

(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
8. September 2006 (08.09.2006)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2006/092421 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
A61B 19/00 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2006/060375

(22) Internationales Anmeldedatum:
1. März 2006 (01.03.2006)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2005 010 489.4 4. März 2005 (04.03.2005) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT [DE/DE]; Wittelsbacherplatz 2, 80333 München (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): REINSCHKE, Johannes [DE/DE]; Roritzer Str. 8, 90419 Nürnberg (DE). RIES, Günter [DE/DE]; Schobertweg 2, 91056 Erlangen

(DE). RÖCKELEIN, Rudolf [DE/DE]; Hofmannstr. 66d, 91052 Erlangen (DE).

(74) Gemeinsamer Vertreter: SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT; Postfach 22 16 34, 80506 München (DE).

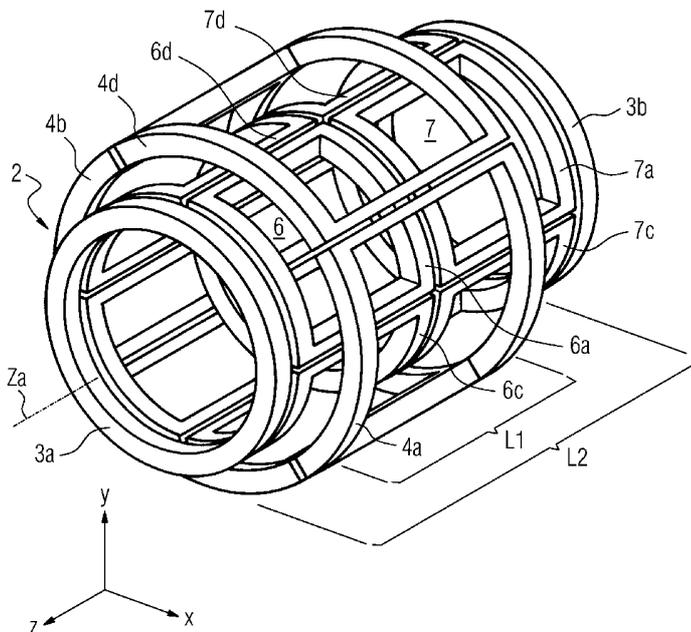
(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: COIL SYSTEM FOR A CONTACTLESS MAGNETIC NAVIGATION OF A MAGNETIC BODY IN A WORKING CHAMBER

(54) Bezeichnung: SPULENSYSTEM ZUR BERÜHRUNGSFREIEN MAGNETISCHEN NAVIGATION EINES MAGNETISCHEN KÖRPERS IN EINEM ARBEITSRAUM



(57) Abstract: A magnetic body is contactlessly displaceable in a working chamber (A) by means of a magnetic coil system (2) consisting of fourteen individually controllable individual coils (3a, 3b; 4a bis 4d; 6a to 6d). In addition, three magnetic field components and five magnetic field gradients are produced. Apart from two front individual coils (3a, 3b), the other, in particular saddle-shaped individual coils (4a bis 4d; 6a bis 6d) of the coil system (2) are arranged on lateral tubular surfaces (MF1, MF2) surrounding the working chamber (A).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2006/092421 A1



ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht

— vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eintreffen

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

(57) Zusammenfassung: Mit dem Magnetspulensystem (2) aus vierzehn einzeln ansteuerbaren Einzelspulen (3a, 3b; 4a bis 4d; 6a bis 6d) ist ein magnetischer Körper berührungsfrei in einem Arbeitsraum (A) zu bewegen. Hierzu sind mit dem Spulensystem drei Magnetfeldkomponenten sowie fünf Magnetfeldgradienten zu erzeugen. Bis auf zwei stirnseitige Einzelspulen (3a, 3b) sind die übrigen, insbesondere sattelförmigen Einzelspulen (4a bis 4d; 6a bis 6d) des Spulensystems (2) auf rohrförmigen, den Arbeitsraum (A) umschließenden Mantelflächen (MF1, MF2) angeordnet.

Beschreibung

Spulensystem zur berührungsfreien magnetischen Navigation eines magnetischen Körpers in einem Arbeitsraum

5

Die Erfindung bezieht sich auf ein Spulensystem mit mehreren einzeln ansteuerbaren Einzelspulen zu einer berührungsfreien magnetischen Navigation eines magnetischen Körpers in einem drei-dimensionalen, in z-Richtung eines zugeordneten rechtwinkligen x,y,z -Koordinatensystems zugänglichen Arbeitsraum. Ein derartiges Spulensystem ist aus „*IEEE Transactions on Magnetics*“, Vol. 32, No. 2, März 1996, Seiten 320 bis 328 zu entnehmen.

15 In der Medizin werden Endoskope und Katheter verwendet, die über Schnitte oder Körperöffnungen eingeführt werden und in Längsrichtung von außen verschiebbar und damit nur in einer Dimension navigierbar sind. Mit Lichtleitern ist eine optische Inspektion möglich, wobei eine Endoskopiespitze und damit die Blickrichtung durch Steuerdrähte schwenkbar sein kann. Durch einen Arbeitskanal im Katheter lassen sich zusätzliche Einrichtungen insbesondere zur Biopsie ausbilden. Die hierbei verwendeten Sonden sind jedoch insbesondere an Verzweigungen, die sich an von einer Körperöffnung weiter
25 entfernten Stellen befinden, nur beschränkt navigierbar. Deshalb könnte eine berührungslose Kraftausübung von außen eine Erweiterung des Anwendungsbereichs mit sich bringen.

Aus der eingangs genannten Veröffentlichung sowie der
30 US 5 125 888 A ist ein Magnetspulensystem zu einer berührungslosen magnetischen Sondensteuerung zu entnehmen, das sechs vorzugsweise supraleitende Einzelspulen umfasst, die auf den Flächen eines Würfels angeordnet sind, deren Lage in einem rechtwinkligen x,y,z -Koordinatensystem mathematisch zu
35 beschreiben ist. Mit diesen Spulen sind variable Feldrichtungen und Feldgradienten zu erzeugen, um einen Katheter mit magnetischem Material oder magnetische Implantate zu Thera-

piezwecken in einem zu untersuchenden, beispielsweise menschlichen Körper zu führen bzw. zu bewegen. Mit einem Magnetspulensystem aus sechs Einzelspulen ist jedoch keine uneingeschränkte Navigationsfreiheit des magnetischen Körpers zu erreichen.

Die Erzeugung von magnetischen Feldgradienten ist insbesondere von MRI (Magnet Resonance Imaging)-Anlagen zur medizinischen Diagnostik bekannt. Ein entsprechendes Spulensystem geht z.B. aus der DE 39 37 148 C2 hervor.

Es ist auch bekannt, derartige Feldgradienten zur Bestimmung der augenblicklichen Position und Ausrichtung eines Objektes wie z.B. eines Katheters in einem dreidimensionalen Arbeitsraum wie z.B. einem menschlichen Körper auszunutzen. Ein entsprechendes Gerät ist der WO 00/13586 A zu entnehmen. Hierzu enthält das Gerät einen entsprechenden Feldgenerator zum Erzeugen von MRI-Gradientenfeldern, mit denen in Sensorspulen des Objektes elektrische Spannungen induziert werden. Diese elektrischen Spannungen werden dann über ein mit dem Objekt verbundenes Leitungssystem an eine signalverarbeitende Elektronik weitergeleitet. Eine berührungsfreie, magnetisch steuerbare Bewegung des Objektes ist dabei jedoch nicht möglich.

In der US 6 241 671 ist ein Magnetspulensystem mit drei Spulen beschrieben, in der US 6 529 761 B2 eine Anordnung einiger um einen Patienten drehbar angeordneter Permanentmagnete, deren Feld durch magnetische Blenden beeinflussbar ist und die eine magnetische Welle zur Fortbewegung einer magnetischen Sonde erzeugen können.

Ferner sind auch Magnetspulensysteme mit drehbaren Permanentmagneten zur Steuerung von magnetischen Kathetern insbesondere unter einer Röntgenkontrolle bekannt.

Über Verfahren zu einer Lagestabilisierung von magnetischen Sondenkörpern durch Rückkopplung ist bei diesem Stand der

Technik nichts ausgesagt; es ist davon auszugehen, dass sich ein magnetischer Sondenkörper, durch Feldrichtung und Gradient vorgegeben, immer an eine innere Fläche innerhalb eines zu untersuchenden Körpers anlegt.

