

(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
15. Dezember 2016 (15.12.2016)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2016/198042 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

G01R 33/09 (2006.01) G01R 33/00 (2006.01)
H01L 41/00 (2013.01) G01R 33/06 (2006.01)
H01L 41/047 (2006.01) G01R 33/18 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2016/100250

(22) Internationales Anmeldedatum:
31. Mai 2016 (31.05.2016)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
15170985.4 8. Juni 2015 (08.06.2015) EP

(71) Anmelder: CHRISTIAN-ALBRECHTS-UNIVERSITÄT ZU KIEL [DE/DE]; Christian-Albrechts-Platz 4, 24118 Kiel (DE).

(72) Erfinder: HAYES, Patrick; Kättersredder 114, 24232 Schönkirchen (DE). PIORRA, André; Gutenbergstraße 48, 24118 Kiel (DE). KNÖCHEL, Reinhard; Wacholderweg 23, 25336 Elmshorn (DE). QUANDT, Eckhard; Steenkamp 9, 24226 Heikendorf (DE).

(74) Anwalt: HANSEN UND HEESCHEN; Eisenbahnstraße 5, 21680 Stade (DE).

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

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

Veröffentlicht:

mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

(54) Title: MAGNETOELECTRIC MAGNETIC FIELD MEASUREMENT WITH FREQUENCY CONVERSION

(54) Bezeichnung : MAGNETOELEKTRISCHE MAGNETFELDMESSUNG MIT FREQUENZUMSETZUNG

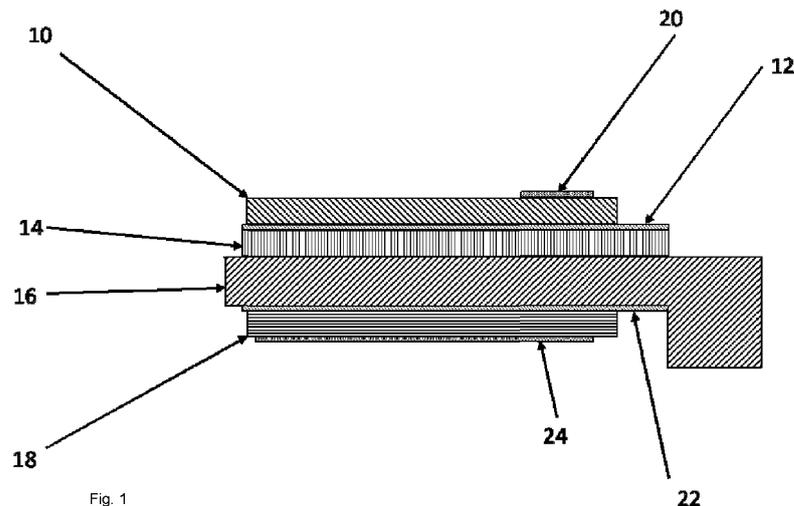


Fig. 1

(57) Abstract: The invention relates to a magnetic field measuring method using a magnetoelectric composite element as an oscillator, in which a time-dependent measurement magnetic field acts on the magnetostrictive phase of the composite element, an electrical measurement voltage is tapped off across the piezoelectric phase of the composite element and is used to infer the measurement magnetic field, characterized by the steps of providing at least one dielectric phase which is connected to the magnetostrictive phase of the composite element by a material bond, wherein, when an electrical voltage is applied, the dielectric phase exhibits a change in length, the magnitude of which depends in a non-linear manner on the magnitude of the voltage, and applying a temporally periodic electrical modulation voltage to the dielectric phase.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



WO 2016/198042 A1



Die Erfindung betrifft ein Magnetfeldmessverfahren mit einem magnetoelektrischen Kompositelement als Oszillator, bei dem ein zeitabhängiges Messmagnetfeld auf die magnetostruktive Phase des Kompositelements wirkt, eine elektrische Messspannung über der piezoelektrischen Phase des Kompositelements abgegriffen wird und hieraus auf das Messmagnetfeld geschlossen wird, gekennzeichnet durch die Schritte Vorsehen wenigstens einer dielektrischen Phase in stoffschlüssiger Verbindung mit der magnetostruktiven Phase des Kompositelements, wobei die dielektrische Phase bei Anlegen einer elektrischen Spannung eine Längenänderung zeigt, deren Betrag nicht-linear vom Betrag der Spannung abhängt, und Anlegen einer zeitlich periodischen elektrischen Modulationsspannung an die dielektrische Phase.

