568 A1 beschrieben), elektrodynamischer oder antagonistisch angeordneter magnetischer Formgedächtnisantrieb ausgeführt
20 sein kann. Die Rückstellung kann auch durch ein permanent wirksames elastisches Element, z. B. eine Feder, erfolgen. Die Rückstellung findet dann unmittelbar statt, wenn der Erregerstrom einen bestimmten Schwellenwert unterschreitet.

Erfindungsgemäß wird daher bei einer Aktoranordnung, die ein
25 Stellelement aus einem magnetischen Formgedächtnismaterial sowie einen ansteuerbaren Elektromagneten mit mindestens einem ferromagnetischen Flussleitelement und mindestens einer auf dem Flussleitelement angeordneten Erregerspule umfasst, wobei das Stellelement in einem Luftspalt des
30 Flussleitelements so angeordnet ist, dass ein durch

Ansteuern des Elektromagneten erzeugtes magnetisches Feld das Stellelement durchdringt und eine Längenänderung des Stellelements bewirkt, vorgeschlagen, dass die Aktoranordnung ein Messmittel aufweist, das ein messbares elektrisches Signal erzeugt, dessen Betrag sich abhängig von der Dehnung des magnetischen Formgedächtnismaterials und dem in den Elektromagneten eingeprägten Strom ändert.

Dabei sollen die Begriffe „ansteuerbar“ und „Ansteuern“ bedeuten, dass die von dem Elektromagneten erzeugte magnetische Feldstärke kontinuierlich einstellbar ist. Dies wird durch Variation des in eine Erregerspule des Elektromagneten eingespeisten Stroms erreicht. Ein messbares elektrisches Signal kann beispielsweise eine elektrische Spannung sein, aber auch eine elektrische Stromstärke oder ein digital codiertes Signal. Im Fall einer Spannung oder einer Stromstärke kann deren zeitliche Änderung ausgewertet werden, um die Dehnung sowie die mechanische Spannung des Stellelements zu ermitteln. Im Fall eines digital codierten Signals kann der codierte Wert direkt hierfür genutzt werden.

In einer Ausgestaltung ist vorgesehen, dass der Betrag des elektrischen Signals sich in Abhängigkeit von der durch die Dehnung des magnetischen Formgedächtnismaterials hervorgerufenen Änderung der Reluktanz oder/und der Polarisierung des Stellelements ändert.

Dabei kann vorgesehen sein, dass ein Messmittel unmittelbar am oder im Luftspalt des Flussleitelements angeordnet ist.

Das Messmittel kann mindestens eine Messspule oder/und mindestens einen magnetischen Sensor umfassen.

Beispielsweise kann vorgesehen sein, dass die Messspule eine Erregerspule des Elektromagneten ist, d.h. der zeitliche Verlauf der in der Erregerspule induzierten Spannung wird bei dieser Ausgestaltung gleichzeitig zur Ermittlung der

Dehnung und der mechanischen Spannung im Stellelement genutzt. Alternativ oder zusätzlich kann mindestens eine Messspule zusätzlich zu einer Erregerspule des Elektromagneten vorgesehen sein.

- 5 Eine Messspule kann beispielsweise auf einem Flussleitelement des Elektromagneten so angeordnet sein, dass sie mindestens einen Abschnitt des Flussleitelements umschließt. In diesem Fall verläuft die Spulenachse parallel zur Richtung des magnetischen Flusses. Dabei kann eine
10 solche Messspule vorteilhaft in unmittelbarer Nähe zum Luftspalt des Magnetkreises angeordnet sein.

- Eine Messspule kann jedoch auch im Luftspalt angeordnet sein und dabei mindestens einen Abschnitt des Stellelements umschließen. Bei dieser Ausgestaltung verläuft die
15 Spulenachse senkrecht zur Richtung des magnetischen Flusses. In einer Weiterbildung kann vorgesehen sein, dass die Messspule an oder in einem mindestens einen Abschnitt des Stellelements umschließenden Führungselement angeordnet ist. Beispielsweise kann das Stellelement in einer Hülse
20 angeordnet sein, die das Stellelement führt, und eine Messspule in diese Hülse integriert sein.

- Um die vorgeschlagene Aktoranordnung in einer geschlossenen Steuerkette betreiben zu können, ist gemäß einer weiteren Ausgestaltung vorgesehen, dass das Messmittel elektrisch mit
25 einer Regeleinrichtung verbunden ist. Dadurch wird es möglich, mit Hilfe des messbaren elektrischen Signals, das bei einer Verformung des magnetischen Formgedächtnismaterials erzeugt wird und somit erfasst und ausgewertet werden kann, den Aktor kraftgeregelt zu
30 betreiben. Die Dehnung sowie die in dem Formgedächtnismaterial herrschende mechanische Spannung - und damit die Aktorkraft - können, wie oben ausführlich beschrieben, ohne zusätzliche Sensorik ermittelt und zur Steuerung und Regelung des Aktors genutzt werden.