5

In der WO 96/03795 A1 ist ein Verfahren mit zusätzlichen Pulsspulen beschrieben, mit denen eine magnetische Sonde durch genau definierte Strompulse unter Computerkontrolle schrittweise zu bewegen ist.

10

Es sind auch sogenannte Videokapseln z.B. aus der Zeitschrift "Gastrointestinal Endoscopy", Vol. 54, No. 1, Seiten 79 bis 83 bekannt, die zu einer Inspektion des Verdauungstraktes dienen. Hierbei geschieht die Fortbewegung der Videokapsel durch die natürliche Darmbewegung; d.h., die Fortbewegung und Blickrichtung ist rein zufällig.

15

In der DE 101 42 253 C1 ist eine entsprechende Videokapsel beschrieben, die mit einem Stabmagneten sowie mit Video- und anderen Interventionseinrichtungen ausgestattet ist. Auf den Stabmagneten soll ein externes Magnetpulensystem Kräfte zur Navigation ausüben. Es ist ein freischwebender, sogenannter Helikoptermodus mit externer Steuerung durch eine 6D-Maus, eine Rückmeldung der Kraft über die Maus sowie eine Positionsrückmeldung durch einen Transponder erwähnt. Einzelheiten zur Realisierung des entsprechenden Magnetpulensystems und zum Betrieb seiner Einzelspulen gehen aus der Schrift nicht hervor.

20

25

Mit der nicht-vorveröffentlichten DE-Patentanmeldung 103 40 925.4 vom 05.09.2003 ist ein Magnetpulensystem zu einer berührungsfreien Navigation bzw. Bewegung eines (ferro)magnetischen Körpers wie z.B. eines Stabmagneten in einem Arbeitsraum vorgeschlagen. Mit diesem Magnetsystem ist der Körper in dem Arbeitsraum auszurichten und/oder ist auf den Körper eine Kraft auszuüben. Die Ausrichtung sowie die Größe und Richtung der Kraft auf den Körper sind dabei magnetisch

30

35

und ohne mechanische Verbindung von außen vorgebar. Hierzu wird von einem drei-dimensionalen Arbeitsraum ausgegangen, der von in einem rechtwinkligen x, y, z -Koordinatensystem aufgespannten Flächen umgeben ist. Das Spulensystem weist vier-

5 zehne einzeln ansteuerbare Einzelspulen auf, die zur Erzeugung der drei Magnetfeldkomponenten B_x , B_y und B_z sowie von fünf Magnetfeldgradienten aus der bezüglich ihrer Diagonalen D symmetrischen Gradientenmatrix

$$D \begin{pmatrix} \frac{dB_x}{dx} & \frac{dB_y}{dx} & \frac{dB_z}{dx} \\ \frac{dB_x}{dy} & \frac{dB_y}{dy} & \frac{dB_z}{dy} \\ \frac{dB_x}{dz} & \frac{dB_y}{dz} & \frac{dB_z}{dz} \end{pmatrix}$$

10

ausgebildet sind, wobei mit den Einzelspulen zwei der drei Diagonalelemente der Gradientenmatrix und je eines der Außen-

15 diagonalelemente aus den drei zur Diagonalen symmetrischen Gradientenelementpaaren der Gradientenmatrix zu erzeugen sind.

15

Bei dem vorgeschlagenen, den Arbeitsraum käfigartig umschließenden Magnetspulensystem wird davon ausgegangen, dass durch die von den Maxwell-Gleichungen auferlegten Bedingungen

20 $\text{rot}H=0$ und $\text{div}B=0$ - wobei die in Fettdruck angegebenen Größen Vektoren symbolisieren - von den möglichen sechs Feldgradienten $\frac{dB_x}{dy}$, $\frac{dB_y}{dx}$, $\frac{dB_y}{dz}$, $\frac{dB_z}{dx}$, $\frac{dB_x}{dy}$ und $\frac{dB_z}{dz}$ nur drei unabhängige Gradienten erzeugt werden müssen und von den drei Feldgradienten $\frac{dB_x}{dx}$, $\frac{dB_y}{dy}$ und $\frac{dB_z}{dz}$ nur zwei. Dabei müs-

25 sen den vierzehn Einzelspulen dann acht verschiedene Strommuster entsprechend den acht magnetischen Freiheitsgraden aufgeprägt werden können mit Strömen gleicher Größe. Diese Strommuster erzeugen jeweils vorwiegend eine Feldkomponente oder einen Feldgradienten. Durch Überlagern kann dann jede

30 nach den Maxwell-Gleichungen zulässige Kombination von Magnetfeldkomponenten und Feldgradienten erzeugt werden.

Auf diese Weise ist eine berührungsfreie Steuerung/Bewegung (= Navigation) eines magnetischen Körpers im Sinne einer (mechanisch) berührungsfreien Ausrichtung dieses Körpers und/oder einer Kraftausübung auf diesen, beispielsweise einer mit einem magnetischen Element verbundenen Sonde wie z.B. einem Katheter, Endoskop oder einer Videokapsel gemäß der DE 101 42 253 C1, mittels Magnetfeldern in einem Arbeitsraum ermöglicht.

Für das vorgeschlagene Magnetsystem können zusätzlich noch die folgenden Gestaltungsmerkmale einzeln oder in Kombination miteinander vorgesehen werden:

- So können die vierzehn einzeln ansteuerbaren Einzelspulen auf paarweise gegenüberliegenden Flächen und wenigstens einer rohrförmigen, sich in z-Richtung erstreckenden Mantelfläche angeordnet sein. Bis auf die Mantelfläche können dabei die Flächen einen Quader oder Würfel aufspannen. Sie brauchen nicht unbedingt eben ausgebildet zu sein.

20

- Es können dabei mindestens sechs der Einzelspulen auf den paarweise gegenüberliegenden stirnseitigen Flächen bzw. seitlichen Flächen des Arbeitsraums liegen und zur Erzeugung der drei Magnetfeldkomponenten B_x , B_y , B_z sowie der zwei Diagonalelemente der Gradientenmatrix dienen. Zugleich können mindestens vier der Einzelspulen auf der wenigstens einen rohrförmigen, den Arbeitsraum umschließenden Mantelfläche in Umfangsrichtung gesehen verteilt angeordnet sein und zur Erzeugung von mindestens einem Außerdiagonalelement der Gradientenmatrix dienen. Zusammen mit den übrigen Einzelspulen lassen sich so die erforderlichen drei Außerdiagonalelemente ausbilden.

- Hierfür können sechs der Einzelspulen als drei Spulenpaare auf den paarweise gegenüber liegenden stirnseitigen bzw. seitlichen Flächen des Arbeitsraums liegen

und

acht der Einzelspulen zwei Spulenanordnungen bilden, die in z-Richtung gesehen hintereinander auf der wenigstens einer rohrförmigen Mantelfläche liegen und deren jeweils vier Einzelspulen auf der Mantelfläche in Umfangsrichtung gesehen
5 verteilt angeordnet sind und zur Erzeugung der drei Außerdiagonalelementen der Gradientenmatrix dienen.

• Stattdessen lässt sich bei dem vorgeschlagenen Spulensystem auch vorsehen,
10

dass auf den stirnseitigen Flächen des Arbeitsraums ein Spulenpaar von Einzelspulen liegt und zur Erzeugung der Magnetfeldkomponente B_z sowie des Diagonalelementes dB_z/dz der Gradientenmatrix dient,

15 dass auf den paarweise gegenüberliegenden seitlichen Flächen jeweils eine Spulenanordnung aus jeweils zwei in z-Richtung gesehen hintereinander angeordneten Einzelspulen liegt und zur Erzeugung der Magnetfeldkomponente B_x bzw. B_y dient,

20 dass auf der auf wenigstens einen rohrförmigen Mantelfläche eine Spulenanordnung aus vier in Umfangsrichtung gesehen verteilt angeordneten Einzelspulen liegt

und

dass die Spulenanordnungen auf den seitlichen Flächen und der Mantelfläche zur Erzeugung eines weiteren Diagonalelementes
25 und der drei Außendiagonalelementen der Gradientenmatrix dienen.

• Die wenigstens eine Mantelfläche kann sich dabei innerhalb des von den sechs paarweise gegenüber liegenden Flächen
30 aufgespannten Innenraums befinden.