B E S C H R E I B U N G

Magnetoelektrische Magnetfeldmessung mit Frequenzumsetzung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und Vorrichtungen zur Messung zeitlich veränderlicher Magnetfelder mittels Sensoren aus magnetoelektrischen Kompositmaterialien, auch kurz ME-Sensoren genannt.

Magnetoelektrische Komposite sind polymorphe Materialien, die aus wenigstens zwei Materialphasen in stoffschlüssiger Verbindung, z.B. miteinander verlötet oder verklebt, gebildet sind: eine magnetostriktive Phase und eine piezoelektrische Phase.

Die magnetostriktive Phase ist typisch metallisch, z.B. kommen ferromagnetische Übergangsmetalle Eisen, Nickel, Cobalt (Fe, Ni, Co) und deren Legierungen, Verbindungen der Seltenen Erden Terbium, Dysprosium, Samarium (Tb, Dy, Sm) mit den ferromagnetischen Übergangsmetallen (z.B. $TbFe_2$, $SmFe_2$), ferromagnetische Gläser vorwiegend enthaltend die Elemente Eisen, Kobalt, Bor (B) oder Silizium (Si) in variierenden Anteilen oder Gallium (Ga) enthaltende Materialien FeGa und FeGaB in Frage. Weiterhin kann die magnetostriktive Phase auch aus einem nichtleitenden Material gebildet sein, etwa aus $CoFeO_3$ oder $NiFeO_3$. Unter der Einwirkung eines magnetischen Feldes erfährt sie eine Längen-, Gestalts- oder Volumenänderung.

Die piezoelektrische Phase, z.B. aus Blei-Zirkonat-Titanat (PZT), Polyvinylidenfluorid (PVDF), Aluminiumnitrid (AlN), erfährt infolge der stoffschlüssigen Verbindung mit der magnetostriktiven Phase im ME-Komposit durch ein Magnetfeld ebenfalls eine Längenänderung und erzeugt dabei eine messbare Änderung der elektrischen Polarisierung, die als elektrische Spannungs- oder Ladungsänderung mittels einer unmittelbar auf der piezoelektrischen Phase befindlichen Messelektrodenanordnung detektiert werden kann.

Auf der mechanischen Kraftkopplung der beiden Phasen basiert das ME-Sensorprinzip zur Magnetfeldmessung.

Für die Formgebung der beiden Materialphasen gibt es keine zwingenden Vorgaben. Beispielsweise können Bulkmaterialien beliebiger Gestalt zusammengefügt, insbesondere miteinander verklebt, werden und bilden hiernach ein magnetoelektrisches Kompositelement entsprechend einer Formvorgabe.

Es hat sich als zweckdienlich erwiesen und ist heute gängig, beide Phasen als Schichten aufeinander abzuscheiden und entlang der Schichtebenen in rechteckige Streifenform zuzuschneiden. Die Streifen sind vornehmlich sensitiv für Magnetfeldvektorkomponenten, die parallel zur langen Streifenachse gerichtet sind.