Gemäß einer weiteren Ausgestaltung der vorgeschlagenen Aktoranordnung kann weiterhin ein ansteuerbares, zur Umkehrung der Längenänderung des Stellelements ausgebildetes Rückstellmittel vorgesehen sein. Der Begriff „ansteuerbar“

5 bedeutet auch hier, dass nicht nur zwei Schaltzustände vorgesehen sind, sondern die von dem Rückstellmittel erzeugte Rückstellkraft kontinuierlich einstellbar ist. Das Rückstellmittel kann beispielsweise ein permanent wirksames elastisches Element, z. B. eine Feder, ein
10 elektromagnetischer oder elektrodynamischer Antrieb oder ein dem Stellelement entgegenwirkend angeordneter magnetischer Formgedächtnisantrieb sein. Dieser kann in analoger Weise wie der Aktor selbst in offener oder geschlossener Steuerkette betrieben werden.

15 Die vorgeschlagene Aktoranordnung kann vorteilhaft in einem Greifwerkzeug, einem Stanzwerkzeug, einem Schneidwerkzeug, einem Spannwerkzeug oder einem Klemmwerkzeug verwendet werden.

Zum Betrieb der Aktoranordnung in einer geschlossenen Kette
20 wird ein Regelungsverfahren vorgeschlagen, bei dem die Regelgröße ein messbares elektrisches Signal ist, dessen Betrag sich abhängig von einer Dehnung des Formgedächtnismaterials des Stellelements und einer in die Erregerspule eingespeisten Stromstärke ändert.

25 Dabei kann die Stellgröße eine in die Erregerspule eingespeiste Stromstärke sein, mit der der Elektromagnet angesteuert wird.

Weiterhin kann vorgesehen sein, dass die Regelgröße von einer Erregerspule des Elektromagneten oder/und von einem
30 magnetischen Sensor oder/und einer zusätzlichen Messspule abgegriffen wird.

Neu gegenüber bisher bekannten Lösungen ist,

- dass eine magnetische Formgedächtnislegierung in Form einer Sensor-Aktor-Kombination vorzugsweise für Greifer eingesetzt wird und dabei intrinsisch Aktorkraft und Position magnetisch aus dem System selbst bestimmt werden,
- dass die wegunabhängige aktorische Kraft des Elements ausgenutzt wird, und
- dass die Aktorkraft einfach gesteuert oder durch Auswertung der o.g. Messgrößen geregelt werden kann.

10 Der Kern der Erfindung liegt in der aktorischen Ausnutzung der Kraft-Weg-Kennlinie zur Greifkraftsteuerung oder Greifkraftregelung bei gleichzeitiger sensorischer Ausnutzung der dehnungsabhängigen Magnetisierungsänderung einer magnetischen Formgedächtnislegierung.

15 Wesentliche Vorteile sind:

- die Möglichkeit eines gesteuerten Betriebs,
- der Wegfall von zusätzlicher Sensorik im geregelten Betrieb,
- stabile Position an jeder Hubposition realisierbar,
- 20 abhängig vom Arbeitspunkt,
- Hub kann beliebig langsam durchfahren werden,
- die nahezu wegunabhängige Greifkraft,
- eine intrinsische Greifobjekterkennung.

Zusätzliche Vorteile sind:

- 25 • geringer tribologischer Verschleiß des Elements, dadurch geeignet für saubere Umgebungen,

- hohe Lebensdauer von MSM Aktoren (mehrere 100 Mio. Zyklen in Literatur berichtet),
- kleinere Masse und geringerer Bauraum als bei vergleichbaren motorisierten Antrieben.

5 Nachfolgend wird die Erfindung anhand von Ausführungsbeispielen und zugehörigen Zeichnungen näher erläutert.

Fig. 1 zeigt gemessene Spannungs-Dehnungs-Verläufe $\sigma(\varepsilon)$ bei konstant eingepprägter Flussdichte B einer MSM-Probe. Es ist
10 ersichtlich, dass sich über einen weiten Bewegungsbereich eine nahezu von der Ausdehnung unabhängige Kraft am Abtrieb ergibt. Somit ist ersichtlich, dass mit MSM-Elementen unabhängig vom Weg eine nahezu konstante Greifkraft realisiert werden kann, die bspw. in der offenen Steuerkette
15 ausgenutzt wird.

Fig. 2 stellt eine gemessene Gegenspannung $\sigma(\varepsilon, B=)$ beim mechanischen Rückstellen der Probe ohne Erregungsflussdichte dar. Hieraus ist ersichtlich, dass die Blockierkraft nahezu wegunabhängig ist.