• Bei den vorstehend wiedergegebenen Ausführungsformen können die auf der (gedachten) Mantelfläche liegenden Feldgradientenspulen sattelförmig gestaltet sein. Dabei ist es möglich,
35 dass ihre auf der Mantelfläche in Umfangsrichtung verlaufenden stirnseitigen Bogenteile in Umfangsrichtung gesehen

nebeneinander liegen, d.h. jeweils einen Bogenwinkel von $> 90^\circ$ einnehmen, oder sich auch überlappen.

• Darüber hinaus können zumindest einige der Feldkomponentenspulen als ebene Rechteckspulen oder Kreisspulen gestaltet sein.

• Spulenpaare und/oder Spulenanordnungen können jeweils aus Einzelspulen mit gleicher Form gebildet sind.

10

• Zur Erzeugung der Magnetfeldkomponenten können die Spulenpaare aus Einzelspulen orthogonal zueinander angeordnet sind.

15

• Auch lassen sich Teile aus weichmagnetischem Material an der Außenseite des Spulensystems zur Feldverstärkung und/oder Feldabschirmung zuordnen.

20

• Ferner können Mittel zur Detektion der Position des magnetischen Körpers innerhalb des Arbeitsraums vorgesehen sein.

• Zur Ansteuerung der vierzehn Einzelspulen des Magnetspulensystems wird im Allgemeinen ein Computer eingesetzt, indem er ihre jeweils zugeordnete Stromversorgung in Abhängigkeit von der jeweiligen Position des zu bewegendes Magnetkörpers ansteuert.

25

Bei dem vorgeschlagenen Magnetspulensystem wird also ein aus acht Sattelspulen bestehender Kreiszyylinder von einem aus sechs Helmholtzspulen bestehenden Quader umschlossen. Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, dieses Magnetspulensystem dahingehend zu verbessern, dass der Leistungsbedarf zum Betrieb des Systems verringert wird.

30

35 Diese Aufgabe wird mit den in Anspruch 1 angegebenen Maßnahmen gelöst. Demgemäß weist das Magnetspulensystem zu einer berührungsfreien magnetischen Navigation eines magnetischen

Körpers in einem drei-dimensionalen, in z-Richtung eines
 einem rechtwinkligen x, y, z -Koordinatensystems zugänglichen
 Arbeitsraum vierzehn einzeln ansteuerbare Einzelspulen auf,
 die zur Erzeugung der drei Magnetfeldkomponenten B_x , B_y und B_z
 5 sowie von fünf Magnetfeldgradienten aus der bezüglich ihrer
 Diagonalen D symmetrischen und spurfreien Gradientenmatrix GM

$$GM = \begin{pmatrix} \frac{dB_x}{dx} & \frac{dB_y}{dx} & \frac{dB_z}{dx} \\ \frac{dB_x}{dy} & \frac{dB_y}{dy} & \frac{dB_z}{dy} \\ \frac{dB_x}{dz} & \frac{dB_y}{dz} & \frac{dB_z}{dz} \end{pmatrix}$$

↓

ausgebildet sind. Dabei lassen sich mit den Einzelspulen zwei
 15 der drei Diagonalelemente der Gradientenmatrix GM und je
 eines der Außerdiagonalelemente aus den drei zur Diagonalen
 symmetrischen Gradientenelementpaaren der Gradientenmatrix GM
 erzeugen. Zur Erzeugung der drei Magnetfeldkomponenten B_x ,
 B_y , B_z sowie der zwei Diagonalelemente der Gradientenmatrix
 20 GM sollen mindestens sechs der Einzelspulen vorgesehen sein,
 von denen mindestens zwei auf stirnseitigen Flächen des Spu-
 lensystems und die restlichen Einzelspulen des Spulensystems
 auf wenigstens einer ersten, rohrförmigen, sich in z -Richtung
 erstreckenden, den Arbeitsraum umschließenden Mantelfläche
 25 liegen.

Die Erfindung geht dabei von der Erkenntnis aus, dass mit
 einer modifizierten Geometrie der Helmholtzspulen des vorge-
 schlagenen Magnetspulensystems ein vergleichsweise geringerer
 30 Leistungsbedarf zu erreichen ist. Dies spart Betriebskosten
 und Herstellungskosten des Gesamtsystems, weil die erforder-
 lichen Leistungsverstärker, mit denen die Spulenströme der

einzelnen Spulen gesteuert werden, sowie das Kühlsystem auf eine geringere maximale Leistung hin ausgelegt werden können.

Vorteilhafte Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Magnetspulensystems gehen aus den von Anspruch 1 abhängigen Unteransprüchen hervor. Dabei kann die Ausführungsform des Magnetspulensystems nach Anspruch 1 mit den Merkmalen eines der Unteransprüche oder vorzugsweise auch denen aus mehreren Unteransprüchen kombiniert werden.

10

Insbesondere kann das Magnetspulensystem nach der Erfindung zusätzlich noch folgende Merkmale aufweisen bzw. folgendermaßen ausgestaltet sein:

15 - So können bei dem Spulensystem mindestens vier der Einzelspulen auf wenigstens einer weiteren, rohrförmigen, den Arbeitsraum umschließenden Mantelfläche in Umfangsrichtung gesehen verteilt liegen.

20 - Dabei können bevorzugt sechs der Einzelspulen paarweise auf den gegenüber liegenden stirnseitigen Flächen bzw. der mindestens einen ersten Mantelfläche liegen und acht der Einzelspulen zwei Spulenanordnungen bilden, die in z-Richtung gesehen hintereinander auf der wenigstens einen weiteren
25 Mantelfläche liegen und deren jeweils vier Einzelspulen auf der weiteren Mantelfläche in Umfangsrichtung gesehen verteilt angeordnet sind.

- Prinzipiell kann sich bei dem Spulensystem die wenigstens
30 eine weitere Mantelfläche innerhalb der wenigstens einen ersten Mantelfläche befinden. Dabei ist auch möglich, dass die einzelnen Mantelflächen jeweils von einer konzentrischen Anordnung mehrerer Mantelflächen gebildet werden. Dabei kann außerdem zwischen den auf der ersten Mantelfläche
35 liegenden Einzelspulen und den auf der weiteren Mantelfläche liegenden Einzelspulen ein radialer Abstand eingehalten sein. Selbstverständlich ist es aber auch möglich, dass die

umhüllende Außenfläche der inneren Einzelspulen direkt die erste Mantelfläche für die äußeren Einzelspulen bildet, als kein radialer Abstand vorhanden ist.

- 5 - Bevorzugt sind die auf der wenigstens einen ersten Mantelfläche liegenden Feldkomponentenspulen und/oder die auf der wenigstens einen weiteren Mantelfläche liegenden Feldgradientenspulen sattelförmig gestaltet sind. Die sattelförmigen Feldkomponentenspulen können dabei insbesondere in Umfangsrichtung gesehen um wenigstens annähernd 45° gedreht gegenüber den sattelförmigen Feldgradientenspulen angeordnet sein.
- 10
- Außerdem können vorteilhaft die stirnseitigen Bogenteile von in Umfangsrichtung gesehen benachbarten sattelförmigen Spulen nebeneinander liegen oder sich überlappen.
- 15
- Die stirnseitigen Feldkomponentenspulen können als ebene Ringspulen gestaltet sein, die bevorzugt auf der weiteren Mantelfläche der Feldgradientenspulen liegen können.
- 20
- Dabei ist es im Hinblick auf eine Begrenzung des Leistungsbedarfs des Spulensystems besonders vorteilhaft, wenn die Länge der Spulenanordnung aus den sattelförmigen Feldkomponentenspulen in z-Richtung kleiner, vorzugsweise um 10 bis 25 % kleiner ist als die entsprechende Länge der Spulenanordnung aus den Ringspulen und den Feldgradientenspulen.
- 25
- Vorteilhaft können Spulenpaare und/oder Spulenanordnungen jeweils aus Einzelspulen mit gleicher Form gebildet werden.
- 30
- Stattdessen ist es prinzipiell auch möglich, dass Spulenpaare und/oder Spulenanordnungen jeweils aus Einzelspulen mit unterschiedlichem Spulenquerschnitt gebildet werden. D.h., die Einzelspulen innerhalb eines Spulenpaares brauchen nicht unbedingt gleiche Durchmesser aufzuweisen.
- 35

