

(19)



(11)

EP 3 105 764 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des
Hinweises auf die Patenterteilung:
22.04.2020 Patentblatt 2020/17

(51) Int Cl.:
H01F 1/057 ^(2006.01) **H01F 41/02** ^(2006.01)
C22C 19/07 ^(2006.01) **C22C 26/00** ^(2006.01)
C22C 38/00 ^(2006.01) **C22C 47/08** ^(2006.01)
C22C 47/14 ^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **15707559.9**

(22) Anmeldetag: **06.02.2015**

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP2015/052495

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2015/118099 (13.08.2015 Gazette 2015/32)

(54) **MAGNETISCHER WERKSTOFF**

MAGNETIC MATERIAL

MATÉRIAU MAGNÉTIQUE

(84) Benannte Vertragsstaaten:
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO
PL PT RO RS SE SI SK SM TR**

(30) Priorität: **10.02.2014 EP 14154444**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
21.12.2016 Patentblatt 2016/51

(73) Patentinhaber: **Enrichment Technology Company
Ltd.
Zweigniederlassung Deutschland
52409 Jülich (DE)**

(72) Erfinder:
• **KRONHOLZ, Stephan
42428 Jülich (DE)**

- **WELLER, Andreas
52074 Aachen (DE)**
- **VOR DEM ESCHE, Rainer
52525 Heinsberg (DE)**
- **SONNEN, Michael
17259 Duisburg (DE)**

(74) Vertreter: **FARAGO Patentanwälte
Thierschstraße 11
80538 München (DE)**

(56) Entgegenhaltungen:
**CN-A- 101 430 958 CN-A- 101 552 065
CN-B- 101 430 958 CN-B- 101 552 065
US-A1- 2011 031 432 US-A1- 2011 031 432**

EP 3 105 764 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

Gebiet der Erfindung

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf ein magnetisches Material mit verbesserten mechanischen Eigenschaften, auf einen Permanentmagneten, einen Elektromotor oder ein magnetisches Lager mit diesem magnetischen Material und auf ein Verfahren zur Herstellung eines Permanentmagneten aus diesem magnetischen Material.

Hintergrund der Erfindung

[0002] Magnetische Materialien werden für diverse Zwecke verwendet, beispielsweise für Elektromotoren oder Magnetlager. In den entsprechenden Anwendungen können die Magnete sehr schnellen Drehungen ausgesetzt sein. Beispielsweise wirken in Rotoren mit elektromagnetischen Antrieben und/oder Lagern mit Umdrehungszahlen von 20.000 Umdrehungen pro Minute extreme Lasten auf die eingesetzten Magnete. Üblicherweise werden in solchen Anwendungen starke Magnete aus NdFeB- oder SmCo verwendet. Solche Materialien haben eine Bruchdehnung von 0,1 - 0,15%. Sofern die Magnete aufgrund der Rotationsgeschwindigkeit und der damit verbundenen Fliehkraft höhere Materialdehnungen ertragen müssen, führt dies zu einer Zerstörung der Geometrie und dadurch zu einer Reduzierung der Magnetisierbarkeit oder gar zum Funktionsverlust des Magneten.

[0003] Dokument DE 10020946 A1 offenbart eine mechanische Verstärkung solcher Elektromotor-Motoren, indem um den Rotor des Elektromotors eine äußere Bandage zur zusätzlichen Fixierung und Vorspannung der Magnete am Rotor gewickelt wird, wobei die Vorspannung der Bandage den auf die Rotormagnete wirkenden Dehnungskräften entgegenwirkt und somit einen Rotor mit besseren mechanischen Eigenschaften bereitstellt, der für höhere Rotationsgeschwindigkeit dieses Elektromotors geeignet ist.

[0004] Die auf dem Rotor angeordnete Bandage stellt ein zusätzliches Bauteil im Elektromotor dar, das zudem mit hoher Präzision und reproduzierbar auf dem Rotor angeordnet werden muss, damit die Elektromotoren zuverlässig für höhere Drehzahlen verwendet werden können. Somit kompliziert die Bandage das Herstellungsverfahren und führt zu höheren Herstellungskosten. Außerdem erhöht die Bandage den Abstand zwischen Rotor (Läufer) und Stator, was die Leistungsfähigkeit des Motors herabsetzt. Es wäre daher wünschenswert, einen leistungsfähigen Elektromotor oder ein magnetisches Lager zur Verfügung zu haben, das ohne zusätzliche Bauteile auskommt und dennoch für sehr hohe Drehzahlen einsetzbar ist. Weiterhin wünschenswert wären neuartige magnetische Werkstoffe, die für noch höhere Belastungen ausgelegt werden können.

[0005] US 2011/031432 A1 und CN 101 430 958 B

offenbaren Seltenerd-magnete mit Kohlenstoff-Nanoröhrchen.

Zusammenfassung der Erfindung

[0006] Es ist eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, einen leistungsfähigen Elektromotor und/oder ein magnetisches Lager bereitzustellen, die ohne zusätzliche Bauteile für den Einsatz bei sehr hohen Drehzahlen geeignet sind. Diese Aufgabe wird gelöst durch ein magnetisches Material zur Herstellung eines Seltenerd-Permanentmagneten, wie im Ansprüchen 1 spezifiziert.

[0007] Hierbei bezeichnet der Begriff "Seltenerd-Permanentmagnet" oder Seltenerd-magneten einen Permanentmagneten, der im Wesentlichen aus Übergangsmetallen oder Übergangsmetalllegierungen wie beispielsweise Fe-Bor und Seltenerdmetallen besteht. Solche Permanentmagnete zeichnen sich dadurch aus, dass sie gleichzeitig eine hohe magnetische Remanenz und eine hohe magnetische Koerzitivfeldstärke und damit eine hohe magnetische Energiedichte aufweisen. Beispiele von besonders starken Permanentmagneten aus dieser Klasse sind $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, SmCo_5 oder $\text{Sm}_2(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Cu}, \text{Zr})_{17}$, insbesondere $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. Es können beispielsweise aber auch Seltenerd-Übergangsmetall-Stickstofflegierungen wie beispielsweise $\text{Sm}_2\text{Fe}_{18}\text{N}_3$ verwendet werden. Der Begriff "im Wesentlichen" bezeichnet die Möglichkeit, dass neben einem führenden Anteil an Seltenerdmetallen, Übergangsmetallen oder Übergangsmetall-Legierungen ein geringer Anteil an anderen Bestandteilen vorhanden ist, dessen Anteil so gering ist, dass er die magnetischen Eigenschaften des Permanentmagneten für die jeweilige Anwendung gegenüber einem Permanentmagneten nur aus Seltenerdmetallen, Übergangsmetallen oder Übergangsmetall-Legierungen nicht so negativ beeinflusst, dass dieser für die Anwendung ungeeignet wird. In einer Ausführungsform kann das magnetische Material nur aus Seltenerdmetallen, Übergangsmetallen oder Übergangsmetall-Legierungen bestehen.

