



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2010 021 856.1**

(22) Anmeldetag: **28.05.2010**

(43) Offenlegungstag: **01.12.2011**

(51) Int Cl.: **C30B 11/14 (2006.01)**
C30B 29/52 (2006.01)

(71) Anmelder:
ETO MAGNETIC GmbH, 78333, Stockach, DE

(74) Vertreter:
Hiebsch Behrmann Wagner, 78224, Singen, DE

(72) Erfinder:
Pagounis, Emmanouel, Dr., 78315, Radolfzell, DE;
Laufenberg, Markus, Dr., 78315, Radolfzell, DE;
Drewermann, Anne, 52064, Aachen, DE; Sturz,
Lazlo, Dr., Vaals, NL

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE	15 33 473	C
EP	0 092 496	B1

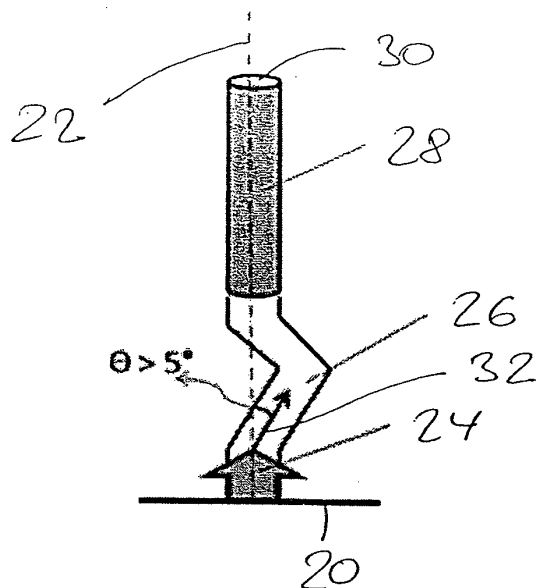
Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Herstellung eines Einkristall-MSM-Körpers**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung umfasst ein Verfahren zur Herstellung eines Einkristall-MSM-Körpers zur Realisierung eines Kristallorientierung entlang einer ersten Kristallachse aufweisenden MSM-Aktorelements durch Einbringen eines aufgeschmolzenen Legierungsmaterials in einer Formschale und nachfolgendes Erstarren des Legierungsmaterials, mit den Schritten:

- Vorsehen einer einen Ankeimbereich, einen Selektorbereich sowie einen Kristallbereich aufweisenden, zumindest abschnittsweise entlang einer Längsachse ausgerichteten Formschale,
- Einbringen des aufgeschmolzenen MSM-Legierungsmaterials, insbesondere NiMnGa-basierten Legierungsmaterials, in die Formschale, ohne dass ein gesonderter Ankeimkristall vorgesehen ist,
- Verfestigen des MSM-Legierungsmaterials durch Erzeugen einer sich vom Ankeimbereich über den Selektorbereich in den Kristallbereich entlang eines Erstarrungspfades bewegenden Erstarrungsfront, wobei der Erstarrungspfad im Kristallbereich entlang der Längsachse verläuft, im Selektorbereich einen von der Längsachse ausgelenkten Bereich ausbildet, dessen maximale Auslenkung, bezogen auf die Längsachse, größer als eine maximale Querschnittsweite im Selektorbereich ist,
- und die Längsachse eine Winkelabweichung von weniger als 10° , bevorzugt weniger als 6° , weiter bevorzugt weniger als 3° , von der ersten Kristallachse aufweist.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung eines Einkristall-MSM-Körpers zur Herstellung eines MSM-Aktors sowie einen derartigen monokristallinen MSM-Körper, wie er durch das Verfahren hergestellt ist.

[0002] MSM-Aktoren (auch „MSM-Aktuatoren“ genannt) sind aus dem Stand der Technik allgemein bekannt und nutzen den Effekt aus, dass unter Einfluss eines Magnetfeldes sogenannte magnetische Formgedächtnismaterialien (MSM = Magnetic Shape Memory) eine Expansionsbewegung durchführen, welche – typischerweise im einstelligen Prozentbereich bezogen auf eine Länge eines jeweiligen Körpers entlang der Expansionsrichtung liegend – Grundlage für einen Antrieb sein kann und insoweit etwa eine Alternative zu bekannten, mittels Permanent- und/oder Elektromagneten realisierten Stellgliedern sein kann.