20 Fig. 3 zeigt, dass bei konstanter Vorspannung σ und Einprägung verschiedener Flussdichten B die Dehnung ε an jedem Punkt gehalten wird und somit diese auch in Abhängigkeit von der eingepprägten Flussdichte, die proportional zum Strom ist, beliebig langsam angefahren
25 werden kann.

Ein beispielhafter Verlauf der Ausdehnung ε über eingepprägter Flussdichte B und Druckspannung σ innerhalb der Hysteresegrenzflächen während eines Greifzyklus ist in Fig. 4 dargestellt. Der Ablauf eines solchen Zyklus ist dabei wie
30 folgt:

(1) Kraftfreier Start des Greifvorgangs bei feldfreiem MSM-

Element.

(2) Die Dehnung des MSM-Elements, und damit der Bewegungsvorgang des Aktors, setzt bei Überschreiten der erforderlichen Flussdichte ein.

5 (3) Der Greifer ist am Greifobjekt zugestellt, die Greifspannung steigt sprunghaft an (d. h. unterschiedlich große Greifobjekte werden mit nahezu gleicher Kraft gegriffen).

10 (4) Die Greifkraft wird über die Flussdichte, d.h. durch Variation des in die Erregerspule des Magnetkreises eingespeisten Stroms, gesteuert.

(5) Bei Reduktion der Flussdichte auf Null erfolgt ein Abfallen der mechanischen Spannung im MSM-Element auf das Niveau der Zwillingsspannung, zur vollständigen Rückstellung
15 des MSM-Elements in den unverformten Zustand ist eine zusätzlich aufgebrachte Rückstellkraft erforderlich.

Die Änderung der Polarisierung in Abhängigkeit von der Dehnung und der eingeprägten Flussdichte ist schematisch in Fig. 5 dargestellt (Quelle: *Ziske, Johannes, et al. IEEE Transactions on Magnetics, 51.1 (2015): 1-8.*). Hierbei wird
20 ersichtlich, dass die Änderung der Position und die Permeabilität der Legierung für kleine Feldstärken nahezu linear abhängig sind. Über diesen Zusammenhang kann direkt die Position und über hinterlegte Modelle und Kenntnis des
25 eingeprägten Stroms die Kraft bestimmt werden.

Mögliche Anordnungen von Element und Sensorik innerhalb eines Magnetkreises sind in Fig. 6 dargestellt. Das Stellelement 3, das aus einer MSM-Legierung besteht, ist in einem Magnetkreis angeordnet, der durch ein Flussleitelement
30 2 sowie eine darauf angeordnete Erregerspule 1 gebildet ist.

Die Veränderung der Reluktanz des Stellelements 3 aufgrund

der eintretenden Dehnung kann durch eine zusätzliche Messspule 4 erfasst werden, die einen Abschnitt des Flussleitelements 2 umschließt und unmittelbar neben dem Luftspalt angeordnet ist. Die Spulenachse ist dabei parallel zum magnetischen Fluss ausgerichtet. Somit kann bei Kenntnis des in die Erregerspule 1 eingespeisten Stroms auf Kraft und Weg des Stellelements 3 geschlossen werden. Hierbei begrenzt allerdings die magnetische Sättigung des Materials den Messbereich.

Die magnetischen Eigenschaften in der Richtung senkrecht zur Ausdehnung des Stellelements 3 verändern sich komplementär. Jedoch erfahren diese Zwillingsvarianten vektoriell nur einen geringen Teil des aktorisch genutzten Erregerfelds, sodass hier insbesondere durch Kleinsignalmessungen die oben erwähnte Abhängigkeit zwischen Permeabilität und Dehnung ausgenutzt werden kann.

Daher ist die Messung der zur Erregerflussdichte senkrecht stehenden Permeabilität mit Hilfe einer Messspule 5 zu bevorzugen, wie in dem Ausführungsbeispiel der Fig. 6b dargestellt. Die Messspule 5 umschließt einen Abschnitt des Stellelements 3, so dass die Spulenachse senkrecht zum magnetischen Fluss ausgerichtet ist.

Eine vorteilhafte Weiterbildung dieses Prinzips ist in Fig. 6c dargestellt. Eine kompakte Messspule 6 ist, um die Reibung zwischen Messspule 6 und Stellelement 3 zu reduzieren, in ein Führungselement 7 integriert, das hier beispielhaft in Form einer das Stellelement 3 umschließenden Hülse ausgeführt ist.

Eine weitere Möglichkeit stellt die Messung der Luftspaltinduktion mit Hilfe eines magnetischen Sensors 9 dar, der in einem in Fig. 6d dargestellten Ausführungsbeispiel unterhalb des Stellelements 3 angeordnet ist.

In einem in Fig. 6d dargestellten Ausführungsbeispiel ist der magnetischen Sensor 9 neben dem Stellelement 3 aus magnetischem Formgedächtnismaterial angeordnet.