[0008] Der Begriff Übergangsmetall-Legierung bezeichnet dabei einen metallischen Werkstoff, der aus mindestens zwei Elementen besteht, beispielsweise Fe-B, Fe-Ni oder Fe-N.

[0009] Der Begriff "Nanomaterial" bezeichnet dabei ein Material, die den mechanischen Verbund innerhalb eines gepressten Materials verbessern und eine Ausdehnung haben, die im Vergleich zur Ausdehnung des gepressten Materials um Größenordnungen kleiner ist. Das Nanomaterial kann ein Material aus einem Bestandteil oder eine Mischung aus verschiedenen Bestandteilen (mehrere Nanomaterialien) sein. Nanomaterialien im Sinne der vorliegenden Erfindung sind beispielsweise Nanostrukturen aus Kohlenstoff oder Bornitrid. Zu diesen Nanostrukturen können beispielsweise hornförmig (sogenannte Nanohorns) oder anders geformte Schichten aus Graphen (einwandig oder mehrwandig) gehören. Erfindungsgemäße Nanomaterialien können auch Nano-

röhrchen aus Kohlenstoff (Kohlenstoffnanoröhrchen) oder Bornitrid,

Block-Copolymere oder Kernschalen-Partikel. Erfindungsgemäß umfasst das Nanomaterial Kohlenstoffnanoröhrchen (sogenannte CNTs). Der Begriff "Nanoröhrchen" bezeichnet kleine röhrenförmige, nichtmagnetische Gebilde aus Kohlenstoff oder Bornitrid, die einen Durchmesser im Nanometerbereich haben. Die Wände der röhrenförmigen Gebilde bestehen nur aus Kohlenstoff oder Bornitrid, wobei beispielsweise bei Kohlenstoffnanoröhrchen die Kohlenstoffatome eine wabenartige Struktur mit Sechsecken und jeweils drei Bindungspartnern einnehmen (vorgegeben durch die sp^2 -Hybridisierung). Der Durchmesser der Nanoröhrchen liegt meist im Bereich von 1 bis 50 nm, wobei die Länge der Nanoröhrchen den Durchmesser um Größenordnungen übersteigen kann. Die Nanoröhrchen können ein- und mehrwandig aufgebaut sein und offene oder geschlossene Rohrenden besitzen. Einwandige Nanoröhrchen besitzen nur eine Lage aus dem jeweiligen Material (beispielsweise Kohlenstoffatomen bei Kohlenstoffnanoröhrchen) als Wand, mehrwandige Röhrchen können dagegen eine Wand aus mehreren Lagen des jeweiligen Materials besitzen. Nanoröhrchen besitzen zwar keine magnetischen Eigenschaften, dagegen aber überragende mechanische Eigenschaften. Beispielsweise haben einwandige Kohlenstoffnanoröhrchen bei einer Dichte von 1,3 bis 1,4 g/cm³ eine Zugfestigkeit von 30 GPa. Mehrwandige Kohlenstoffnanoröhrchen haben bei einer Dichte von 1,8 g/cm³ eine Zugfestigkeit von bis zu 63 GPa. Gewöhnlicher Stahl hat im Vergleich dazu bei einer Dichte von rund 7,85 g/cm³ eine maximale Zugfestigkeit von nur 2 GPa.

[0010] Erfindungsgemäß sind die Kohlenstoffnanoröhrchen an ihrer Oberfläche funktionalisiert. Damit lassen sich die Kohlenstoffnanoröhrchen leichter in das magnetische Material integrieren (bessere Vernetzung mit den magnetischen Materialanteilen im magnetischen Material). Die Funktionalisierung bezeichnet hierbei eine gezielte Anordnung von reaktiven Atomen oder reaktiven Molekülen als reaktive Endgruppen an der äußeren Oberfläche der Kohlenstoffnanoröhrchen. Die reaktiven Endgruppen werden im magnetischen Material zum Vernetzen der Kohlenstoffnanoröhrchen miteinander und mit den magnetischen Bestandteilen des magnetischen Materials verwendet, so dass das magnetische Material unter Verwendung von funktionalisierten Kohlenstoffnanoröhrchen eine weiter verbesserte mechanische Stabilität im Vergleich zu magnetischen Materialien mit nicht-funktionalisierten Nanoröhrchen besitzt. Vorzugsweise sind die Kohlenstoffnanoröhrchen durch Anordnung OH-Endgruppen oder Metallen wie beispielsweise Co, Fe oder Ni an der äußeren Oberfläche funktionalisiert. Man kann solche Endgruppen beispielsweise durch kovalente Modifizierung in äußere Oberfläche der Kohlenstoffnanoröhrchen einbauen. Dazu behandelt man beispielsweise die Kohlenstoffnanoröhrchen mit Salpetersäure HNO₃, woraufhin sich NH₂ und/oder OH-Endgruppen an

der Oberfläche an bereits vorhandenen sogenannten Stone-Wales-Strukturdefekten der Kohlenstoffnanoröhrchen anordnen. Diese Defekte sind Rotationen der kovalenten Bindung zweier benachbarter Kohlenstoffatome in der Wand der Kohlenstoffnanoröhrchen. Ein anderes Verfahren zur Funktionalisierung von Kohlenstoffnanoröhrchen ist eine Plasmabehandlung mittels eines nicht-thermischen Plasmas eines Prozessgases, das durch Anlegen einer Anregungsspannung ionisiert wird. Für die Abscheidung von Metallpartikeln, beispielsweise aus Co, Fe, Ni kann eine Microwellen-Plasmaabscheidung verwendet werden. So lässt sich beispielsweise kolloidales Eisen auf der äußeren Oberfläche der Kohlenstoffnanoröhrchen abscheiden. Gleiches ist auch für andere Metalle möglich. Diese abgeschiedenen Metalle stellen mit dem Metallpulver im magnetischen Material eine mechanisch deutlich festere Vernetzung her als es mit nicht-funktionalisierten Kohlenstoffnanoröhrchen der Fall wäre.

[0011] Während große Kristalle aus dem erfindungsgemäßen magnetischen Material in Seltenerd-Permanentmagneten nur moderate Koerzitivfeldstärken zeigen, weisen dagegen Permanentmagnete mit einer einkristallinen Körnerstruktur im magnetischen Material eine sehr hohe Koerzitivfeldstärke auf. Je höher die Koerzitivfeldstärke ist, desto schwerer ist ein Magnet umzumagnetisieren und desto stärker ist er. Wird das magnetische Material entsprechend gemischt, zu Pulver vermahlen, gepresst und gesintert, so können die magnetischen Momente im Material durch das Anlegen eines externen Magnetfeldes während des Herstellungsprozesses sehr anisotrop ausgerichtet werden, was zu den sehr guten Eigenschaften eines Seltenerd-Permanentmagneten führt. In einer Ausführungsform umfasst das magnetische Material daher Körner nicht größer als 10 µm, bevorzugt nicht größer als 7 µm.