- Zur Erzeugung der Magnetfeldkomponenten werden im Allgemeinen orthogonal zueinander angeordnete Spulenpaare aus Einzelspulen vorgesehen.
- 5 - Besonders vorteilhaft ist es im Hinblick auf eine Optimierung des Leistungsbedarfs, wenn Einzelspulen mit unterschiedlichem Wicklungsquerschnitt und/oder Querschnitt ihrer Leiter verwendet werden. So können insbesondere die Einzelspulen auf verschiedenen Mantelflächen verschiedene
10 Wicklungsquerschnitte besitzen. Ein Wicklungsquerschnitt ist dabei der im Allgemeinen von mehreren Leitern gebildete Wicklungsstrang. Vorteilhaft lassen sich auch Leiter mit unterschiedlichem Aspektverhältnis (Verhältnis von Breitseite zu Schmalseite) verwenden.
- 15 - Für das erfindungsgemäße Spulensystem können an sich beliebige elektrische Leiter zum Einsatz kommen. Selbstverständlich ist auch eine Verwendung von zu kühlenden Leitern wie z.B. von metallischen Low- T_c - oder oxidischen High- T_c -
20 Supraleitern möglich. Deshalb kann eine Kühlung zumindest einzelner der Einzelspulen erforderlich werden.
- Zu einer Feldverstärkung und/oder Feldabschirmung können zusätzlich Teile aus weichmagnetischem Material an der Außenseite des Spulensystems vorgesehen werden.
25
- Bevorzugt ist das Spulensystem noch mit Mitteln zu einer Detektion der Position des magnetischen Körpers innerhalb des Arbeitsraums ausgestattet.
30
- Im Allgemeinen werden die Einzelspulen des Spulensystems in an sich bekannter Weise mit Hilfe eines Computers angesteuert.
- 35 Die Erfindung wird nachfolgend anhand der Zeichnung noch weiter erläutert, in der eine bevorzugte Ausführungsform eines

erfindungsgemäßen Magnetspulensystems veranschaulicht ist.

Dabei zeigen jeweils schematisch

- deren Figur 1 diese Ausführungsform in Schrägansicht,
und

5 - deren Figur 2 einen Querschnitt durch das Magnetspulensystem.

Dabei sind in den Figuren sich entsprechende Teile mit denselben Bezugszeichen versehen.

10 Mit einem Magnetspulensystem nach der Erfindung lässt sich ein magnetischer Probekörper berührungslos in einem Arbeitsvolumen bewegen. Dabei sind die Größe und die Richtung der Kraft und des Drehmomentes auf diesen Probekörper magnetisch und ohne mechanische Verbindung von außen vorgebar. Insbesondere in Anwendungen der Medizin kann so eine mit einem
15 solchen magnetischen Probekörper ausgestattete Sonde ein Katheter oder ein Endoskop mit Magnetelement oder eine kleine Fernsehkamera mit Beleuchtung und Sender sein, die Videobilder aus dem Körperinneren wie z.B. dem Verdauungstrakt sendet.
20 Darüber hinaus können ferromagnetische Fremdkörper wie z.B. eine Nadel oder Funktionsmodule in von außen unzugänglichen Objekten oder Räumen durch Magnetkräfte bewegt oder entfernt werden. Neben der Anwendung in der Medizin ist ebenso gut ein Einsatz eines erfindungsgemäßen Magnetspulensystems
25 auch auf anderen Gebieten wie z.B. in kontaminierten Räumen wie beispielsweise von Behältern möglich. Mit zugeordneten Magnetsonden können auch andere, insbesondere unzugängliche Objekte beispielsweise intern inspiziert werden, wobei die Sonden selbstverständlich auch mit anderer oder zusätzlicher
30 Funktionalität ausgestattet sein können.

Als ein Ausführungsbeispiel eines solchen ferromagnetischen Körpers sei nachfolgend eine Sonde angenommen, der ferromagnetisches Material zugeordnet ist oder die Teile aus einem
35 solchen Material enthält. Der ferromagnetische Körper der Sonde kann deshalb auch als „Magnetkörper“ oder „Magnetsonde“ bezeichnet werden.

Mit Hilfe des Magnetspulensystems kann so der Magnetkörper und damit die Sonde in allen drei lateralen Freiheitsgraden und in Blickrichtung in den zwei rotatorischen Freiheitsgraden durch magnetische Kräfte von außen gesteuert werden.
5 Außerdem erlaubt das Magnetspulensystem vorteilhaft von außen einen Zugang in z-Richtung, z.B. um zu behandelnde Personen in dem Arbeitsraum im Inneren zu positionieren.

10 Die Figuren zeigen ein typisches Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Magnetspulensystems, mit dem eine entsprechende Navigation bzw. räumliche Ansteuerung und/oder Bewegung eines Magnetkörpers unter Krafteinwirkung auf diesen durch Ausbildung entsprechender Magnetfelder ermöglicht wird.
15 Dabei ist die Wirkungsweise des Spulensystems analog zu dem des Magnetspulensystems, wie es in der genannten früheren DE-Patentanmeldung beschrieben ist. Bei dem dort erläuterten Spulensystem wird bevorzugt ein aus acht Sattelspulen gebildeter Kreiszyylinder von einem aus sechs Helmholtzspulen gebildeten Quader umschlossen. Bei dem erfindungsgemäßen Magnetspulensystem werden zwar ebenfalls entsprechende acht Sattelspulen vorgesehen; jedoch werden diese von vier weiteren Sattelspulen umschlossen, die die vier seitlichen Helmholtzspulen der quaderförmigen Anordnung des früheren Systems ersetzen. Statt der beiden restlichen, stirnseitigen Helmholtzspulen mit quadratischer Gestalt werden nunmehr an den Stirnseiten kreisförmige Einzelspulen vorgesehen. Ein entsprechend ausgeführtes Magnetspulensystem ist in den Figuren allgemein mit 2 bezeichnet. In den Figuren nicht näher dargestellte
20 Teile entsprechen denen des Magnetspulensystem aus der genannten DE-Patentanmeldung.
25
30

Unter Zugrundelegung eines konkreten Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen Magnetspulensystems 2 mit in den Figuren dargestellter Gestalt lässt sich erreichen, dass gegenüber der Ausführungsform eines Magnetsystems gemäß der genannten DE-Patentanmeldung mit quaderförmiger Anordnung sei-

ner rechteckigen Feldkomponentenspulen mit der erfindungsgemäßen Ausbildung der Feldkomponentenspulen bei gleichem Kupferanteil der Leiter eine etwa 20%ige Reduktion des elektrischen Leistungsbedarfs gegeben ist.

5

Das erfindungsgemäß ausgeführte Magnetspulensystem 2 hat insbesondere eine wenigstens annähernd hohlzylinderförmige Gestalt. Seine Einzelspulen liegen dabei zumindest größtenteils auf wenigstens zwei sich konzentrisch umschließenden Zylindermantelflächen, von denen eine erste mit MF1 bezeichnet ist und eine zweite Fläche MF2 umgibt (vgl. insbesondere Figur 2). Der Hohlzylindergestalt sei ein rechtwinkliges x, y, z -Koordinatensystem zugeordnet, dessen z -Richtung durch die mit Z_a bezeichnete Zylinderachse festgelegt ist. Orthogonal zur z -Richtung liegende, eine Spulenanordnung in z -Richtung begrenzende Flächen seien dabei als stirnseitige Flächen bezeichnet. Die innere, zweite Mantelfläche MF2 umschließt einen mit A bezeichneten, drei-dimensional ausgeprägten Innen- oder Arbeitsraum, der in Richtung der Zylinderachse Z_a von zumindest einer der Stirnseiten her zugänglich ist. Im Allgemeinen handelt es sich bei den erwähnten Mantelflächen um gedachte Flächen. Selbstverständlich sind aber die sich auf ihnen erstreckenden Einzelspulen des Magnetspulensystems 2 von konkreten, in den Figuren nicht dargestellten Fixierungsmitteln gehalten.