[0003] Entscheidend für die Wirksamkeit eines derartigen MSM-Aktors bzw. MSM-Aktorelements ist, neben der verwendeten Legierung (typischerweise eine Legierung auf der Basis von NiMnGa), die Kristallorientierung, in welcher das MSM-Element vorliegt: Als aus dem Stand der Technik bekannt vorauszusetzende Verfahren zur Herstellung von monokristallinem MSM-Material besitzen die Eigenschaft, dass sich eine durch Einbringen eines geschmolzenen Legierungsmaterials in eine Formschale und nachfolgendes Erkalten bzw. Erstarren des Legierungsmaterials ergebende Kristallorientierungen stochastisch ist, mit dem Ergebnis, dass eine Ausrichtung der Kristallachsen nicht vorbestimmbar ist und dann durch nachfolgende Fertigungsschritte des MSM-Körpers herausgebildet werden muss. Eine derartige Anordnung zeigt die [Fig. 5](#) zum Stand der Technik: Ein in der vorbeschriebenen Weise erstarrter und langgestreckter MSM-Einkristall **10** weist eine durch die Formschale bestimmte geometrische Längsachse **12** auf. Weitgehend stochastisch während des Erstarrens des Materials hat sich jedoch eine Kristallorientierung im Einkristall **10** gebildet, welche beispielhaft durch eine erste Kristallachse **14** und eine zweite, dazu orthogonale Kristallachse **16** (wobei die dritte Achse dann automatisch zu beiden orthogonal festliegt) beschrieben wird. Dies führt dann dazu, dass aus dem gefertigten Einkristall ein MSM-Element **18** (nach vorherigem Ermitteln der Kristallachsen durch Vermessen) herausgeschnitten werden kann, welches eine durch die gezeigten geometrischen Verhältnisse begrenzte Maximalabmessung aufweist (mit entsprechend viel Verschnitt). Dies führt in der Konsequenz dazu, dass bei gängigen Längsabmessungen von monokristallinen MSM-Elementen im Bereich zwischen 10 mm und 30 mm und gewünschten Querschnitten von typischerweise zwischen 5 mm² und 30 mm² entsprechend große Einkristalle **10** ([Fig. 5](#)) produziert wer-

den müssen, um auch für den Fall ungünstiger Kristallorientierungen die gewünschten Mindestabmessungen für das MSM-Element fertigen zu können. Offensichtlich ist, dass diese als bekannt vorauszusetzende Vorgehensweise in mehrfacher Hinsicht ineffizient ist; zum einen entsteht in beträchtlichem Umfang Verschnitt durch die notwendigen Schneidvorgänge (typischerweise durchgeführt durch Drahterodieren), zum anderen ist in jedem Fall eine Vermessung des erzeugten Einkristalls im Hinblick auf eine Ermittlung der Kristallorientierung notwendig (typisches Vorgehen durch Röntgendiffraktometrie), um überhaupt die Voraussetzung für das nachfolgende Schneiden zu schaffen.

[0004] Auch ergibt sich aus der beispielhaften Betrachtung der geometrischen Verhältnisse der [Fig. 5](#), dass die maximal erreichbaren Abmessungen (z. B. eine Längserstreckung eines herzustellenden MSM-Elements) begrenzt sind.

[0005] Aus dem Stand der Technik ist es bekannt, dass sogenannte Ankeimkristalle (Seed Crystals) eine Kristallorientierung bei einem Einkristall-Herstellungsprozess beeinflussen können. Im Wesentlichen wird zu diesem Zweck ein geeigneter und in der gewünschten Weise orientierter Einkristall zu Prozessbeginn in den Prozess einbezogen, auf dem sich der herzustellende Kristall Idealerweise monokristallin ankeimt. Allerdings ist diese Vorgehensweise auch in mehrfacher Hinsicht problematisch; nicht nur sind geeignete Ankeimkristalle kostenträchtig und insbesondere für industrielle Fertigungsprozesse außerhalb einer Laborumgebung schwierig zu handhaben, auch erfordern derartige Ankeimkristalle eine sehr präzise Prozessführung, um das korrekte Ankeimverhalten zu erreichen (mit weiteren möglichen Nachteilen auf den MSM-Effekt eines erzeugten MSM-Elements, falls der Ankeimkristall legierungsfremdes Material aufweist). Damit besteht, neben dem offensichtlichen Bedarf nach Effizienzsteigerung gemäß vorbeschriebener Problemstellung, auch der Bedarf nach prozesstechnischer Vereinfachung, mit dem Ziel, einfach zu handhabende und potenziell großtechnische Prozesse zur Herstellung von Einkristall-MSM-Körpern zu ermöglichen.

[0006] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, ein Verfahren zur Herstellung eines Einkristall-MSM-Körpers sowie einen entsprechenden monokristallinen MSM-Körper zu schaffen, welche im Hinblick auf Materialausnutzung und Effizienz des zugehörigen Einkristall-Materials verbessert sind, insbesondere Verschnitt des Einkristall-Materials zum Herstellen eines oder mehrerer MSM-Elemente aus dem monokristallinen MSM-Körper reduzieren und zusätzlich die Notwendigkeit eines Ankeimkristalls unnötig machen.