Aktoranordnung mit magnetischer Formgedächtnislegierung**Bezugszeichenliste**

5	
	1 Erregerspule
	2 Flussleitelement
	3 Stellelement
	4 Messspule
10	5 Messspule (um MSM-Element gewickelt)
	6 Messspule (in Probenhülse integriert)
	7 Führungselement
	8 Streufeldlinien
	9 magnetischer Sensor
15	

Aktoranordnung mit magnetischer Formgedächtnislegierung**Patentansprüche**

5

1. Aktoranordnung, umfassend ein Stellelement aus einem magnetischen Formgedächtnismaterial, einen ansteuerbaren Elektromagneten mit mindestens einem ferromagnetischen Flussleitelement und mindestens einer auf dem Flussleitelement angeordneten Erregerspule, wobei das Stellelement in einem Luftspalt des Flussleitelements so angeordnet ist, dass ein durch Ansteuern des Elektromagneten erzeugtes magnetisches Feld das Stellelement durchdringt und eine Längenänderung des Stellelements bewirkt, dadurch gekennzeichnet, dass die Aktoranordnung ein Messmittel aufweist, das eine messbares elektrisches Signal erzeugt, dessen Betrag sich abhängig von der Dehnung des magnetischen Formgedächtnismaterials und einer in die Erregerspule eingespeisten Stromstärke ändert.

20

2. Aktoranordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Betrag des elektrischen Signals sich in Abhängigkeit von der durch die Dehnung des magnetischen Formgedächtnismaterials hervorgerufenen Änderung der Reluktanz oder/und der magnetischen Polarisierung des Stellelements ändert.

25

3. Aktoranordnung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass das Messmittel unmittelbar am oder im Luftspalt des Flussleitelements angeordnet ist.

30

4. Aktoranordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass das Messmittel mindestens eine Messspule oder/und mindestens einen magnetischen Sensor umfasst.

5. Aktoranordnung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine Messspule eine Erregerspule des Elektromagneten ist.
6. Aktoranordnung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine Messspule zusätzlich zu einer Erregerspule des Elektromagneten vorgesehen ist.
7. Aktoranordnung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine Messspule mindestens einen Abschnitt des Stellelements umschließt.
8. Aktoranordnung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Messspule an oder in einem, mindestens einen Abschnitt des Stellelements umschließenden Führungselement angeordnet ist.
9. Aktoranordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass das Messmittel elektrisch mit einer Regeleinrichtung verbunden ist.
10. Aktoranordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass weiterhin ein ansteuerbares, zur Umkehrung der Längenänderung des Stellelements ausgebildetes Rückstellmittel vorgesehen ist.
11. Aktoranordnung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass das Rückstellmittel ein permanent wirksames elastisches Element, ein elektromagnetischer oder elektrodynamischer Antrieb oder ein dem Stellelement entgegenwirkend angeordneter magnetischer Formgedächtnisantrieb ist.
12. Verwendung einer Aktoranordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 11 in einem Greifwerkzeug, einem Stanzwerkzeug, einem Schneidwerkzeug, einem Spannwerkzeug oder einem Klemmwerkzeug.

13. Regelungsverfahren für einen Aktor mit einem
 Stellelement aus einem magnetischen
 Formgedächtnismaterial und einem Elektromagneten, bei
 dem die Regelgröße ein messbares elektrisches Signal
5 ist, dessen Betrag sich abhängig von einer Dehnung des
 Formgedächtnismaterials des Stellelements und einer in
 die Erregerspule eingespeisten Stromstärke ändert.
14. Regelungsverfahren nach Anspruch 12, dadurch
 gekennzeichnet, dass die Stellgröße eine in die
10 Erregerspule eingespeiste Stromstärke ist, mit der der
 Elektromagnet angesteuert wird.
15. Regelungsverfahren nach Anspruch 12 oder 13,
 dadurch gekennzeichnet, dass die Regelgröße von einer
 Erregerspule des Elektromagneten oder/und von einem
15 magnetischen Sensor oder/und einer zusätzlichen
 Messspule abgegriffen wird.