Das Magnetspulensystem 2 umfasst erfindungsgemäß vierzehn normaleitende oder supraleitende Einzelspulen, die vorzugsweise als Ring- bzw. Sattelspulen ausgebildet sind. Dabei sind in der Figur die Wickelformen nur schematisch dargestellt; es können auch Einzelspulen mit davon leicht abweichenden Spulenformen gewählt werden. Das Spulensystem des gewählten Ausführungsbeispiels setzt sich dabei aus sechs Feldkomponentenspulen 3a, 3b, 4a, 4b und 4c, 4d sowie acht Feldgradientenspulen 6a bis 6d und 7a bis 7d zusammen. Mit den paarweise gegenüberliegenden Feldkomponentenspulen 3a, 3b bzw. 4a, 4b bzw. 4c, 4d sind die Feldkomponenten B_x , B_y , B_z

sowie mindestens zwei der drei diagonalen Magnetfeldgradienten dB_x/dx , dB_y/dy und dB_z/dz aus der nachstehend wiedergegebenen Gradientenmatrix GM zu erzeugen. Diese Gradientenmatrix hat folgendes Aussehen:

5

$$GM = \begin{pmatrix} \frac{dB_x}{dx} & \frac{dB_y}{dx} & \frac{dB_z}{dx} \\ \frac{dB_x}{dy} & \frac{dB_y}{dy} & \frac{dB_z}{dy} \\ \frac{dB_x}{dz} & \frac{dB_y}{dz} & \frac{dB_z}{dz} \end{pmatrix}$$

10

Dabei sei eine die Elemente dB_x/dx , dB_y/dy und dB_z/dz verbindende Linie als eine Diagonale D der Gradientenmatrix GM angesehen. Die Gradientenmatrix GM ist symmetrisch bezüglich dieser Diagonalen D bzw. der auf ihr liegenden, vorerwähnten Magnetfeldgradienten aufgebaut. Dabei ist die Summe der Diagonalelemente gleich null, d.h., die Gradientenmatrix GM ist spurfrei. Die die einzelnen Feldkomponenten erzeugenden Spulenpaare mit in ihnen zu wählenden Stromführungsrichtungen sind in der genannten DE-Patentanmeldung angegeben. Vorzugsweise sind Paare der Feldkomponentenspulen untereinander orthogonal angeordnet. Im Allgemeinen haben sie zumindest paarweise gleiche Form.

25 Mit den acht sattelförmig gestalteten Feldgradientenspulen 6a bis 6d sowie 7a bis 7d sind jeweils zwei Spulenordnungen 6 und 7 ausgebildet, die in z-Richtung gesehen hintereinander angeordnet sind. Die sattelförmigen Feldgradientenspulen umschließen feldmäßig den Arbeitsraum A, wobei sie auf der mindestens einen gedachten, zweiten Mantelfläche MF2 gemeinsam
30 angeordnet sind. In Umfangsrichtung gesehen sind die zu einer Spulenordnung gehörenden Gradientenspulen gegenseitig be-

abstandet oder aneinander liegend; d.h. zwischen ihren stirnseitigen Bogenteilen und somit zwischen ihren in z-Richtung verlaufenden Längsseiten kann jeweils ein wenn auch nur geringfügiger Zwischenraum vorhanden sein. Es ist auch eine Überlappung benachbarter Gradientenspulen an ihren Längsseiten möglich. Die gedachte zweite Mantelfläche MF2 hat vorzugsweise einen kreisförmigen Querschnitt. Sie kann gegebenenfalls aber auch eine andere, z.B. quadratische Querschnittsform haben. Es sind statt einer einzigen Mantelfläche MF2 auch konzentrischen Mantelflächen möglich, auf denen sich die Einzelspulen aus einer oder aus beiden Spulenanordnungen befinden. Die mindestens eine Mantelfläche MF2 braucht auch nicht unbedingt innerhalb des von den Feldkomponentenspulen 3a, 3b, 4a, 4b, 4c, 4d umschlossenen Raums zu liegen, sondern kann gegebenenfalls die Struktur aus diesen Spulen auch umschließen. Im Allgemeinen haben zumindest die zu einer Spulenanordnung 6 und/oder 7 gehörenden Feldgradientenspulen gleiche Form.

Insbesondere aus Figur 2 ist ersichtlich, dass die beiden Mantelflächen MF1 und MF2 so weit radial beabstandet sind, dass zwischen der umhüllenden hohlzylindrischen Außenfläche um die inneren Einzelspulen 6a bis 6d und der äußeren Mantelfläche MF1 für die Einzelspulen 4a bis 4d ein gewisser radialer Abstand vorhanden ist. Ein solcher Abstand ist nicht unbedingt erforderlich. Vielmehr kann die äußere Mantelfläche MF1 auch die umhüllende Außenfläche der inneren Einzelspulen bilden.

Wie aus Figur 1 deutlich hervorgeht, wird im Hinblick auf eine Verringerung des Leistungsbedarfs des Magnetspulensystems 2 bzw. seiner vierzehn Einzelspulen vorteilhaft eine Ausführungsform gewählt, bei der die äußeren vier Sattelspulen 4a bis 4d eine deutlich kürzere, vorzugsweise um mindestens 10 %, insbesondere um 25 % kürzere axiale Ausdehnung bzw. Länge L1 haben als der von den Ringspulen 3a, 3b sowie den acht inneren Sattelspulen 6a bis 6d und 7a bis 7d gebil-

dete Kreiszyylinder mit einer axialen Länge L_2 . Dabei wird also vorteilhaft für die stirnseitigen Ringspulen 3a und 3b ein solcher Innenradius gewählt, dass sie mit den Feldgradientenspulen 6a bis 6d und 7a bis 7d gemeinsam auf der Mantelfläche MF2 liegen. Außerdem ist es von Vorteil, wenn die Anordnung der äußeren sattelförmigen Feldkomponentenspulen 4a bis 4d bezüglich der von ihnen umgebenen Feldgradientenspulen 6a bis 6d und 7a bis 7d so gewählt wird, dass sie in Umfangsrichtung gesehen um zumindest annähernd um 45° versetzt/gedreht sind, d.h. ihre jeweiligen Längsseiten nicht übereinander zu liegen kommen. Insbesondere aus dem Querschnitt der Figur 2 ist diese Anordnung ersichtlich. Der Schnitt der Figur ist dabei in den Bereich der Stirnseiten der Feldgradientenspulen 6a bis 6d gelegt.

15

Mit den Feldgradientenspulen 6a bis 6d und 7a bis 7d sind beispielsweise Magnetfeldgradienten dB_x/dy , dB_z/dx und dB_z/dy bei Wahl geeigneter Stromführungsrichtungen auszubilden. Diese drei Feldgradienten stellen jeweils ein außerdiagonales Element der vorstehenden Gradientenmatrix GM dar. Dabei stammen diese Elemente jeweils aus einem anderen, bzgl. der Diagonalen D symmetrischen Elementenpaar. Bei der Ausbildung entsprechender Feldgradienten werden nämlich zwangsläufig die bzgl. der Diagonalen D symmetrischen Feldgradienten paarweise erzeugt. Das wären in diesem Falle die Gradienten dB_y/dx bzw. dB_x/dz bzw. dB_y/dz . Da nur fünf Gradientenfreiheitsgrade zu berücksichtigen sind, bedarf es außerdem keines besonderen Strommusters für den dB_z/dz -Feldgradienten. Alternativ kann aber der dB_z/dz -Feldgradient erzeugt werden und dafür einer der Gradienten dB_x/dx oder dB_y/dy weggelassen werden. D.h., es müssen nur zwei der drei auf der Diagonalen D der Gradientenmatrix liegenden Gradienten erzeugt werden.

Dabei ist mit dem Paar aus den Einzelspulen 3a, 3b je nach Stromflussrichtung die Magnetfeldkomponente B_z bzw. der Feldgradient dB_z/dz zu erzeugen. In entsprechender Weise ist mit dem Paar aus den Einzelspulen 4c, 4d die Feldkomponente B_y

bzw. der Feldgradient dB_y/dy auszubilden. Das Spulenpaar aus den Einzelspulen 4a und 4b erzeugt die Feldkomponente B_x . Mit den beiden Spulenordnungen 6 und 7 aus den jeweils vier Gradientenspulen 6a bis 6d bzw. 7a bis 7d sind je nach Strom-
5 fñhungsrichtung in den Einzelspulen die Feldgradienten dB_z/dx bzw. dB_z/dy bzw. dB_x/dy zu erzeugen.

Wird nun ein lang gestreckter Magnetkñrper, beispielsweise ein Ferro- oder Permanentmagnet, der z.B. mit einer Sonde
10 verbunden ist, in den Arbeitsraum A des Magnetspulensystems 2 eingebracht, so versucht er sich parallel zur Feldrichtung auszurichten, wobei er somit auch die Ausrichtung der Sonde vorgibt. Die Feldgradienten üben dabei auf den Magnetkñrper eine Kraft $F = \text{grad}(m \cdot B)$ aus, wobei m der Vektor des magneti-
15 schen Moments des Magnetkñrpers ist. Durch eine gezielte Ansteuerung jeder der vierzehn Einzelspulen ist es dann möglich, dass der Magnetkñrper beliebig im Arbeitsraum A ausgerichtet werden kann und auf ihn auch eine vorgegebene Kraft F in alle Richtungen auszuüben ist, also dass er nicht nur ge-
20 dreht, sondern auch linear bewegt bzw. verschoben werden kann.