[0007] Die Aufgabe wird durch das Verfahren mit den Merkmalen des Hauptanspruchs gelöst; vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen beschrieben. Zusätzlicher Schutz im Rahmen der vorliegenden Erfindung wird beansprucht für einen Einkristall-MSM-Körper, welcher durch das Verfahren nach dem Hauptanspruch sowie der davon abhängigen Patentansprüche hergestellt ist. Dabei wird davon ausgegangen, dass der aus dem beanspruchten Verfahren resultierende (ggf. weiter in einzelne Aktorelemente) zerteilte Körper noch mit typischen (und ansonsten bekannten) Wärmebehandlungs- und/oder magnetomechanischen Trainingsschritten behandelt wird, um das magnetische Formgedächtnisverhalten zu erreichen bzw. zu optimieren.

[0008] In erfindungsgemäß vorteilhafter Weise erfolgt die Herstellung des Einkristall-MSM-Körpers – bevorzugt auf der Basis eines NiMnGaX-Legierungsmaterials, wobei X fakultativ ein oder mehrere Elemente aus der Gruppe Co, Fe und Cu aufweist – ohne die Notwendigkeit, einen (gesonderten) Ankeimkristall vorzusehen, vielmehr allein aus dem Einbringen des aufgeschmolzenen MSM-Legierungsmaterials in die erfindungsgemäß besonders ausgestaltete Formschale. Genauer gesagt weist diese eine Längsachse auf und ist im Bereich des Selektorbereichs von dieser Längsachse ausgelenkt, erfindungsgemäß um eine Auslenkung, die über die maximale querschnittliche Breite im Selektorbereich hinausgeht. Damit ist es im Rahmen der Erfindung vorgesehen, eine längsschnittliche Geometrie des erfindungsgemäß durch Ausbildung des Selektorbereichs auslenkenden Erstarrungspfades so zu realisieren, dass diese Auslenkung in Querschnittsrichtung größer ist als eine maximale Querschnittsweite im Selektorbereich, mit anderen Worten, der Bereich der maximalen Auslenkung liegt außerhalb einer Projektion des Querschnitts im Kristallbereich auf den Eingang des Selektorbereichs entlang der Längsachse.

[0009] Weiterbildungsgemäß besitzt diese Auslenkung längsschnittlich die Form mindestens eines Zackens, alternativ einer Wendel, einer Helix oder einer anderen Winkelgestaltung.

[0010] Durch diese vorteilhafte Maßnahme erfährt dann in erfindungsgemäßer Weise die Kristallstruktur des erstarrenden bzw. dann erstarrten MSM-Materials eine Kristallorientierung, welche sich an der Längsachse orientiert, genauer gesagt entlang der Richtung der Längsachse der Formschale verläuft (bzw. von dieser um eine Winkelabweichung abweicht, welche erfindungsgemäß $< 10^\circ$ beträgt, weiterbildungsgemäß vorteilhaft $< 6^\circ$ beträgt, noch weiterbildungsgemäß und vorteilhaft weniger als 3° beträgt).

[0011] Damit wird dann durch die vorliegende Erfindung vorteilhaft erreicht, dass (mit diesem in der praktischen Realisierung dann vernachlässigbaren Orientierungsfehler) ein Einkristall erzeugt wird, dessen Kristallorientierung nicht mehr stochastisch entsteht, sondern geprägt wird durch die mechanische Ausrichtung der Formschale entlang der Längsachse (bzw. des erfindungsgemäß ausgelenkt ausgebildeten Verlaufabschnitts für die Erstarrung im Selektorbereich). Die sich daraus ergebende vorteilhafte Konsequenz für die Serienfertigung ist evident: Nicht nur wird der bei einer Nachbearbeitung bzw. dem Aufteilen des erstarrten Materials in eine Mehrzahl von MSM-Elementen notwendige Verschnitt drastisch reduziert, auch liegt durch das erfindungsgemäße Vorgehen zumindest die Kristallorientierung im Hinblick auf die Längsachse fest, mit anderen Worten, vor einer allfälligen Nachbearbeitung des Einkristalls zur Realisierung des/r MSM-Elemente(s) würde sich ein aufwendiger Schritt der Orientierungsmessung (etwa mittels Röntgendiffraktometrie) erübrigen.

[0012] Wird dann, wie vorteilhaft und weiterbildungsgemäß vorgesehen, auch die Formschale (insbesondere im Selektor- bzw. Kristallbereich) querschnittlich rechteckig ausgestaltet, lässt sich zusätzlich die Kristallorientierung des erstarrenden bzw. erstarrten MSM-Materials entlang einer zweiten orthogonal zur ersten Kristallachse verlaufenden Kristallachse (und damit automatisch der dritten orthogonalen Achse) beeinflussen, so dass im Ergebnis auf diese Weise dann auch die vollständige dreidimensionale Kristallorientierung eines resultierenden Kristalls im Raum determiniert wird (wiederum ohne die Notwendigkeit einer Vermessung).