[0012] In einer Ausführungsform weisen die Nanoröhrchen einen Durchmesser kleiner als 30 nm, bevorzugt kleiner als 10 nm, auf. Bei diesen Durchmessern verleihen die Nanoröhrchen dem Material die verbesserten mechanischen Eigenschaften, insbesondere die gewünschte Festigkeit.

[0013] In einer Ausführungsform beträgt der Gewichtsanteil des Nanomaterials im magnetischen Material mehr als 0,1 %, bevorzugt mehr als 1 %, bevorzugter mehr als 2 %, noch bevorzugter mehr als 4 %. Mit steigendem Gewichtsanteil des Nanomaterials im magnetischen Material verbessern sich dessen mechanische Eigenschaften wie beispielsweise die Zug- und Bruchfestigkeit. In einer bevorzugten Ausführungsform beträgt der Gewichtsanteil des Nanomaterials im magnetischen Material weniger als 35 %, bevorzugt weniger als 20 %, bevorzugter weniger als 8 %, noch bevorzugter weniger als 6 %. Da das Nanomaterial nicht zu den magnetischen Eigenschaften beiträgt, sondern durch seine Anwesenheit die magnetisch wirksamen Anteile im magnetischen Material verdünnt, sollte zur simultanen Beibehaltung der guten magnetischen Eigenschaften des magnetischen Ma-

terials neben den mechanischen Eigenschaften der Anteil des Nanomaterials nicht zu hoch sein.

[0014] In einer Ausführungsform besitzen die Nanoröhrchen eine Länge kleiner $1,0\mu\text{m}$, bevorzugt kleiner $0,1\mu\text{m}$. Für das Erreichen von guten magnetischen Eigenschaften eines Permanentmagneten ist eine einkristallite Körnerstruktur des magnetischen Materials vorteilhaft. Damit die Nanoröhrchen ihre stabilisierende mechanische Wirkung entfalten können, sollte deren Länge kleiner als die Korngröße im magnetischen Material im späteren Permanentmagneten sein. Der stabilisierende Effekt wird dabei in erster Linie durch Nanoröhrchen als oder in der Verbindungsmatrix erreicht. Die Nanoröhrchen erhöhen dabei die Netzwerkdichte oder die Vernetzung der Matrix. Als Matrix wird hier das Material zwischen den Korngrenzen der einkristallinen Körner bezeichnet. Demgegenüber hat das Einbringen der Nanoröhrchen in die einkristallinen Körner einen nachrangigen Effekt auf die mechanischen Eigenschaften des magnetischen Materials. Vorzugsweise sind dabei diese Nanoröhrchen Kohlenstoffnanoröhrchen.

[0015] In einer Ausführungsform umfassen die Seltenerdmetalle des magnetischen Materials mindestens ein Element der Gruppe Neodym, Samarium, Praseodym, Dysprosium, Terbium, Gadolinium. In einer weiteren Ausführungsform umfassen die Übergangsmetalle des magnetischen Materials mindestens ein Element der Gruppe Eisen, Cobalt, Nickel. Seltenerd-Permanentmagnete aus diesen Elementen weisen die besten magnetischen Eigenschaften wie beispielsweise eine hohe Remanenzflussdichte B_r von bis zu mehr als 1 Tesla, eine hohe Koerzitivfeldstärke H_c von bis zu 2000 kA/m bei Raumtemperatur, eine Energiedichte $B_r \cdot H_c$ von bis zu 440 kJ/m^3 und eine Curie-Temperatur T_c von bis zu 800°C auf. In einer bevorzugten Ausführungsform umfasst das Material zur Erzeugung eines permanenten Magnetfeldes im magnetischen Material Neodym-Eisen-Bor, vorzugsweise anisotrop gesintertes $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Die Rohstoffe für Nd-Fe-B-Magnete sind gegenüber SmCo-Magnete deutlich kostengünstiger, da der Anteil von Neodym in Seltenerdmetallerzen um ein Vielfaches höher ist als der von Samarium.

[0016] Die Erfindung bezieht sich des Weiteren auf einen Permanentmagneten aus einem magnetischen Material gemäß der vorliegenden Erfindung. Permanentmagneten werden unter anderem für den Einbau in Elektromotoren oder Magnetlagern verwendet.

[0017] Die Erfindung bezieht sich des Weiteren auch auf einen Elektromotor oder ein Magnetlager umfassend einen erfindungsgemäßen Permanentmagneten aus einem magnetischen Material gemäß der vorliegenden Erfindung. Insbesondere für Anwendungen bei hohen Drehzahlen, beispielsweise für Drehzahlen (Umdrehungszahlen) im Bereich von 20.000 Umdrehungen pro Minute oder mehr ist das verwendete magnetische Material des Permanentmagneten in dem Elektromotor oder dem magnetischen Lager in der Lage, die dort auftretenden extremen Lasten unbeschadet zu überstehen. Die

Festigkeit und Bruchzähigkeit reiner NdFeB- oder SmCo-Magnete konnte deutlich um $20 - 30\%$ oder mehr über die Bruchdehnung von $0,1 - 0,15\%$ ohne Nanomaterialien bzw. Nanoröhrchen (beispielsweise Kohlenstoffnanoröhrchen) hinaus gesteigert werden. Damit führen die im Betrieb der Magnete aufgrund der Rotationsgeschwindigkeit auftretenden Fliehkräfte und die dadurch verursachte höhere Materialdehnung nicht zu einer Zerstörung der Magnet-Geometrien oder gar der Funktion des Magneten.

[0018] Unter Verwendung des erfindungsgemäßen magnetischen Material werden somit leistungsfähige Elektromotoren oder magnetische Lager mit verbesserten mechanischen Eigenschaften bereitgestellt, so dass diese Elektromotoren oder magnetische Lager für sehr hohe Drehzahlen zwischen 30000 Umdrehungen pro Minute bis zu 100000 Umdrehungen pro Minute eingesetzt werden können, was bei herkömmlichen magnetischen Materialien gemäß dem Stand der Technik ohne zusätzliche Maßnahmen wie zusätzliche angeordnete Bandagen nicht möglich ist.

[0019] Die Erfindung bezieht sich in Anspruch 13 auf ein Verfahren zur Herstellung eines erfindungsgemäßen Permanentmagneten mit einem erfindungsgemäßen magnetischen Material umfassend die Schritte

- Bereitstellen eines magnetischen Pulvers umfassend ein oder mehrere Seltenerdmetalle und ein oder mehrere Übergangsmetalle oder Übergangsmetalllegierungen;
- Bereitstellen von Nanomaterial umfassend Kohlenstoffnanoröhrchen mit einer Funktionalisierung durch OH- oder NH_2 -Endgruppen oder Metalle;
- Vermischen des magnetischen Pulvers mit einem für die Erzielung der gewünschten magnetischen und mechanischen Eigenschaften geeigneten Anteil an bereitgestelltem Nanomaterial zur Bereitstellung des magnetischen Materials;
- Herstellen eines Vorformlings aus dem magnetischen Material mittels geeigneter Mahl-, und Pressschritte, vorzugsweise zusätzlich umfassend ein oder mehrere Schmelzschriffe; und
- Sintern des magnetischen Materials mittels geeigneter Sinterschriffe zur Herstellen des Permanentmagneten aus dem Vorformling.