FIG. 1

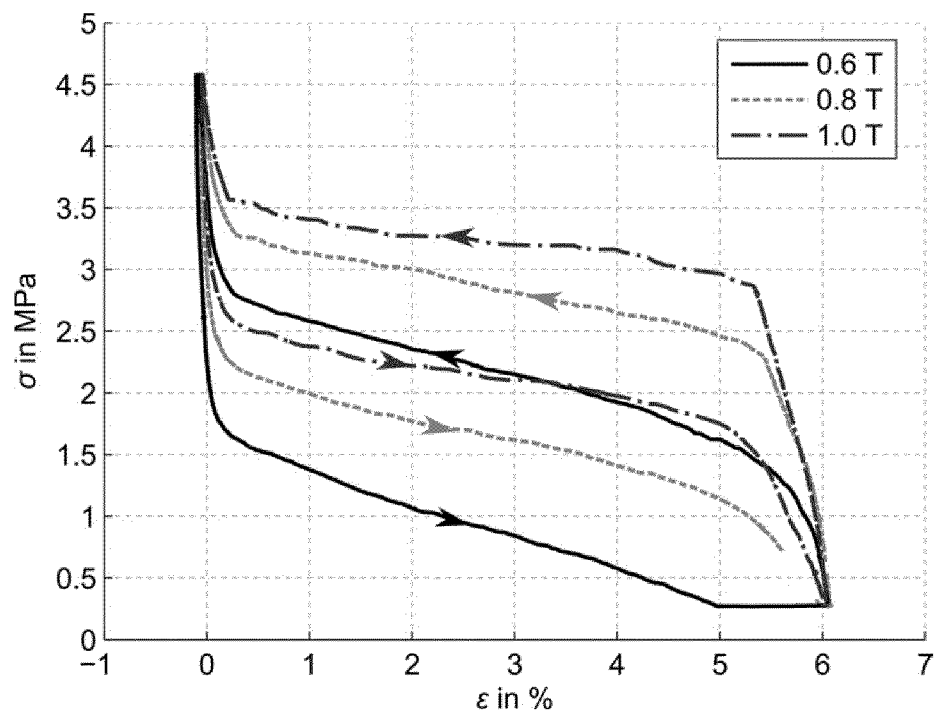


FIG. 2

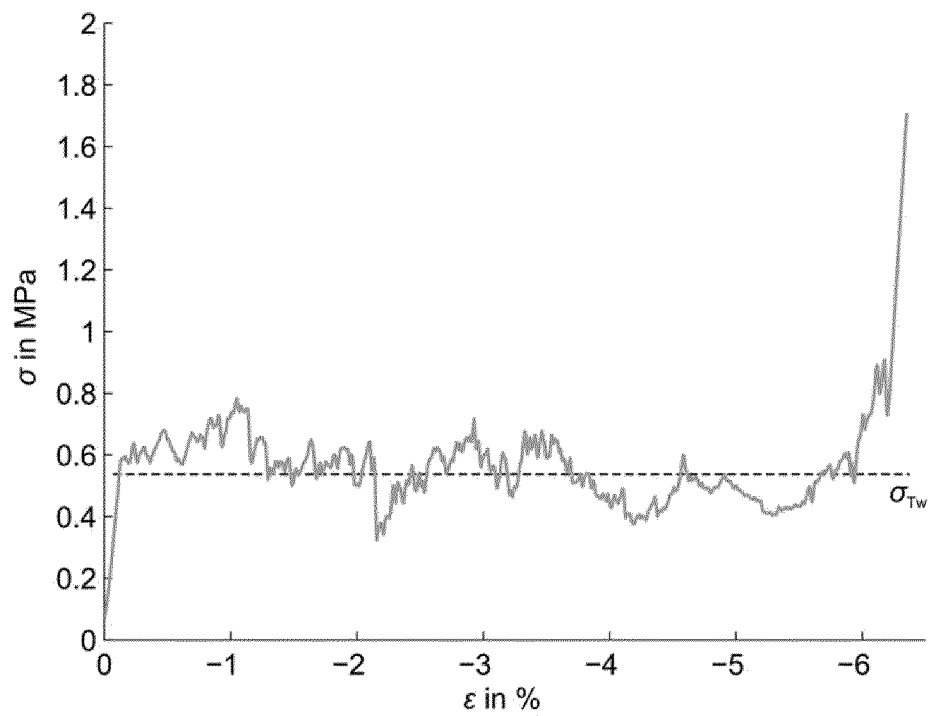


FIG. 3