[0013] Im Rahmen der praktischen Realisierung der Erfindung ist es besonders günstig und bevorzugt, die Längsachse in vertikaler Richtung vorzusehen, damit diese etwa senkrecht zu einer (ansonsten bekannten) Kaltplatte als Kühlvorrichtung im bzw. am Ankeimbereich der Formschale vorzusehen. Wird dann die Formschale (in ansonsten bekannter Weise) aus einem Wärme- bzw. Heizumfeld, entgegengesetzt der Längsachse, mit einer Ziehgeschwindigkeit bewegt, erstarrt in diese Formschale in flüssigem Zustand eingebrachtes Legierungsmaterial aufgrund des Temperaturgradienten dann in Aufwärtsrichtung entlang eines Erstarrungspfades, welcher durch die Längsachse beschreibbar ist und, von dieser abweichend, erfindungsgemäß im Selektorbereich ausgelenkt wird. Weiterbildungsgemäß vorteilhaft ist dabei das Erstarrungs- bzw. Abkühlungsverhalten der Formschale so eingerichtet, dass querschnittlich (radial) kein signifikanter Temperaturgradient von innen nach außen in der Schmelze benachbart der Erstarrungsfront vorhanden ist, und ein Temperaturgradient der Schmelze nahe der Erstarrungsfront auf Werte zwischen 0,3 K/mm und 20 K/mm eingestellt wird, wobei ein besonders bevorzugter Wertebereich zum Erzeu-

gen der gewünschten Kristallorientierung im Bereich zwischen 1 K/mm und 15 K/mm liegt. Ergänzend oder alternativ ist es weiterbildungsgemäß günstig, die Abkühlungsgeschwindigkeit, beschrieben durch die Bewegungsgeschwindigkeit der Erstarrungsfront entlang des Erstarrungspfades (bzw. eine Ziehgeschwindigkeit der Formschale relativ zum Temperaturgradienten), auf einen Bereich zwischen 0,1 mm/min und 10 mm/min einzurichten, wobei ein besonders bevorzugter Bereich zwischen 0,3 mm/min und 5 mm/min liegt.

[0014] Auf diese Weise wird dann vorteilhaft ein monokristallines Erstarrungsverhalten erreicht, welches zumindest entlang der Längsachse die erste Kristallachse der Kristallstruktur ausbildet (bzw. zwischen diesen Achsen eine maximale Winkelabweichung von weniger als 10°, typischerweise von weniger als 6° oder gar weniger als 3° zeigt). Für den Fall, dass weiterbildungsgemäß vorteilhaft auch der Querschnitt von Selektorbereich und/oder Kristallbereich (d. h. die Ebene senkrecht zur Längsachse) rechteckförmig, weiter bevorzugt quadratisch, ausgestaltet ist, lässt sich zusätzlich eine Beeinflussung (Vorgabe) der orthogonalen zweiten bzw. dritten Kristallachse, in der Richtung der rechteckigen Längskanten im Querschnitt, erreichen, so dass im Idealfall eines z. B. langgestreckten und querschnittlich rechteckförmigen Kristallbereichs der Formschale dieser Bereich die dreidimensionale Orientierung eines darin erstarrten Einkristalls vorgibt.

[0015] Im Ergebnis ermöglicht damit die vorliegende Erfindung nicht nur eine drastische Verminderung von Herstellungs- bzw. vorgelagerten Prüfschritten (da idealerweise auf jegliches Vermessen der Kristallorientierung verzichtet werden kann), auch gestattet es die Erfindung, aus dem beschränkten Innenraum einer Formschale dimensionsmäßig optimierte MSM-Elemente zu erzeugen, da insbesondere bereits bei dem beschriebenen Formungsvorgang durch Erstarren entlang einer der Längsachse der Formschale entsprechenden Erstarrungsrichtung und einer damit bewirkten Kristallausrichtung eine maximale Längendimension produzierbar wird. Dann steht insbesondere zu erwarten, dass effizient und mit geringem Herstellungsaufwand (und damit potenziell großtechnisch) MSM-Elemente als Grundlage für das Herstellen von MSM-Aktoren produziert werden können (auch durch weiteres Zerteilen, z. B. Zersägen), welche Längenabmessungen von mehr als 20 mm insbesondere mehr als 40 mm erreichen und/oder eine Querschnittsfläche von 15 mm² oder mehr gestatten.