[0020] Der Schritt des Bereitstellens von mindestens einem Nanomaterial umfasst den Schritt des Funktionalisierens der Kohlenstoffnanoröhrchen. In einer bevorzugten Ausführungsform werden im Rahmen der Funktionalisierung OH-Endgruppen oder Metallen an der äußeren Oberfläche der Kohlenstoffnanoröhrchen angeordnet. Dazu können beispielsweise Techniken wie eine kovalente Modifizierung unter Einsatz von Säuren als Beispiel für eine Funktionalisierung mittels Nasschemie, mittels Plasmaabscheidung (beispielsweise Gasplasma, Mikrowellenplasma) oder mittels einer weiterführenden Funktionalisierung auf Basis eine Vorfunktionalisierung

unter Einsatz geeigneter Chemikalien verwendet werden.

[0021] Die pulvermetallurgische Herstellung des magnetischen Materials kann verschiedene Prozessschritte umfassen. Einerseits kann das magnetische Material schmelzmetallurgisch hergestellt werden, wobei verschiedene Vormaterialien verschmolzen und anschließend wieder gemahlen werden. Andererseits können durch einen Reduktions- und Diffusionsprozess aus Seltenerdoxiden und Metalle Legierungspulver als magnetisches Pulver hergestellt werden. In einer Ausführungsform werden durch einen Mahlschritt die Korngrößen im magnetischen Material auf kleiner $10\mu\text{m}$, bevorzugt auf kleiner $7\mu\text{m}$, begrenzt. Die dafür anzuwendenden Mahltechniken sind dem Fachmann bekannt.

[0022] Das Pulver aus (einkristallinen) Körnern aus dem erfindungsgemäßen magnetischen Material wird durch Pressen in eine Form für das nachfolgende Sintern gebracht. Hierbei kann das magnetische Material mittels Formpressen in einem Presswerkzeug oder durch isostatisches Pressen in die gewünschte mechanische Form gebracht werden. Während des Pressens wird von außen ein ausreichend starkes Magnetfeld angelegt, um die magnetischen Momente der anisotropen Pulverpartikel unter Feldeinwirkung homogen mit einer stabilen Vorzugsrichtung auszurichten. Beim Pressen wird dabei das Material verdichtet und dadurch die Ausrichtung der magnetischen Momente im magnetischen Material fixiert. Der so geformte Permanentmagnet vor Beginn des Sinterns wird auch als Vorformling bezeichnet. Er besitzt allerdings noch eine geringere Dichte als nach Ende des Sinterprozesses, so dass der Vorformling noch eine größere geometrische Ausdehnung als der fertige Permanentmagnet besitzt. Das Sintern kann mittels verschiedener Sinterverfahren ausgeführt werden. Nach dem Sintern ist der Permanentmagnet in der Regel ca. 15 - 20% gegenüber dem Vorformling geschrumpft. Dadurch werden Dichten im gesinterten magnetischen Material von bis zu $7,6\text{ g/cm}^3$ erreicht.

[0023] In einer Ausführungsform umfasst das Verfahren daher die Schritte

- Pressen des magnetischen Materials unter Magnetfeldeinwirkung zur anisotropen Ausrichtung der magnetischen Momente im Vorformling; und
- Sintern des Vorformlings unter Schutzgas oder Vakuum bei Temperaturen zwischen 1030°C und 1100°C .

[0024] In einer weiteren Ausführungsform umfasst das Verfahren des Weiteren eine Temperaturbehandlung des verdichteten magnetischen Materials nach Abschluss des Sinterns bei einer Temperatur zwischen 600°C und 900°C . Bei diesen Temperaturen wird das magnetische Material in die Nähe oder über die Curie-Temperatur hinaus erhitzt, so dass sich durch Anlegen eines äußeren Magnetfeldes die magnetischen Momente in eine der beiden anisotropen Richtungen ausrichten

lassen.

Kurze Beschreibung der Abbildungen

[0025] Diese und andere Aspekte der Erfindung werden im Detail in den Abbildungen wie folgt gezeigt:

- Fig.1: schematische Darstellung des (a) erfindungsgemäßen magnetischen Materials und (b) des erfindungsgemäßen Permanentmagneten;
- Fig.2: schematische Darstellung des (a) erfindungsgemäßen Elektromotors und (b) des erfindungsgemäßen Magnetlagers;
- Fig.3: eine Ausführungsform des Verfahrens zur Herstellung eines erfindungsgemäßen Permanentmagneten aus dem erfindungsgemäßen magnetischen Material.

Detaillierte Beschreibung der Ausführungsbeispiele

[0026] Fig.1 zeigt eine schematische Darstellung des (a) erfindungsgemäßen magnetischen Materials und (b) des erfindungsgemäßen Permanentmagneten. Das magnetische Material 3 zur Herstellung eines Seltenerd-Permanentmagneten 5 umfasst ein oder mehrere Seltenerdmetalle RE und ein oder mehrere Übergangsmetalle TM oder Übergangsmetalllegierungen TML zur Erzeugung eines permanenten Magnetfeldes sowie in dieser Ausführungsform Nanoröhrchen als Nanomaterial 2 (beispielsweise Kohlenstoffnanoröhrchen) zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften des magnetischen Materials 3. Mit Seltenerdmetallen RE wie Neodym, Samarium, Praseodym, Dysprosium, Terbium, Gadolinium und Übergangsmetallen TM wie Eisen, Cobalt, Nickel lassen sich Permanentmagnete (siehe Fig. 1(b)) mit Remanenzflussdichten B_r von bis zu mehr als 1 Tesla, Koerzitivfeldstärken H_c von bis zu 2000 kA/m bei Raumtemperatur, Energiedichten $B_r \cdot H_c$ von bis zu 440 kJ/m^3 und Curie-Temperaturen T_c von bis zu 800°C herstellen, insbesondere wenn das Material zur Erzeugung eines permanenten Magnetfeldes im magnetischen Material 3 Neodym-Eisen-Bor das magnetische Material 3 Körner nicht größer als $10\mu\text{m}$, bevorzugt nicht größer als $7\mu\text{m}$ umfasst. Mit Nanoröhrchen 2 (beispielsweise Kohlenstoffnanoröhrchen) im magnetischen Material 3 lassen sich die Bruchdehnungen des Permanentmagneten 5 deutlich über 0,1 - 0,15% wie bei Permanentmagneten nach dem Stand der Technik hinaus steigern, ohne dass dabei zusätzliche Komponenten wie äußere zusätzliche Bandagen um die Permanentmagnete herum angelegt werden müssen, insbesondere wenn die Nanoröhrchen 2 einen Durchmesser kleiner als 30nm , bevorzugt kleiner als 10nm , besitzen, der Gewichtsanteil des Nanomaterials 2 im magnetischen Material 3 mehr als 0,1% beträgt, bevorzugt mehr als 1%, bevorzugter mehr als 2%, noch bevorzugter mehr als 4%, dabei allerdings weniger als 35%, bevorzugt weniger als 20%, bevorzugter weniger als 8%, noch bevorzugter weniger als 6% beträgt und

die Nanoröhrchen 2 eine Länge kleiner $1,0\mu\text{m}$, bevorzugt kleiner $0,5\mu\text{m}$, besonders bevorzugt kleiner $0,1\mu\text{m}$ besitzen