Jedes Strommuster erzeugt in dem erfindungsgemäßen Magnetspulensystem neben der jeweils gewünschten auch andere Feldkom-
25 ponenten. Diese hängen von den jeweiligen Spulenabmessungen und vom Standort des Magnetkñrpers ab; ihre Amplitude nimmt vom Zentrum aus in Richtung auf die Wicklungen der Spulen zu. D.h., ein einfacher Zusammenhang zwischen der Stromstärke der Strommuster mit der Feldrichtung und Kraftrichtung
30 $F = \text{grad}(m \cdot B)$ an einem Ort des Magnetkñrpers ist so nicht gegeben.

Durch ein geeignetes Überlagern der acht Strommuster in den vierzehn Einzelspulen sind jedoch an einem Magnetkñrperort
35 (Sondenort) gerade jene Felder und Feldgradienten einzustellen, welche die gewünschte Ausrichtung und Kraftwirkung auf den Magnetkñrper erzeugen. Besonders vorteilhaft kann z.B.

ein freies Schweben des Magnetkörpers in dem Raum realisiert werden, wenn gerade die Gewichtskraft $F = m \cdot g = \text{grad}(m \cdot B)$ erzeugt wird ($M = \text{Masse}$, $g = \text{Erdbeschleunigung}$). Die diesbezügliche Berechnung erfolgt vorteilhaft mit einem Computer, der insbesondere die folgenden Rechenschritte durchführt und gegebenenfalls während einer Bewegung des Magnetkörpers laufend wiederholt:

- 5 - Berechnung der Sollwerte der drei Feldkomponenten B_x , B_y , B_z am Magnetkörperort aus einer vorgegebenen Magnetkörper-
10 richtung in Polarkoordinaten θ und φ im Arbeitsraum und dem Betrag $|B|$;
- Berechnung der Sollwerte der fünf unabhängigen Feldgradienten dB_x/dx , dB_y/dy , dB_x/dy , dB_z/dx und dB_z/dy aus einer vorgegebenen Magnetkraft auf den Magnetkörper; es kann
15 auch der Gradient dB_z/dz vorgegeben werden und dafür einer der anderen auf der Diagonalen der Gradientenmatrix liegenden Gradienten dB_x/dx oder dB_y/dy zu Null gemacht werden. Denkbar sind auch Überlagerungen des Gradienten
20 dB_z/dz mit einen der anderen diagonalen Gradienten dB_x/dx oder dB_y/dy ;
- Berechnung von Feldkomponenten und Feldgradienten am Magnetkörperort für jedes der acht Strommuster aus der Spulengeometrie, z.B. für 1 A Spulenstrom und Darstellung in Form einer 8x8-Matrix;
- 25 - Berechnung einer inversen Matrix. Diese inverse Matrix hängt nur von der Spulengeometrie ab und kann für jeden Punkt auf einem Raster im vorgesehenen Arbeitsraum im Voraus erstellt werden. Während des Betriebs der Vorrichtung wird zur schnelleren Berechnung zwischen den Werten in
30 diesem Raster interpoliert;
- Multiplikation der inversen Matrix für den Magnetkörperort mit dem Feldvektor $(B_x, B_y, B_z, dB_x/dx, dB_y/dy, dB_x/dy, dB_z/dx, dB_z/dy)$ ergibt die Stromwerte für die acht Strommuster;
- 35 - Aufteilung der Strommuster auf die vierzehn Einzelspulenströme nach jeweiliger positiver oder negativer Stromrich-

tung aus gespeicherter Tabelle und lineare Überlagerung der Ströme in den Einzelspulen;

- Ansteuerung der vierzehn Netzteile für die Einzelspulen;
- Überwachung der Verlustleistungsgrenzen in den Einzelspulen.

5

Eine entsprechende Vorrichtung zur Ansteuerung der vierzehn Einzelspulen wirkt vorteilhaft mit einer bildgebenden Einrichtung zur Kontrolle der Magnetkörper- bzw. Sondenposition zusammen. Hierzu kommt ein Computer zum Einsatz, mit dem die erforderlichen vierzehn Netzteile für die vierzehn Einzelspulen das Magnetspulensystem 2 zu erregen sind. Mit Hilfe der vierzehn Einzelspulen sind so auf einen Magnetkörper bzw. eine entsprechende Sonde neben frei vorgebbarer Feldrichtung auch uneingeschränkt Magnetkräfte in allen drei Raumrichtungen auszuüben. Selbstverständlich können noch weitere Gerätschaften zugeordnet sein. So kann z. B. ein Röntgengerät mit einer Röntgenröhre vorgesehen werden, deren Strahlung den freien Raum zwischen den Wicklungen der Einzelspulen durchstrahlt. Auf einem Bildschirm außerhalb des Magnetspulensystems kann dann die Lage bzw. Bewegung des Magnetkörpers beobachtet werden.

10

15

20

Zu einer konkreten Ausgestaltung des Magnetspulensystems gemäß den Darstellungen der Figuren lassen sich folgende Maßnahmen vorsehen:

25

- Die Einzelspulen können aus Aluminium- oder Kupferband gewickelt sein und gegebenenfalls flüssigkeitsgekühlt werden. Kupferleiter mit rechteckigem Querschnitt sind im Hinblick auf eine hohe elektrische Leitfähigkeit und einen hohen Leiterfüllgrad besonders vorteilhaft.
- Die Einzelspulen können auch aus Metallhohlprofilen gefertigt sein, durch deren Innenraum gegebenenfalls ein Kühlmedium geleitet wird.
- Insbesondere können die Einzelspulen aus supraleitenden Leitern, vorzugsweise mit Hoch- T_c -Supraleitermaterial, erstellt sein und entsprechend gekühlt werden.

30

35

- Selbstverständlich sind auch weitere Einzelspulen einsetzbar, z.B. zur Homogenisierung des Magnetfeldes.
- Dem Magnetspulensystem kann außerdem magnetisches Material zugeordnet sein. Z.B. kann es zumindest teilweise von Teilen aus solchem Material umschlossen sein. So kann man magnetische Rückschlusskörper aus weichmagnetischem Material wie Eisen vorsehen, die die Gradientenspulen des Systems 2 von den Außenseiten her umschließen. Mit solchen weichmagnetischen Teilen ist insbesondere eine Feldverstärkung im Arbeitsraum A und/oder eine Streufeldabschirmung nach außen zu erreichen.
- Gegebenenfalls sind für die Einzelspulen eines Spulenpaares zur Erzeugung der Magnetfeldkomponenten oder einer Spulenanordnung zur Erzeugung der Feldgradienten unterschiedliche Leiterquerschnitte wählbar. Dementsprechend können die Leiterquerschnitte der inneren acht Sattelspulen 6a bis 6d und 7a bis 7d auf der Mantelfläche MF2, der äußeren Sattelspulen 4a bis 4d und der beiden stirnseitigen Ringspulen 3a und 3b in Größe und Aspektverhältnis (Verhältnis von Breite [in Umfangsrichtung] zu Höhe [in radialer Richtung]), verschieden sein. Dabei ist es besonders vorteilhaft, die acht inneren Sattelspulen 6a bis 6d und 7a bis 7d und die beiden Ringspulen 3a und 3b im Querschnitt ihrer Wicklung höher als breit zu machen, wohingegen für die vier äußeren Sattelspulen 4a bis 4d ein Querschnitt mit größerer Breite als Höhe vorgesehen wird. Der Wicklungsquerschnitt setzt sich dabei aus der Summe der Querschnitte der ihn bildenden Leiter(windungen) bzw. eines Wicklungsstrangs einer Spule zusammen. In Figur 2 sind entsprechende Querschnittsverhältnisse angedeutet. Beispielsweise beträgt das Aspektverhältnis bei einer äußeren Sattelspule (z.B. 4d) $\approx 1,4$ und einer inneren Sattelspule (z.B. 6d) $\approx 0,8$.

35 Bei dem anhand der vorstehenden Figuren dargestellten Ausführungsbeispiele des erfindungsgemäßen Magnetspulensystems 2 wurde davon ausgegangen, dass mit den paarweise gegenüberlie-

genden Feldkomponentenspulen neben den Feldkomponenten B_x , B_y und B_z auch zwei der drei diagonalen Feldgradienten gemäß der vorstehenden Gradientenmatrix GM zu erzeugen sind. Es ist jedoch auch möglich, mit Feldkomponentenspulen auch außerdiagonale Feldgradienten hervorzurufen. Hierzu ist es erforderlich, dass mindestens eine, insbesondere zwei der drei Feldkomponentenspulen durch Spulenpaare aus Einzelspulen gebildet werden.