[0016] Weitere Vorteile, Merkmale und Einzelheiten der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung bevorzugter Ausführungsbeispiele sowie anhand der Figuren; diese zeigen in:

[0017] [Fig. 1](#) eine geometrische Prinzipdarstellung einer Formschalenanordnung zur Durchführung des Verfahrens gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel der Erfindung;

[0018] [Fig. 2](#) eine Darstellung analog [Fig. 1](#), jedoch mit einer anderen geometrischen Ausgestaltung in Form eines querschnittlich rechteckigen Kristallbereichs der Formschale;

[0019] [Fig. 3](#) eine Schemadarstellung eines zylindrischen MSM-Einkristalls und einer darin schematisch eingezeichneten Kristallorientierung bei Realisierung der Erfindung;

[0020] [Fig. 4](#) eine Darstellung analog [Fig. 3](#), jedoch mit einem quaderförmigen Einkristall-Körper zur Verdeutlichung der Kristallorientierung eines darin schematisch vorgesehenen (ebenfalls quaderförmigen) MSM-Aktorelements und

[0021] [Fig. 5](#) eine schematische Darstellung eines nach einem generischen Verfahren aus dem Stand der Technik realisierten MSM-Einkristalls mit darin stochastisch orientierten Kristallachsen sowie den sich daraus ergebenden beschränkten Schnittmöglichkeiten für ein MSM-Aktorelement.

[0022] Die [Fig. 1](#) verdeutlicht das Prinzip, mit welchem die vorliegende Erfindung entsprechend einem ersten Ausführungsbeispiel realisiert werden kann. Gezeigt ist eine sogenannte Formschale zum Erzeugen von monokristallinen Körpern nach dem sogenannten Bridgman-Verfahren, welche, sich von einer Kaltplatte **20** senkrecht entlang einer Längsachse (Strichpunktlinie **22**) erstreckend, einen Ankeimbereich **24**, darauffolgend einen Selektorbereich **26** sowie einen Kristallbereich **28** ausbildet. Geeignet aufgeschmolzenes Legierungsmaterial wird durch eine obere Öffnung **30** in die Vorrichtung eingebracht, und das flüssige Legierungsmaterial erstarrt dann von unten nach oben (Pfeilrichtung **32**) unter Ausbildung einer sich entsprechend aufwärts bewegenden Erstarrungsfront, deren Bewegungsgeschwindigkeit durch geeignete Temperaturbeeinflussung vorbestimmt ist.

[0023] Die [Fig. 1](#) (wie auch die analoge [Fig. 2](#)) verdeutlichen, wie erfindungsgemäß der Erstarrungspfad nicht senkrecht und linear entlang der Längsachse **22** erfolgt, sondern vielmehr einen aus der [Fig. 1](#) bzw. der [Fig. 2](#) längsschnittlich geknickten Linienverlauf aufweist; genauer gesagt ist im Selektorbereich **26** die Formschale so ausgestaltet, dass deren für das Erstarren wirksamer Innenkanal (aus der Richtung von unten nach oben) zunächst um einen Winkel φ von ca. 40° ausgelenkt ist und dann einen weiteren, jedoch entgegengesetzt ausgelenkten Abschnitt aufweist, bis der Kanal am oberen Ende des Selektorbereichs wiederum querschnittlich mit dem bodenseitigen Querschnitt fluchtet. Erfindungsgemäß vorteil-

haft sorgt diese Auslenkung, welche im dargestellten Ausführungsbeispiel an ihrer maximalen seitlichen Auslenkung über die Projektion des Querschnitts im Kristallbereich bzw. im Bodenbereich benachbart der Kaltplatte **20** hinausgeht, in vorteilhafter Weise für eine Längsorientierung der Kristallstrukturen in Vertikalrichtung, d. h. der Richtung der Achse **22**. Dies führt dann dazu, dass im erstarrten Zustand im Bereich des Kristallbereichs **28** der dort vorhandene Einkristall eine Orientierung aufweist, welche zumindest eine erste Kristallachse orientiert in der Richtung der Längsachse aufweist (wobei hier erfindungsgemäß ein maximaler Winkelfehler von 10° , typischerweise jedoch von weniger als 6° oder gar weniger als 3° , erreicht werden kann).