[0027] Fig.2 zeigt eine schematische Darstellung des (a) erfindungsgemäßen Elektromotors 6 und (b) des erfindungsgemäßen Magnetlagers 7. Für Anwendungen bei hohen Drehzahlen, beispielsweise für Drehzahlen (Umdrehungszahlen) im Bereich von 20.000 Umdrehungen pro Minute oder mehr ist das verwendete magnetische Material 3 des Permanentmagneten 5 in dem Elektromotor 6 oder dem magnetischen Lager 7 in der Lage, die dort auftretenden extremen Lasten unbeschadet zu überstehen. Die Bruchfestigkeit reiner NdFeB- oder Sm-Co-Magnete von 0,1 - 0,15% konnte mit der Verwendung des erfindungsgemäßen magnetischen Materials bei der Herstellung des Permanentmagneten 5 deutlich um mindestens 20% - 30% gesteigert werden. Damit führen die im Betrieb der Elektromotoren 6 oder Magnetlager 7 aufgrund der Rotationsgeschwindigkeit auftretenden Fliehkräfte und die dadurch verursachte höhere Materialdehnungen im magnetischen Material 3 nicht zu einer Zerstörung der Magnet-Geometrien oder gar der Funktion des Permanentmagneten 5. Unter Verwendung des erfindungsgemäßen magnetischen Materials 3 werden somit leistungsfähige Elektromotoren 6 oder magnetische Lager 7 mit verbesserten mechanischen Eigenschaften bereitgestellt, so dass diese leistungsfähigen Elektromotoren 6 oder magnetische Lager 7 für höhere Drehzahlen eingesetzt werden können, als das bei herkömmlichen magnetischen Materialien gemäß dem Stand der Technik möglich wäre. Somit werden die verbesserten mechanischen Eigenschaften ohne zusätzliche Komponenten, die an die Permanentmagnete 5 oder Elektromotoren 6 oder Magnetlager 7 anzubringen sind, erreicht.

[0028] Fig.3 zeigt eine Ausführungsform des Verfahrens zur Herstellung eines erfindungsgemäßen Permanentmagneten 5 aus dem erfindungsgemäßen magnetischen Material 3. Das Verfahren umfasst dabei das Bereitstellen B1 eines magnetischen Pulvers 1 umfassend ein oder mehrere Seltenerdmetalle RE und ein oder mehrere Übergangsmetalle TM oder Übergangsmetalllegierungen TML, das Bereitstellen B2 mindestens eines Nanomaterials 2, das Vermischen VM des magnetischen Pulvers 1 mit einer für die Erzielung der gewünschten magnetischen und mechanischen Eigenschaften geeigneten Menge (Anteil) an Nanomaterial 2 zur Bereitstellung des magnetischen Materials 3, das Herstellen HV eines Vorformlings 4 aus dem magnetischen Material 3 mittels geeigneter Mahl-, und Pressschritte M, P, vorzugsweise zusätzlich umfassend ein oder mehrere Schmelzschriffe S, und das Sintern SI des magnetischen Materials 3 mittels geeigneter Sinterschriffe SI zur Herstellung des Permanentmagneten 5 aus dem Vorformling 4. Der Mahlschritt M kann dabei beispielsweise zur Begrenzung von Korngrößen im magnetischen Material 3 auf kleiner $10\mu\text{m}$, bevorzugt auf kleiner $7\mu\text{m}$, verwendet werden. Der Pressschritt P für das magnetische Material 3 wird unter Magnetfeldeinwirkung MF zur anisotropen

Ausrichtung der magnetischen Momente im Vorformling 4 angewendet. Das angelegte äußere Magnetfeld ist dabei ein homogenes Feld zur parallelen Ausrichtung möglichst vieler der magnetischen Momente im magnetischen Material 3. Beim Pressen P wird somit das magnetische Material 3 verdichtet und die Ausrichtung der magnetischen Momente im magnetischen Material 3 fixiert. Das Sintern SI des Vorformlings 4 wird beispielsweise unter Schutzgas oder Vakuum bei Temperaturen zwischen 1030°C und 1100°C ausgeführt. Nach dem Sintern SI ist der Permanentmagnet 5 in der Regel ca. 15 - 20% gegenüber dem Vorformling 4 geschrumpft und besitzt eine stabile Form. Dadurch werden Dichten im gesinterten magnetischen Material 3 von bis zu $7,6\text{g/cm}^3$ erreicht. Als letztem Schritt des Verfahrens in dieser Ausführungsform wird eine

[0029] Temperaturbehandlung TB am verdichteten magnetischen Material 3 nach Abschluss des Sinterns SI bei einer Temperatur zwischen 600°C und 900°C ausgeführt. Bei diesen Temperaturen wird das magnetische Material in die Nähe oder über die Curie-Temperatur erhitzt, so dass sich durch optionales Anlegen eines äußeren Magnetfeldes MF (gestrichelter Pfeil) die magnetischen Momente in eine der beiden anisotropen Richtungen im gesinterten magnetischen Material 3 ausrichten lassen.

[0030] Die hier gezeigten Ausführungsformen stellen nur Beispiele für die vorliegende Erfindung dar und dürfen daher nicht einschränkend verstanden werden.

Liste der Bezugszeichen

[0031]

35	1	magnetisches Pulver
	2	Nanomaterial bzw. Kohlenstoffnanoröhrchen
	3	erfindungsgemäßes magnetisches Material
	4	Vorformling
	5	Permanentmagnet
40	6	Elektromotor
	7	magnetisches Lager
	B1	Bereitstellen eines magnetischen Pulvers
	B2	Bereitstellen von Kohlenstoffnanoröhrchen
45	HV	Herstellen des Vorformlings
	M	Mahlschritt, Mahlprozess, Mahlen
	MF	Magnetfeldeinwirkung
	P	Pressschritt, Pressprozess, Pressen
	RE	Seltenerdmetalle
50	S	Schmelzschrift, Schmelzprozess
	SI	Sintern, Sinterschritt
	TB	Temperaturbehandlung nach erfolgtem Sintern
	TM	Übergangsmetalle
	TML	Übergangsmetalllegierungen
55	VM	Vermischen von magnetischem Pulver und Kohlenstoffnanoröhrchen