10 Bei einem erfindungsgemäßen Magnetpulensystem 2 brauchen auch nicht alle drei diagonalen Gradientenelemente erzeugt zu werden. Da nämlich nur zwei dieser Elemente erforderlich sind, kann auf eines der entsprechenden Strommuster des dritten Elements verzichtet werden. Dabei ist es unerheblich, 15 welches Strommuster für welches Element weggelassen wird. Daneben ist es auch möglich, nur einen Gradienten zu erzeugen. Der zweite Gradient lässt sich dann durch eine Linearkombination aus den beiden anderen Gradienten ausbilden, wobei das Verhältnis der Spulenströme fest und vom Stromwert 20 unabhängig ist. D.h., durch entsprechende Linearkombinationen der Spulenströme aus verschiedenen Einzelspulen lassen sich immer auch Gradienten erzeugen. Dies gilt selbstverständlich für die Ausführungsform des Magnetpulensystems 2 nach der Figur.

25

Patentansprüche

1. Spulensystem (2) zu einer berührungsfreien magnetischen Navigation eines magnetischen Körpers in einem drei-dimensionalen, in z-Richtung eines zugeordneten rechtwinkligen x,y,z-Koordinatensystems zugänglichen Arbeitsraum (A), welches Spulensystem vierzehn einzeln ansteuerbare Einzelspulen (3a, 3b; 4a bis 4d; 6a bis 6d; 7a bis 7d) aufweist, die zur Erzeugung von drei Magnetfeldkomponenten B_x , B_y und B_z sowie von fünf Magnetfeldgradienten aus der bezüglich ihrer Diagonalen (D) symmetrischen und spurfreien Gradientenmatrix

$$GM = \begin{pmatrix} \frac{dB_x}{dx} & \frac{dB_y}{dx} & \frac{dB_z}{dx} \\ \frac{dB_x}{dy} & \frac{dB_y}{dy} & \frac{dB_z}{dy} \\ \frac{dB_x}{dz} & \frac{dB_y}{dz} & \frac{dB_z}{dz} \end{pmatrix}$$

ausgebildet sind,

- wobei mit den Einzelspulen zwei der drei Diagonalelemente der Gradientenmatrix GM und je eines der Außerdiagonalelemente aus den drei zur Diagonalen (D) symmetrischen Gradientenelementpaaren der Gradientenmatrix GM zu erzeugen sind
- und wobei mindestens sechs der Einzelspulen (3a, 3b, 4a bis 4d) vorgesehen sind, von denen mindestens zwei (3a, 3b) auf stirnseitigen Flächen des Spulensystems (2) und die restlichen Einzelspulen (4a bis 4d; 6a bis 6d; 7a bis 7d) des Spulensystems (2) auf wenigstens einer ersten, rohrförmigen, sich in z-Richtung erstreckenden, den Arbeitsraum (A) umschließenden Mantelfläche (MF1) liegen.

2. Spulensystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens vier der Einzelspulen (6a bis 6d; 7a bis 7d) auf wenigstens einer weiteren, rohrförmigen, den Arbeitsraum (A)

umschließenden Mantelfläche (MF2) in Umfangsrichtung gesehen verteilt liegen.

3. Spulensystem nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass
5 - sechs der Einzelspulen (3a, 3b; 4a bis 4d) paarweise auf den gegenüber liegenden stirnseitigen Flächen bzw. der mindestens einen ersten Mantelfläche (MF1) liegen

und

10 - acht der Einzelspulen (6a bis 6d; 7a bis 7d) zwei Spulen- anordnungen (6, 7) bilden, die in z-Richtung gesehen hintereinander auf der wenigstens einen weiteren Mantelfläche (MF2) liegen und deren jeweils vier Einzelspulen (6a bis 6d oder 7a bis 7d) auf der weiteren Mantelfläche (MF2) in Umfangsrichtung gesehen verteilt angeordnet sind.

15

4. Spulensystem nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass sich die wenigstens eine weitere Mantelfläche (MF2) innerhalb der wenigstens einen ersten Mantelfläche (MF1) befindet.

20

5. Spulensystem nach einem der Ansprüche 2 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass zwischen den auf der ersten Mantelfläche (MF1) liegenden Einzelspulen und den auf der weiteren Mantelfläche (MF2) liegenden Einzelspulen ein radialer Abstand eingehalten ist.

25

6. Spulensystem nach einem der Ansprüche 2 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die auf der wenigstens einen ersten Mantelfläche (MF1) liegenden Feldkomponentenspulen (4a bis 4d)
30 und/oder die auf der wenigstens einen weiteren Mantelfläche (MF2) liegenden Feldgradientenspulen (6a bis 6d; 7a bis 7d) sattelförmig gestaltet sind.

7. Spulensystem nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass
35 die sattelförmigen Feldkomponentenspulen (4a bis 4d) in Umfangsrichtung gesehen um wenigstens annähernd 45° gedreht ge-

genüber den sattelförmigen Feldgradientenspulen (6a bis 6d; 7a bis 7d) angeordnet sind.

8. Spulensystem nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, dass die stirnseitigen Bogenteile von in Umfangsrichtung gesehen benachbarten sattelförmigen Spulen nebeneinander liegen oder sich überlappen.

9. Spulensystem nach einem der Ansprüche 6 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Länge (L1) der Spulenanordnung aus den sattelförmigen Feldkomponentenspulen (4a bis 4d) in z-Richtung kleiner ist als die entsprechende Länge (L2) der Spulenanordnung aus den Ringspulen (3a, 3b) und den Feldgradientenspulen (6a bis 6d; 7a bis 7d).

15

10. Spulensystem nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die stirnseitigen Feldkomponentenspulen (3a, 3b) als ebene Ringspulen gestaltet sind.

20 11. Spulensystem nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Ringspulen (3a, 3b) auf der weiteren Mantelfläche (MF2) der Feldgradientenspulen (6a bis 6d; 7a bis 7d) liegen.

25 12. Spulensystem nach einem der vorangehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch Spulenpaare und/oder Spulenanordnungen jeweils aus Einzelspulen mit gleicher Form.

30 13. Spulensystem nach einem der Ansprüche 1 bis 11, gekennzeichnet durch Spulenpaare und/oder Spulenanordnungen jeweils aus Einzelspulen, von denen zumindest einzelne unterschiedliche Spulenquerschnitte aufweisen.

35 14. Spulensystem nach einem der vorangehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch orthogonal zueinander angeordnete Spulenpaare aus Einzelspulen (3a, 3b; 4a, 4b; 4c, 4d) zur Erzeugung der Magnetfeldkomponenten.

15. Spulensystem nach einem der vorangehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch Einzelspulen (3a, 3b; 4a, 4b; 4c, 4d) mit unterschiedlichem Wicklungsquerschnitt und/oder Querschnitt ihrer Leiter.

5

16. Spulensystem nach einem der vorangehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine Kühlung zumindest einzelner der Einzelspulen.

10 17. Spulensystem nach einem der vorangehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch Teile aus weichmagnetischem Material an seiner Außenseite des Arbeitsraums (A) zur Feldverstärkung und/oder Feldabschirmung.

15 18. Spulensystem nach einem der vorangehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch Mittel zur Detektion der Position des magnetischen Körpers innerhalb des Arbeitsraums (A).

20 19. Spulensystem nach einem der vorangehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine Ansteuerung seiner Einzelspulen mit Hilfe eines Computers.