[0024] Die [Fig. 2](#) zeigt eine Variante des Ausführungsbeispiels der [Fig. 1](#); hier ist im Kristallbereich **28'** der sich vertikal entlang der Längsachse **22** erstreckende Kanal im Querschnitt quadratisch, so dass sich, neben einer Kristallachsenorientierung in Vertikalrichtung, zusätzlich die beiden dazu orthogonalen Kristallachsen parallel zu den Kantenverläufen des Kristallbereichs erstrecken. Diese geometrischen Verhältnisse verdeutlichen die [Fig. 3](#) bzw. [Fig. 4](#), insoweit entsprechend den Realisierungsformen von [Fig. 1](#) bzw. [Fig. 2](#): [Fig. 3](#) zeigt das Ergebnis eines in einem hohlzylindrischen Kristallbereich erstarrten Einkristallkörpers. Die Richtung der Längsachse (hier: z-Achse) entspricht annähernd der Ausrichtung der Kristall-Längsachse c mit dem beschriebenen kleinen möglichen Winkelfehler. Aufgrund der Zylinderstruktur (d. h. Kreisform in der x-y-Ebene in [Fig. 3](#)) sind die zwei weiteren, zueinander sowie zur Vertikalachse c orthogonalen Achsen in ihrer Ausrichtung stochastisch. Dagegen bietet die Weiterbildung der [Fig. 2](#) (Geometrie gemäß [Fig. 4](#)) die Möglichkeit, durch Vorsehen der quadratischen Querschnittskontur (hier verlaufend parallel zur x- bzw. y-Richtung) entsprechend parallel die zweite (a) bzw. dritte (b) Kristallachse auszuprägen, so dass als Ergebnis der in [Fig. 2](#) bzw. [Fig. 4](#) beschriebenen Durchführung des Verfahrens ein Einkristall erreicht wird, welcher durch seine Quaderform bereits weitestgehend auch seine tatsächliche kristalline Orientierung beschreibt und insoweit potentiell nicht (oder nur minimal) nachbearbeitungsbedürftig ist. Auch ist das Ergebnis des Herstellungsverfahrens gemäß [Fig. 1](#) ([Fig. 3](#)) insoweit bereits vorteilhaft, als hier mit der Kristallachse (c), verlaufend in der Richtung der Längserstreckung (z) der Formschale sowie des darin erstarrten Rohlings, eine etwa für das Expansionsverhalten eines MSM-Körpers maßgebliche Ausrichtung festliegt und auch ein solcher zylindrischer Körper dann ohne weitere (oder lediglich mit minimaler) Nachbearbeitung benutzbar ist, wenn es auf die genaue Ausrichtung der a- bzw. b-Kristallachsen nicht ankommt.

[0025] Im Weiteren wird anhand eines konkreten Beispiels die Durchführung des Verfahrens beschrieben:

Legierungs-Ausgangsmaterial wird als sogenannte Masterlegierung durch Induktionsschmelzen aus den Materialien NiMnGa, entsprechend der Zusammensetzung für eine MSM-Legierung, durch Induktionsschmelzen hergestellt. Eine typische Schmelztemperatur wird auf einen Bereich zwischen 50° und 400° oberhalb der Verflüssigungstemperatur der jeweiligen Legierung eingestellt. Typischerweise findet das Aufschmelzen unter einer Ar-Atmosphäre zwischen 100 mbar und 1200 mbar statt.

[0026] Die flüssige Masterlegierung wird in eine keramische Formschale gegossen, welche eine Geometrie entsprechend der [Fig. 1](#) aufweist. Diese Formschale wird im Bridgman-Verfahren relativ zu einem Temperaturgradienten aus einer heißen Zone in eine kalte Zone bewegt, so dass die Erstarrungsfront die Formschale von unten nach oben durchläuft. Diese Geschwindigkeit der Bewegung der Erstarrungsfront liegt typischerweise bei 0,3 mm/min; der Temperaturgradient in der Schmelze nahe der Erstarrungsfront wird auf einen Wert von typischerweise 3 K/mm eingestellt. Nach Durchlaufen des gemäß der Erfindung vorteilhaft ausgelenkten Selektorbereichs erstarrt das MSM-Material mit einer vertikal, d. h. entlang der Richtung der Längsachse **22** ausgerichteten Kristallachse, so dass nach abschließendem Erstarren und Erkalten dem Kristallbereich **28** ein Zylinder als MSM-Körper der in [Fig. 3](#) gezeigten Geometrie entnommen werden kann. Dieser bietet nunmehr die Möglichkeit, unmittelbar einen MSM-Aktuator mit sich axial erstreckender Bewegungs(Expansions-)richtung zu realisieren, alternativ lässt sich aus diesem Körper durch Bestimmen einer kristallinen Querachse die Voraussetzung dafür schaffen, dass mit wenig Verschnitt und minimierter mantelseitiger Abtragung ein oder mehrere querschnittlich rechteckige(r) bzw. quaderförmige(r) MSM-Elemente mit auch in Querrichtung definierter Kristallorientierung geschaffen werden können.

[0027] Während die vorbeschriebene Anordnung und deren Betrieb zur Realisierung des erfindungsgemäßen Verfahrens generisch und prinzipiell zu verstehen sind (und durch den Fachmann geeignet ausgestaltet und angepasst werden), liegt es insbesondere auch im Rahmen der vorliegenden Erfindung, in der Art einer mehrarmigen Formschale eine Mehrzahl von Erstarrungspfaden entlang jeweils voneinander getrennten, gleichwohl benachbarten Selektor- und Kristallbereichen vorzusehen.