Patentansprüche

1. Ein magnetisches Material (3) zur Herstellung eines Seltenerd-Permanentmagneten (5) umfassend ein oder mehrere Seltenerdmetalle (RE) und ein oder mehrere Übergangsmetalle (TM) oder Übergangsmetalllegierungen (TML) zur Erzeugung eines permanenten Magnetfeldes und einen Anteil aus mindestens einem Nanomaterial (2) umfassend Nanoröhrchen zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften des magnetischen Materials (3) **dadurch gekennzeichnet, dass** die Nanoröhrchen Kohlenstoffnanoröhrchen sind, die an ihrer äußeren Oberfläche durch Anordnung von OH-Endgruppen, NH₂-Endgruppen oder Metallen an der äußeren Oberfläche funktionalisiert sind. 5
2. Das magnetische Material (3) nach Anspruche 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Gewichtsanteil des Nanomaterials (2) im magnetischen Material (3) mehr als 0,1% beträgt, bevorzugt mehr als 0,5%, bevorzugter mehr als 2%, noch bevorzugter mehr als 4% beträgt. 10
3. Das magnetische Material (3) nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Gewichtsanteil der Nanoröhrchen (2) im magnetischen Material (3) weniger als 35%, bevorzugt weniger als 20%, bevorzugter weniger als 8%, noch bevorzugter weniger als 6% beträgt. 15
4. Das magnetische Material (3) nach Anspruch 2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Nanoröhrchen (2) einen Durchmesser kleiner als 100nm, besonders bevorzugt kleiner als 10nm, aufweisen. 20
5. Das magnetische Material (3) nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Nanoröhrchen (2) eine Länge kleiner 1,0µm, bevorzugt kleiner 0,5 µm, besitzen. 25
6. Das magnetische Material (3) nach einem der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Nanoröhrchen mehrwandige Kohlenstoffnanoröhrchen sind. 30
7. Das magnetische Material (3) nach einem der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Seltenerdmetalle (RE) mindestens ein Element der Gruppe Neodym, Samarium, Praseodym, Dysprosium, Terbium, Gadolinium umfassen. 35
8. Das magnetische Material (3) nach einem der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Übergangsmetalle (TM) mindestens ein Element der Gruppe Eisen, Cobalt, Nickel umfassen. 40
9. Das magnetische Material (3) nach einem der Ansprüche 7 oder 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Material zur Erzeugung eines permanenten Magnetfeldes im magnetischen Material (3) Neodym-Eisen-Bor umfasst. 45
10. Das magnetische Material (3) nach einem der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das magnetische Material (3) Körner nicht größer als 10µm, bevorzugt nicht größer als 7µm umfasst. 50
11. Ein Permanentmagnet (5) aus einem magnetischen Material (3) nach Anspruch 1. 55
12. Ein Elektromotor (6) oder Magnetlager (7) umfassend einen Permanentmagneten (5) aus einem magnetischen Material (3) nach Anspruch 1.
13. Ein Verfahren zur Herstellung eines Permanentmagneten nach Anspruch 11 mit einem magnetischen Material nach Anspruch 1 umfassend die Schritte
 - Bereitstellen (B1) eines magnetischen Pulvers (1) umfassend ein oder mehrere Seltenerdmetalle (RE) und ein oder mehrere Übergangsmetalle (TM) oder Übergangsmetalllegierungen (TML);
 - Bereitstellen (B2) von mindestens einem Nanomaterial (2) umfassend Kohlenstoffnanoröhrchen, wobei die Kohlenstoffnanoröhrchen an ihrer äußeren Oberfläche durch Anordnung von OH-Endgruppen, NH₂-Endgruppen oder Metallen an der äußeren Oberfläche funktionalisiert sind;
 - Vermischen (VM) des magnetischen Pulvers (1) mit einem für die Erzielung der gewünschten magnetischen und mechanischen Eigenschaften geeigneten Anteil an bereitgestelltem Nanomaterial (2) zur Bereitstellung des magnetischen Materials (3);
 - Herstellen (HV) eines Vorformlings (4) aus dem magnetischen Material (3) mittels geeigneter Mahl-, und Pressschritte (M, P), vorzugsweise zusätzlich umfassend ein oder mehrere Schmelzschrte (S); und
 - Sintern (SI) des magnetischen Materials (3) mittels geeigneter Sinterschrte (SI) zur Herstellen des Permanentmagneten (5) aus dem Vorformling (4).

14. Das Verfahren nach Anspruch 13, des Weiteren umfassend den Schritt des Mahlens (M) des magnetischen Materials (3) zur Begrenzung von Korngrößen im magnetischen Material (3) auf kleiner 10 µm, bevorzugt auf kleiner 7 µm.

5

15. Das Verfahren nach Anspruch 13 oder 14, des Weiteren umfassend die Schritte

- Pressens (P) des magnetischen Materials (3) unter Magnetfeldeinwirkung (MF) zur anisotropen Ausrichtung der magnetischen Momente im Vorformling (4); und

10

- Sintern (SI) des Vorformlings (4) unter Schutzgas oder Vakuum bei Temperaturen zwischen 1030°C und 1100°C.

15

16. Das Verfahren nach einem der Ansprüche 13 bis 15, des Weiteren umfassend eine Temperaturbehandlung (TB) des verdichteten magnetischen Materials (3) nach Abschluss des Sinterns (SI) bei einer Temperatur zwischen 600°C und 900°C.

20

Claims

25

1. Magnetic material (3) for producing a rare-earth permanent magnet (5) comprising one or more rare-earth metals (RE) and one or more transition metals (TM) or transition-metal alloys (TML) for generating a permanent magnetic field, and a proportion made up of at least one nanomaterial (2) comprising nanotubes for improving the mechanical properties of the magnetic material (3),

30

characterised in that

the nanotubes are carbon nanotubes that are functionalised on their outer surface by arranging OH end groups, NH₂ end groups or metals on the outer surface.

35

2. Magnetic material (3) according to claim 1,

characterised in that

the proportion by weight of the nanomaterial (2) in the magnetic material (3) is greater than 0.1%, preferably greater than 0.5%, more preferably greater than 2%, and most preferably greater than 4%.

40

3. Magnetic material (3) according to claim 2,

characterised in that

the proportion by weight of the nanotubes (2) in the magnetic material (3) is less than 35%, preferably less than 20%, more preferably less than 8%, and most preferably less than 6%.

50

4. Magnetic material (3) according to claim 2 or 3,

55

characterised in that

the nanotubes (2) have a diameter of less than 100 nm, particularly preferably less than 10 nm.

5. Magnetic material (3) according to claim 4,

characterised in that

the nanotubes (2) have a length of less than 1.0 µm, preferably less than 0.5 µm.

6. Magnetic material (3) according to any of the preceding claims,

characterised in that

the nanotubes are multi-walled carbon nanotubes.

7. Magnetic material (3) according to any of the preceding claims,

characterised in that

the rare-earth metals (RE) contain at least one element from the group of neodymium, samarium, praseodymium, dysprosium, terbium and gadolinium.