FIG 1

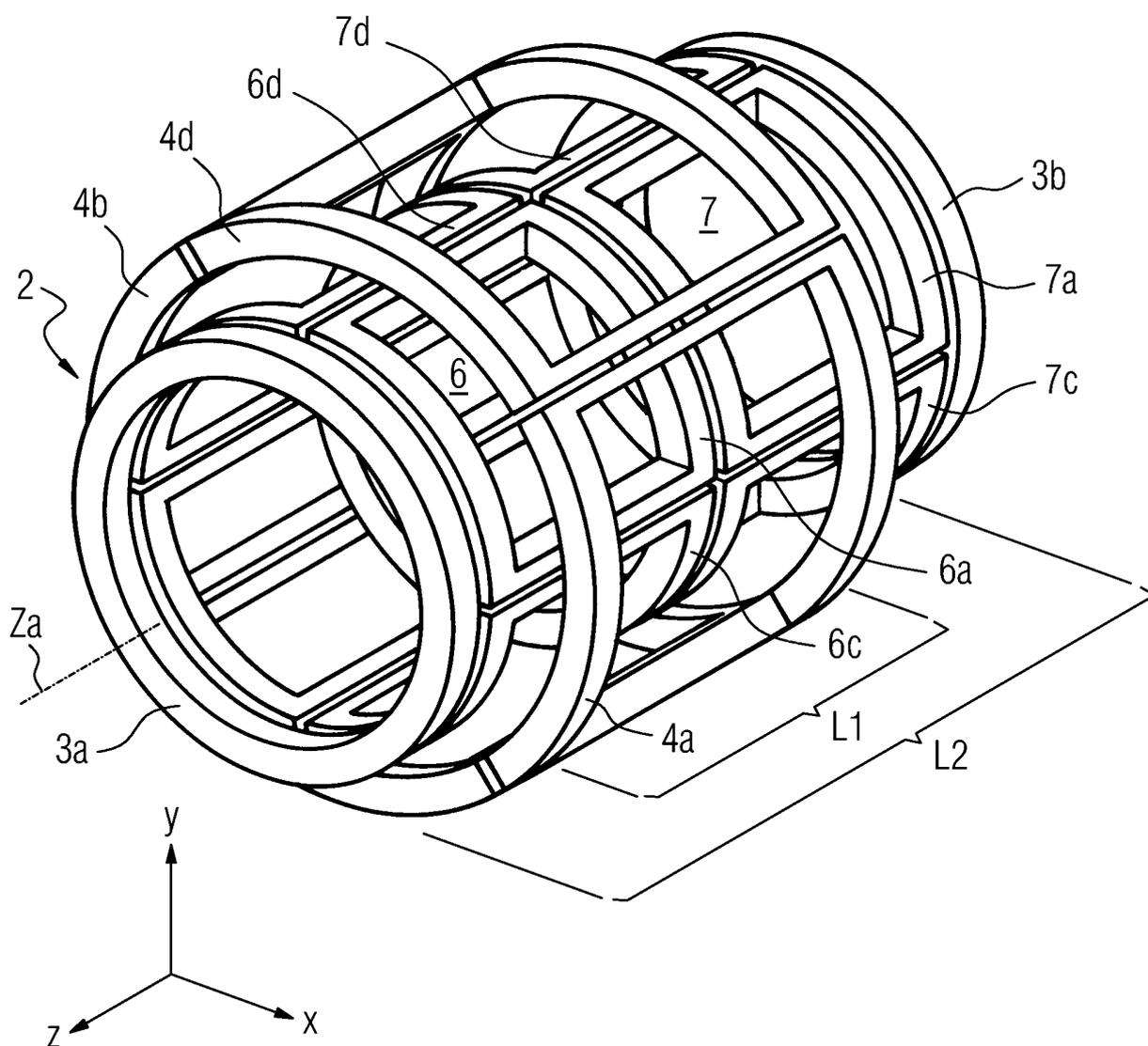
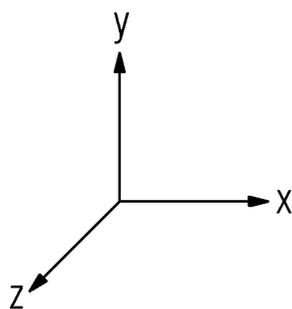
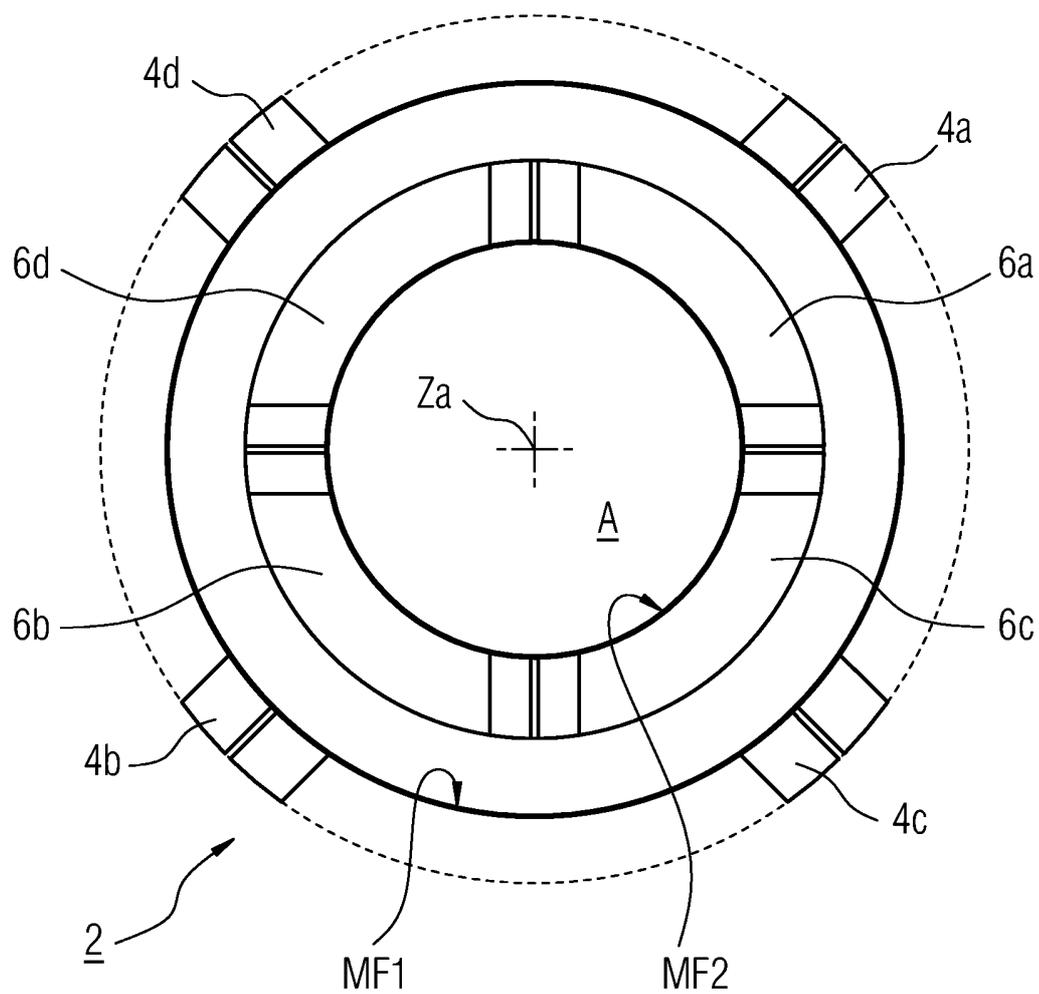


FIG 2



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2006/060375

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. A61B19/00

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)
A61B A61M

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 practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2003/125752 A1 (WERP PETER R ET AL) 3 July 2003 (2003-07-03) paragraph [0040]; figure 2	1
A	US 5 707 335 A (HOWARD ET AL) 13 January 1998 (1998-01-13) column 5, line 21 ~ line 26; figures 5a-d	1

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 document 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

4 July 2006

Date of mailing of the international search report

11/07/2006

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Mayer-Martenson, E

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No
PCT/EP2006/060375

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2003125752	A1	NONE	
US 5707335	A	NONE	

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2006/060375

A. KLASIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. A61B19/00

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
A61B A61M

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, PAJ

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	US 2003/125752 A1 (WERP PETER R ET AL) 3. Juli 2003 (2003-07-03) Absatz [0040]; Abbildung 2 -----	1
A	US 5 707 335 A (HOWARD ET AL) 13. Januar 1998 (1998-01-13) Spalte 5, Zeile 21 - Zeile 26; Abbildungen 5a-d -----	1

Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen Siehe Anhang Patentfamilie

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> * Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen : *A* Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist *E* älteres Dokument, 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 | <ul style="list-style-type: none"> *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 anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist *G* Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist |
|---|--|

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
4. Juli 2006	11/07/2006
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl, Fax: (+31-70) 340-3016	Bevollmächtigter Bediensteter Mayer-Martenson, E

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2006/060375

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 2003125752 A1	03-07-2003	KEINE	
US 5707335 A	13-01-1998	KEINE	