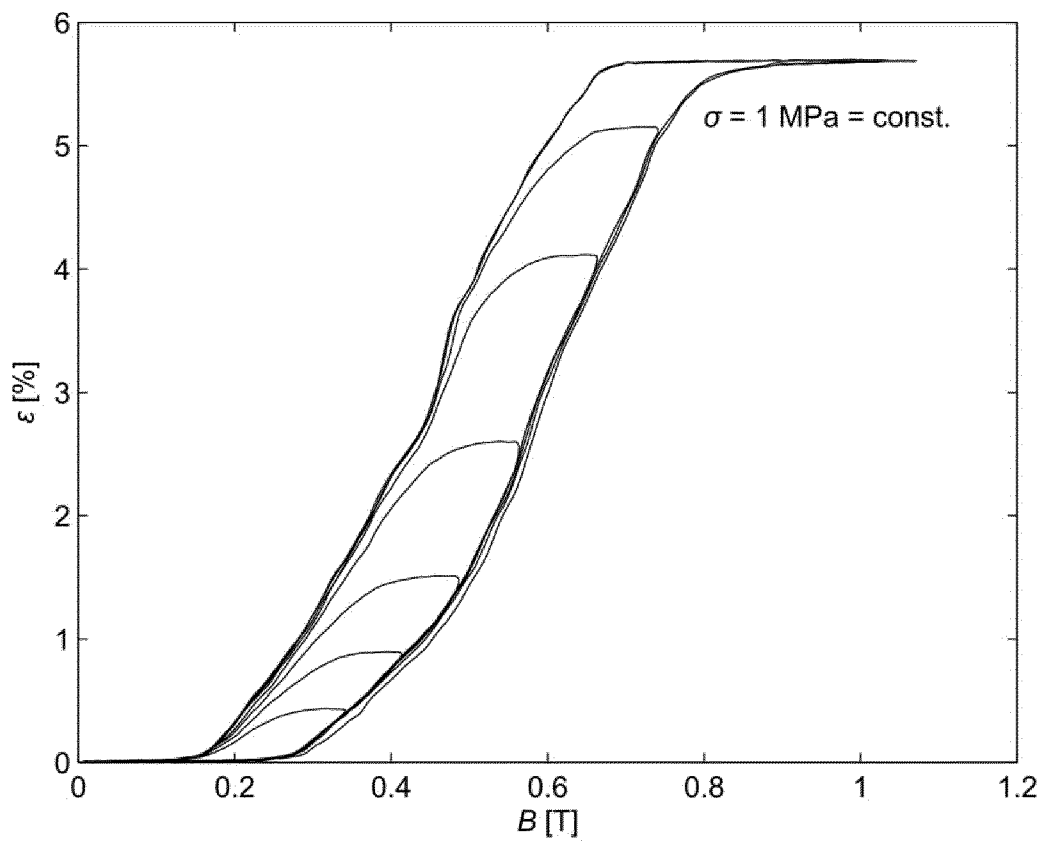


FIG. 4

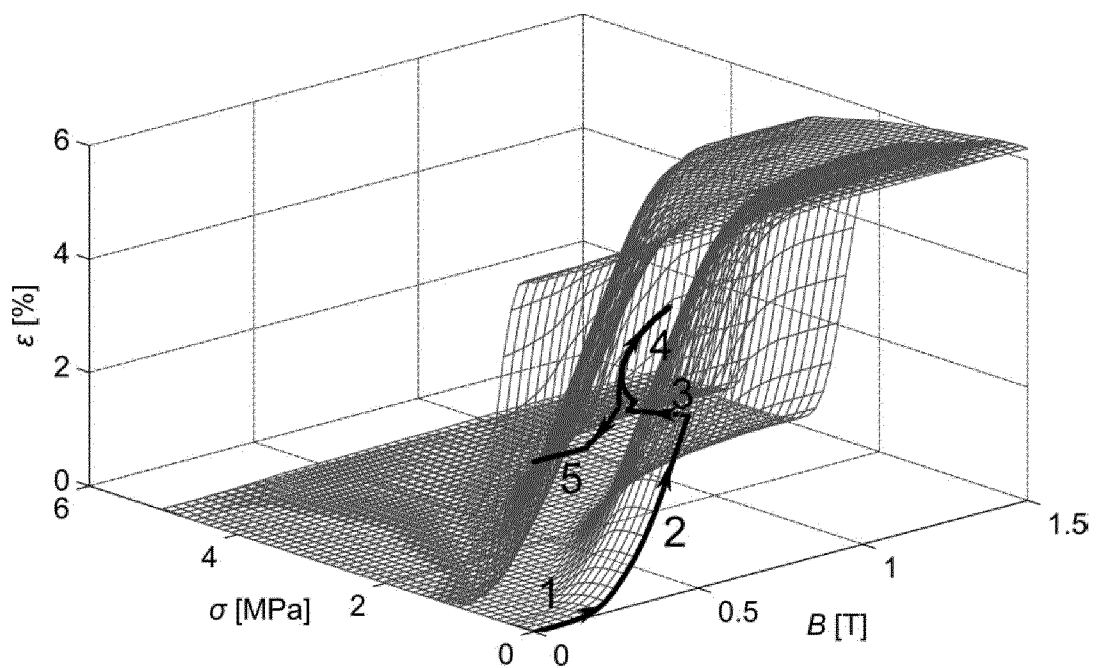


FIG. 5