8. Magnetic material (3) according to any of the preceding claims,

characterised in that

the transition metals (TM) contain at least one element from the group of iron, cobalt and nickel.

9. Magnetic material (3) according to any of claims 7 or 8,

characterised in that

the material contains neodymium-iron-boron for generating a permanent magnetic field in the magnetic material (3).

10. Magnetic material (3) according to any of the preceding claims,

characterised in that

the magnetic material (3) contains particles no larger than 10 µm, preferably no larger than 7 µm.

11. Permanent magnet (5) made of a magnetic material (3) according to claim 1.

40

12. Electric motor (6) or magnetic bearing (7) comprising a permanent magnet (5) made of a magnetic material (3) according to claim 1.

13. Method for producing a permanent magnet according to claim 11 comprising a magnetic material according to claim 1, comprising the steps of

45

- providing (B1) a magnetic powder (1) comprising one or more rare-earth metals (RE) and one or more transition metals (TM) or transition-metal alloys (TML);

- providing (B2) at least one nanomaterial (2) comprising carbon nanotubes, the carbon nanotubes being functionalised on their outer surface by arranging OH end groups, NH₂ end groups or metals on the outer surface;

- mixing (VM) the magnetic powder (1) with a proportion of provided nanomaterial (2) that is

- suitable for achieving the desired magnetic and mechanical properties, in order to provide the magnetic material (3);
- producing (HV) a preform (4) from the magnetic material (3) by means of suitable grinding and compressing steps (M, P), preferably additionally comprising one or more melting steps (S); and
 - sintering (SI) the magnetic material (3) by means of suitable sintering steps (SI) for producing the permanent magnet (5) from the preform (4).
14. Method according to claim 13, further comprising the step of grinding (M) the magnetic material (3) in order to limit particle sizes in the magnetic material (3) to less than 10 μm , preferably to less than 7 μm .
15. Method according to claim 13 or 14, further comprising the steps of
- compressing (P) the magnetic material (3) under the effect of a magnetic field (MF) for the anisotropic orientation of the magnetic moments in the preform (4); and
 - sintering (SI) the preform (4) in shielding gas or a vacuum at temperatures of between 1030 °C and 1100 °C.
16. Method according to any of claims 13 to 15, further comprising a heat treatment (TB) of the compacted magnetic material (3) upon completion of the sintering (SI) at a temperature of between 600 °C and 900 °C.

Revendications

1. Matériau magnétique (3) destiné à la fabrication d'un aimant permanent à terres rares (5) comprenant un ou plusieurs métaux des terres rares (RE) et un ou plusieurs métaux de transition (TM) ou alliages de métaux de transition (TML) pour générer un champ magnétique permanent et une proportion d'au moins un nanomatériau (2) comprenant des nanotubes afin d'améliorer les propriétés mécaniques du matériau magnétique (3),
caractérisé en ce que
les nanotubes sont des nanotubes de carbone, qui, sur leur surface externe, subissent une fonctionnalisation par la disposition de groupes terminaux OH, de groupes terminaux NH_2 ou de métaux sur la surface externe.
2. Matériau magnétique (3) selon la revendication 1,
caractérisé en ce que
la part en poids du nanomatériau (2) dans le matériau magnétique (3) est supérieure à 0,1 %, de préférence
3. Matériau magnétique (3) selon la revendication 2,
caractérisé en ce que
la part en poids des nanotubes (2) dans le matériau magnétique (3) est inférieure à 35 %, de préférence inférieure à 20 %, plus préférentiellement inférieure à 8 %, de préférence encore inférieure à 6 %.
4. Matériau magnétique (3) selon la revendication 2 ou 3,
caractérisé en ce que
les nanotubes (2) présentent un diamètre inférieur à 100 nm, de préférence encore inférieur à 10 nm.
5. Matériau magnétique (3) selon la revendication 4,
caractérisé en ce que
les nanotubes (2) possèdent une longueur inférieure à 1,0 μm , de préférence inférieure à 0,5 μm .
6. Matériau magnétique (3) selon l'une des revendications précédentes,
caractérisé en ce que
les nanotubes sont des nanotubes de carbone multi-parois.
7. Matériau magnétique (3) selon l'une des revendications précédentes,
caractérisé en ce que
les métaux des terres rares (RE) comprennent au moins un élément du groupe néodyme, samarium, praséodyme, dysprosium, terbium, gadolinium.
8. Matériau magnétique (3) selon l'une des revendications précédentes,
caractérisé en ce que
les métaux de transition (TM) comprennent au moins un élément du groupe fer, cobalt, nickel.
9. Matériau magnétique (3) selon la revendication 7 ou 8,
caractérisé en ce que
le matériau destiné à générer un champ magnétique permanent dans le matériau magnétique (3) comprend du néodyme-fer-bore.
10. Matériau magnétique (3) selon l'une des revendications précédentes,
caractérisé en ce que
le matériau magnétique (3) comprend des grains dont la taille ne dépasse pas 10 μm , de préférence dont la taille ne dépasse pas 7 μm .
11. Aimant permanent (5) constitué d'un matériau magnétique (3) selon la revendication 1.

12. Moteur électrique (6) ou palier magnétique (7) comprenant un aimant permanent (5) constitué d'un matériau magnétique (3) selon la revendication 1. tre 600 °C et 900 °C.
13. Procédé de fabrication d'un aimant permanent selon la revendication 11, au moyen d'un matériau magnétique selon la revendication 1, comprenant les étapes de 5
- mise à disposition (B1) d'une poudre magnétique (1) comprenant un ou plusieurs métaux des terres rares (RE) et un ou plusieurs métaux de transition (TM) ou alliages de métaux de transition (TML) ; 10
 - mise à disposition (B2) d'au moins un nanomatériau (2) comprenant des nanotubes de carbone, les nanotubes de carbone subissant, sur leur surface externe, une fonctionnalisation par la disposition de groupes terminaux OH, de groupes terminaux NH₂ ou de métaux sur la surface externe ; 15 20
 - mélange (VM) de la poudre magnétique (1) avec une proportion de nanomatériau (2) mis à disposition appropriée pour obtenir les propriétés magnétiques et mécaniques souhaitées afin de mettre à disposition le matériau magnétique (3) ; 25
 - fabrication (HV) d'une préforme (4) à partir du matériau magnétique (3), au moyen d'étapes de broyage et de compression (M, P) appropriées, de préférence comprenant en outre une ou plusieurs étapes de fusion (S) ; et 30
 - frittage (SI) du matériau magnétique (3), au moyen d'étapes de frittage (SI) appropriées, pour fabriquer l'aimant permanent (5) à partir de la préforme (4). 35
14. Procédé selon la revendication 13, comprenant en outre l'étape de broyage (M) du matériau magnétique (3) pour limiter la taille des grains du matériau magnétique (3) à une taille inférieure à 10 µm, de préférence inférieure à 7 µm. 40
15. Procédé selon la revendication 13 ou 14, comportant en outre les étapes de 45
- compression (P) du matériau magnétique (3) sous l'action d'un champ magnétique (MF) pour l'orientation anisotrope des moments magnétiques dans la préforme (4) ; et 50
 - frittage (SI) de la préforme (4) sous gaz protecteur ou sous vide à des températures comprises entre 1030 °C et 1100 °C.
16. Procédé selon l'une des revendications 13 à 15, comprenant en outre un traitement thermique (TB) du matériau magnétique (3) comprimé une fois le frittage (SI) terminé, à une température comprise en- 55