[0028] Die Einsatzbereiche eines MSM-Körpers, welcher durch die vorliegende Erfindung hergestellt wird, sind potentiell unbegrenzt; es steht vorteilhaft zu erwarten, dass die vorliegende Erfindung gleichwohl die großtechnische Herstellung derartiger, im

Hinblick auf die Kristallgeometrie eindeutig bestimmter Körper erheblich vereinfacht und ökonomischer gestaltet, so dass zukünftig weitere Anwendungsgebiete für eine MSM-Aktorik erschlossen werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines Einkristall-MSM-Körpers zur Realisierung eines eine Kristallorientierung entlang einer ersten Kristallachse aufweisenden MSM-Aktorelements durch Einbringen eines aufgeschmolzenen Legierungsmaterials in einer Formschale und nachfolgendes Erstarren des Legierungsmaterials, mit den Schritten:

- Vorsehen einer einen Ankeimbereich (24), einen Selektorbereich (26) sowie einen Kristallbereich (28) aufweisenden, zumindest abschnittsweise entlang einer Längsachse (22) ausgerichteten Formschale,
- Einbringen des aufgeschmolzenen MSM-Legierungsmaterials, insbesondere NiMnGa-basierten Legierungsmaterials, in die Formschale, ohne dass ein gesonderter Ankeimkristall vorgesehen ist,
- Verfestigen des MSM-Legierungsmaterials durch Erzeugen einer sich vom Ankeimbereich über den Selektorbereich in den Kristallbereich entlang eines Erstarrungspfades bewegenden Erstarrungsfront, wobei der Erstarrungspfad im Kristallbereich entlang der Längsachse verläuft, im Selektorbereich einen von der Längsachse ausgelenkten Bereich ausbildet, dessen maximale Auslenkung, bezogen auf die Längsachse, größer als eine maximale Querschnittsweite im Selektorbereich ist,
- und die Längsachse (22) eine Winkelabweichung von weniger als 10° , bevorzugt weniger als 6° , weiter bevorzugt weniger als 3° , von der ersten Kristallachse aufweist.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Erstarrungspfad im Selektorbereich einen zackentartig mit zwei abgewinkelten Abschnitten ausgelenkten Bereich ausbildet, dessen Eingangs- und Ausgangsseite bevorzugt fluchtend zur Längsachse ausgerichtet ist.

3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Erstarrungspfad im Selektorbereich einen helixförmigen oder zickzackförmigen Bereich ausbildet.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Längsachse vertikal zu einer dem Ankeimbereich zugeordneten planen Kühlvorrichtung, insbesondere Kaltplatte ausgerichtet ist.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass der sich langgestreckt entlang der Längsachse erstreckende Kristallbereich eine wirksame Querschnittsfläche für die Er-

starrungsfront von $> 3 \text{ cm}^2$, insbesondere $> 7 \text{ cm}^2$, insbesondere auch größer 12 cm^2 aufweist.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass das MSM-Legierungsmaterial zum Erzeugen der Erstarrungsfront so gekühlt wird, dass ein im Selektorbereich entstehender Temperaturgradient in der Schmelze, der Erstarrungsfront benachbart, zwischen $0,3 \text{ K/mm}$ und 20 K/mm , insbesondere zwischen 1 K/mm und 15 K/mm , beträgt.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass das MSM-Legierungsmaterial zum Erzeugen der Erstarrungsfront so behandelt wird, insbesondere durch Bewirken einer Relativgeschwindigkeit zwischen der Formschale und dem Temperaturgradienten, dass die Erstarrungsfront im Selektorbereich sich mit einer Geschwindigkeit zwischen $0,1 \text{ mm/min}$ und 50 mm/min , insbesondere zwischen $0,3 \text{ mm/min}$ und 5 mm/min , entlang des Erstarrungspfades bewegt.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass sich die Erstarrungsfront entlang des Erstarrungspfades durch einen zumindest abschnittsweise querschnittlich rechteckigen, insbesondere quadratischen, Selektorbereich und/oder Kristallbereich bewegt.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass eine querschnittlich rechteckige Innenkontur des Kristallbereichs eine Kristallorientierung des monokristallin erstarrten MSM-Legierungsmaterials in mindestens einer zweiten, zur ersten Kristallachse orthogonalen Kristallachse bestimmt.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass das Legierungsmaterial Ni, Mn, Ga sowie mindestens Co in der Zusammensetzung $\text{Ni}_a\text{Mn}_b\text{Ga}_c\text{Co}_d\text{Fe}_e\text{Cu}_f$ aufweist, wobei a, b, c, d, e und f in Atom-% angegeben sind und die Bedingungen

$$\begin{aligned} 44 &\leq a \leq 51; \\ 19 &\leq b \leq 30; \\ 18 &\leq c \leq 24; \\ 0,1 &\leq d \leq 15; \\ 0 &\leq e \leq 14,9; \\ 0 &\leq f \leq 14,9; \\ d + e + f &\leq 15; \\ a + b + c + d + e + f &= 100; \end{aligned}$$

erfüllen.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass das Verfestigen des MSM-Legierungsmaterials entlang einer Mehrzahl von einander benachbarten und voneinander getrennten Erstarrungspfaden erfolgt.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, gekennzeichnet durch das Teilen des im Kristallbereich erstarrten MSM-Legierungsmaterials in eine Mehrzahl von MSM-Aktorelementen ohne vorheriges messtechnisches Ermitteln einer Kristallorientierung im erstarrten MSM-Legierungsmaterial.