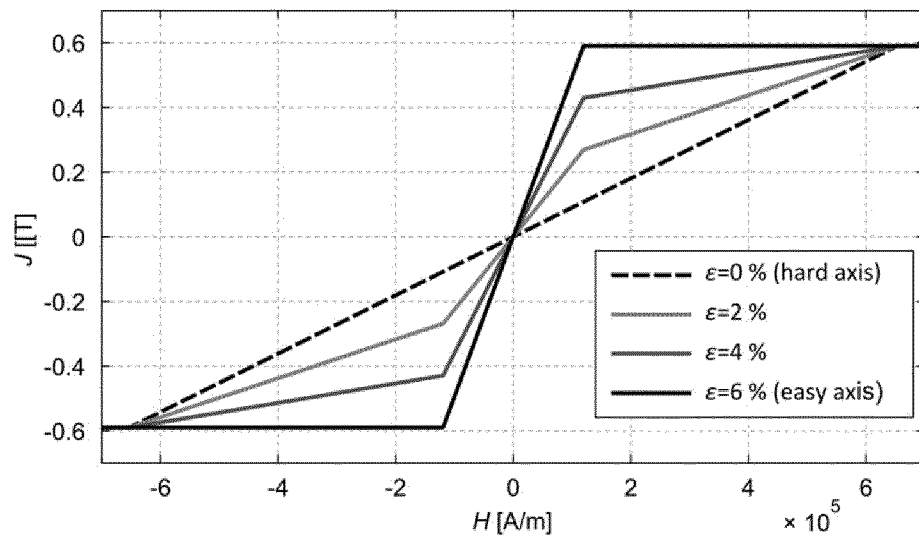


FIG. 6

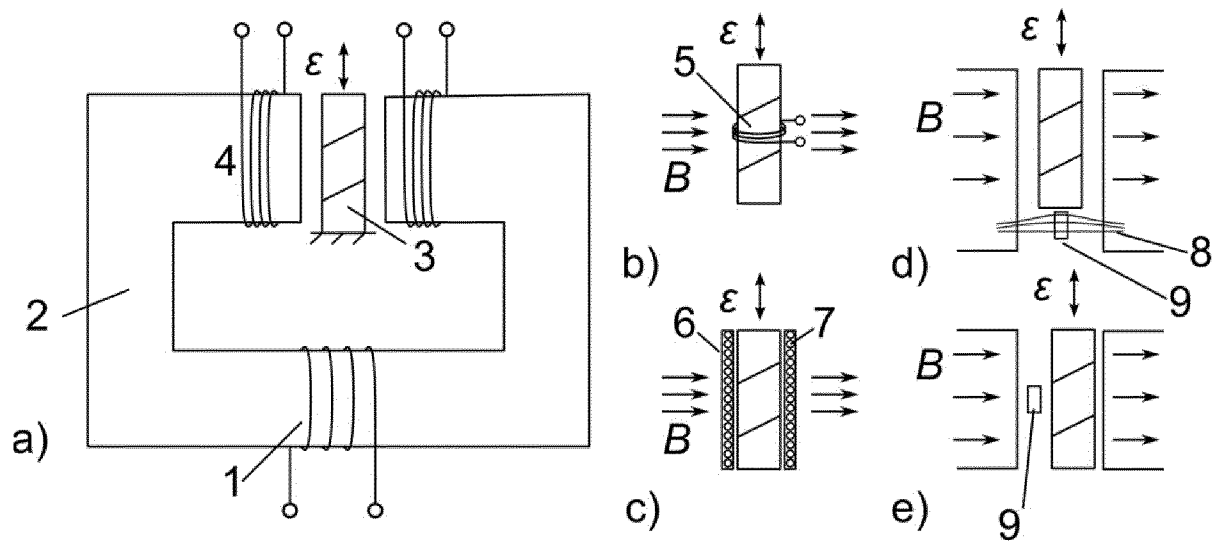
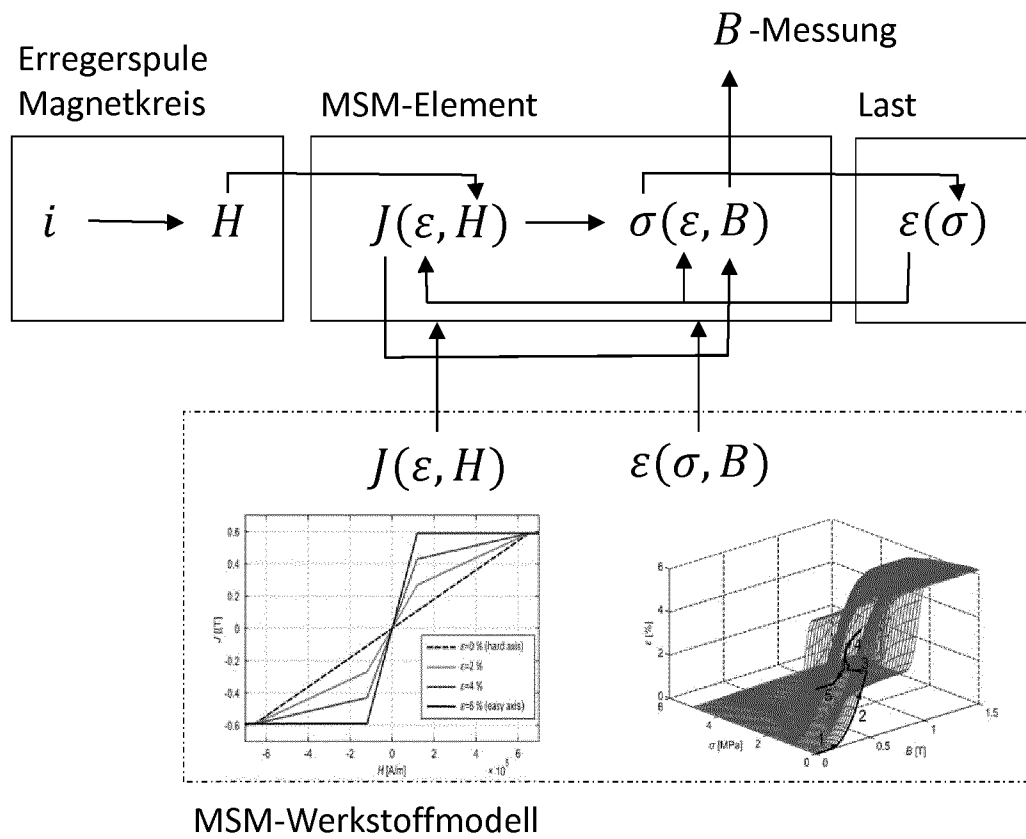