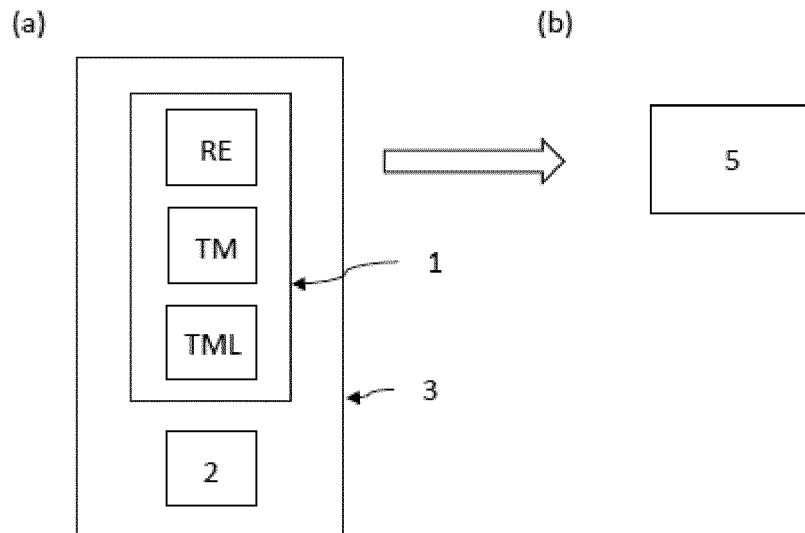


FIG.1

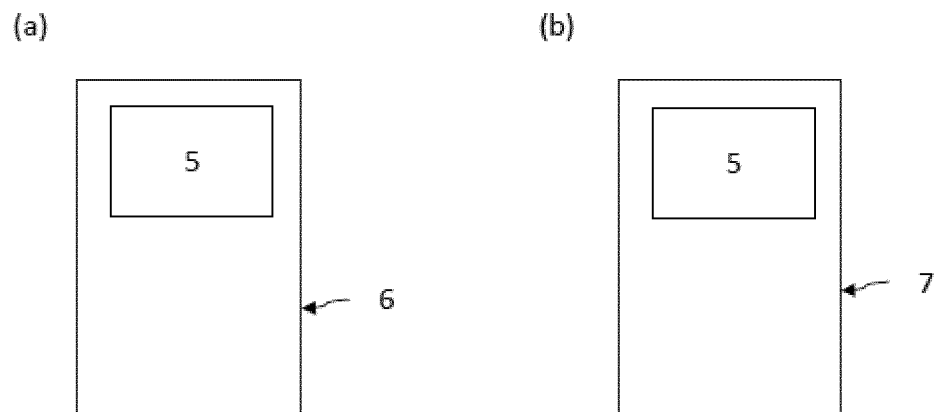


FIG.2

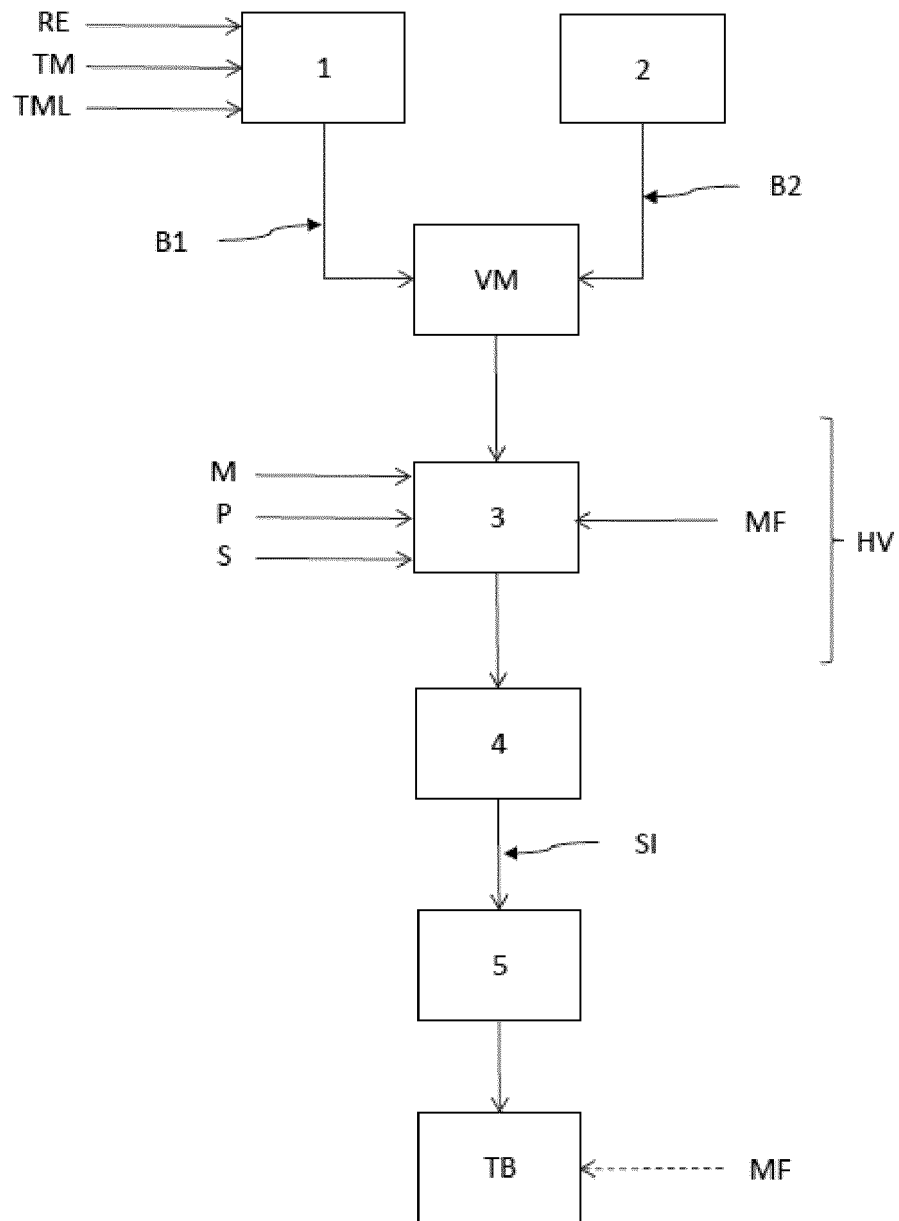


FIG.3

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- DE 10020946 A1 [0003]
- US 2011031432 A1 [0005]
- CN 101430958 B [0005]