Es folgt ein Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

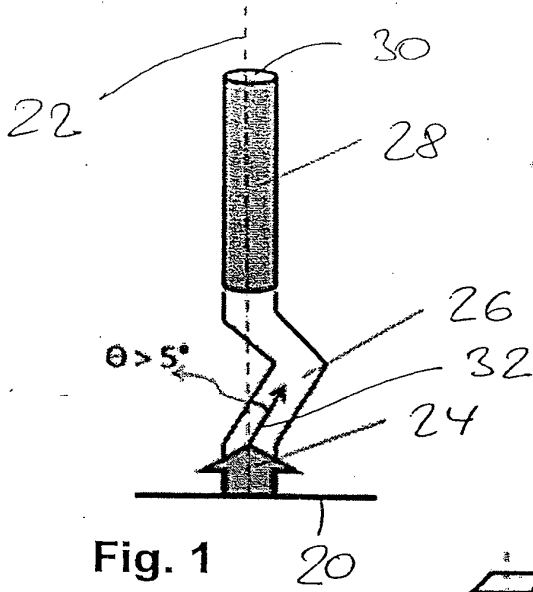


Fig. 1

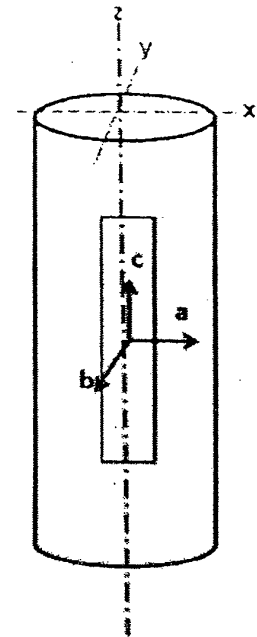


Fig. 3

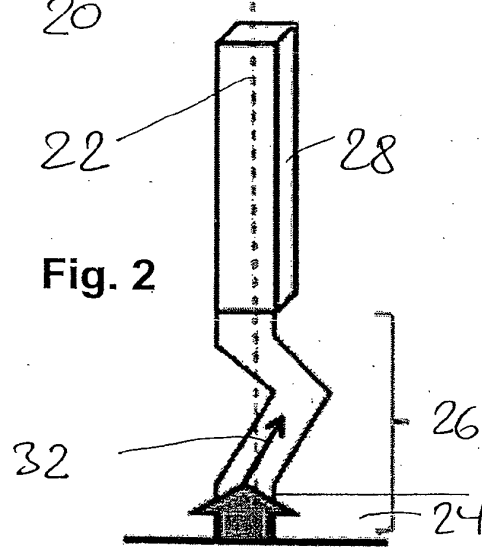


Fig. 2

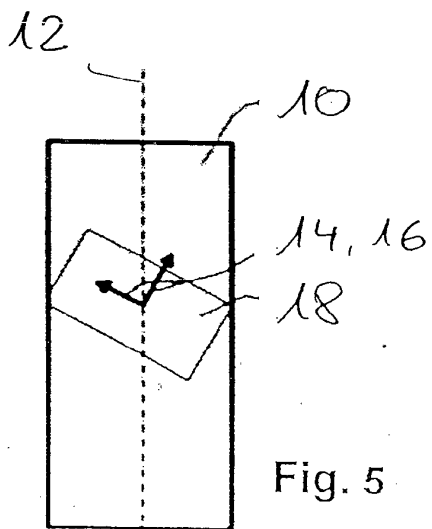


Fig. 5

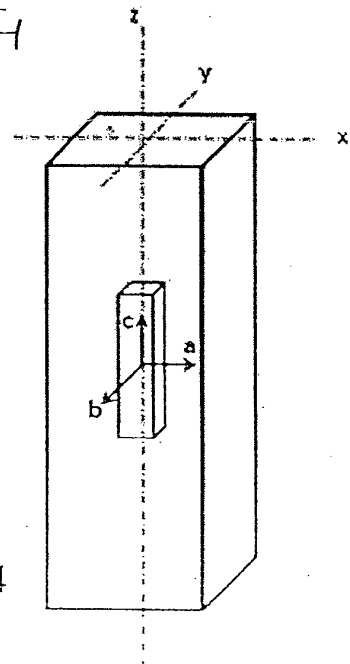


Fig. 4