FIG. 7



i Spulenstrom

H Magn. Erregung
= magn. Feldstärke

B Magn. Flussdichte

J Polarisierung

ε Mech. Dehnung

σ Mech. Spannung

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2015/068500

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER INV. H01L41/06 H01L41/12 H02N2/02 F16K31/06 ADD.		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) H01L H02N F16K		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	WO 03/078922 A1 (ADAPTAMAT TECH OY [FI]; SUORSA ILKKA [FI]; TELLINEN JUHANI [FI]; ULLAK) 25 September 2003 (2003-09-25) page 11, line 27 - page 14, line 12; figures 3, 6 -----	1-15
X	US 2004/206922 A1 (DU PLESSIS ANDRIES J [US] ET AL) 21 October 2004 (2004-10-21) paragraphs [0025], [0061] - paragraph [0080]; figures 4-6 -----	1-15
X	US 2007/063566 A1 (BROWNE ALAN L [US] ET AL) 22 March 2007 (2007-03-22) paragraph [0029] - paragraph [0044]; figures 3, 4 -----	1-15
☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.		
* Special categories of cited documents : "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 14 October 2015		Date of mailing of the international search report 22/10/2015
Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Authorized officer Angermeier, Detlef

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2015/068500

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO 03078922	A1	25-09-2003	
		AU 2003214281 A1	29-09-2003
		CA 2479440 A1	25-09-2003
		EP 1485672 A1	15-12-2004
		FI 20030333 A	16-09-2003
		JP 2005521037 A	14-07-2005
		US 2005139012 A1	30-06-2005
		WO 03078922 A1	25-09-2003

US 2004206922	A1	21-10-2004	NONE

US 2007063566	A1	22-03-2007	NONE

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES INV. H01L41/06 H01L41/12 H02N2/02 F16K31/06 ADD.		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
B. RECHERCHIERTE GEBIETE Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole) H01L H02N F16K		
Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen		
Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe) EPO-Internal, WPI Data		
C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	WO 03/078922 A1 (ADAPTAMAT TECH OY [FI]; SUORSA ILKKA [FI]; TELLINEN JUHANI [FI]; ULLAK) 25. September 2003 (2003-09-25) Seite 11, Zeile 27 - Seite 14, Zeile 12; Abbildungen 3, 6 -----	1-15
X	US 2004/206922 A1 (DU PLESSIS ANDRIES J [US] ET AL) 21. Oktober 2004 (2004-10-21) Absätze [0025], [0061] - Absatz [0080]; Abbildungen 4-6 -----	1-15
X	US 2007/063566 A1 (BROWNE ALAN L [US] ET AL) 22. März 2007 (2007-03-22) Absatz [0029] - Absatz [0044]; Abbildungen 3, 4 -----	1-15
☐ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen ☒ Siehe Anhang Patentfamilie		
* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen : "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist "E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt) "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist		
Datum des Abschlusses der internationalen Recherche		Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
14. Oktober 2015		22/10/2015
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Bevollmächtigter Bediensteter Angermeier, Detlef

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2015/068500

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
WO 03078922	A1	25-09-2003	AU	2003214281 A1	29-09-2003
			CA	2479440 A1	25-09-2003
			EP	1485672 A1	15-12-2004
			FI	20030333 A	16-09-2003
			JP	2005521037 A	14-07-2005
			US	2005139012 A1	30-06-2005
			WO	03078922 A1	25-09-2003

US 2004206922	A1	21-10-2004	KEINE		

US 2007063566	A1	22-03-2007	KEINE		