- 5 Die Streifen vollführen in Anwesenheit eines solchen Magnetfeldes je nach Streifenaufbau eine Biege- oder Streckbewegung und können durch ein zeitlich periodisches Magnetfeld zu mechanischen Schwingungen angeregt werden, wenn sie entsprechend schwingfähig gelagert, z.B. einseitig eingespannt, sind. ME-Sensoren sind grundsätzlich als mechanische Oszillatoren ausgebildet und besitzen eine mechanische Eigenfrequenz, die leicht bestimmt werden kann.
- 10 Der Abgriff der Messspannung über die piezoelektrische Phase erfolgt mittels der erwähnten Messelektrodenanordnung gewöhnlich über die Schichtdicke, wobei eine metallische magnetostruktive Phase als Gegenelektrode benutzt werden kann. Aus der Patentschrift EP 2 717 343 B1 ist aber auch bekannt, die Messelektrodenanordnung z.B. als Interdigitalelektroden auszulegen und entlang der Schicht zu messen, was insbesondere bei der Fertigung der ME-
- 15 Sensoren in Dünnschichttechnik Vorteile hat. Dieselbe Patentschrift lehrt auch, dass es keineswegs erforderlich ist, die beiden Materialphasen unmittelbar aufeinander abzuscheiden, um ein sensorfähiges ME-Komposit zu erhalten. Die mechanische Kopplung der Phasen kann auch durch eine hinreichend starre, im Übrigen dielektrische und vergleichsweise sehr dicke Trennschicht hindurch erfolgen.
- 20 ME-Sensoren sind ohne weitere Ansteuerungen nur für magnetische Wechselfelder sensitiv und werden gewöhnlich auch außerhalb ihrer mechanischen Resonanz betrieben. Da man an einer möglichst großen Messdynamik, einem möglichst großen Signal-Rausch-Verhältnis und an der Linearität der Spannungsantwort bezüglich des zu messenden magnetischen Wechselfeldes interessiert ist, wählt man für den ME-Sensor einen Arbeitspunkt im Bereich des
- 25 größten Anstiegs der Magnetostruktionskennlinie. Die erste Ableitung der Magnetostruktionskennlinie wird als piezomagnetischer Koeffizient bezeichnet. Die Magnetostruktionskennlinie beschreibt die Längenausdehnung der magnetostruktiven Phase unter der Wirkung eines Magnetfeldes. Ihr Verlauf ist stets achsensymmetrisch, da beide Feldrichtungen denselben Effekt auf das Material haben. Die Längenausdehnung weist für
- 30 kleine Feldstärken zunächst einen parabolischen Anstieg auf, ist aber für große Feldstärken nach oben beschränkt - bei Erreichen der Sättigungsmagnetisierung. Sie besitzt folglich einen Wendepunkt, in dem der lineare Anstieg dominiert und wo zugleich die größte Steigung vorliegt. Um den ME-Sensor in diesem günstigen Arbeitspunkt zu betreiben, wird vorzugsweise ein

konstantes Bias-Magnetfeld durch das geeignete Anordnen von Stromleitern oder Permanentmagneten angelegt.

Ein solches statisches Bias-Magnetfeld ist jedoch in der Anwendungspraxis nicht unproblematisch. Gerade bei mehreren ME-Sensoren in enger Nachbarschaft zueinander
5 können wechselseitige Einflüsse der magnetischen Bias-Felder auftreten, insbesondere dann, wenn die Felder nach dem Biot-Savart-Gesetz erzeugt werden und die Ströme über Zuleitungen zu führen sind. Permanentmagnetische Bias-Felder sind energetisch günstiger, erfordern aber das Anordnen einer ausreichenden Menge magnetischen Materials, um geeignete Feldstärken zu erzielen.

10 Die Detektionsgrenze eines ME-Sensors besitzt eine typische Frequenzabhängigkeit, die durch das Eigenrauschen wie z.B. das thermische Rauschen oder das frequenzabhängige $1/f$ -Stromrauschen des elektronischen Verstärkers und den frequenzabhängigen magnetoelektrischen Koeffizienten bestimmt ist. Letzterer beschreibt das Verhältnis der im ME-Sensor hervorgerufenen elektrischen Feldstärkeamplitude zur anregenden magnetischen
15 Feldstärkeamplitude. Der magnetoelektrische Koeffizient zeigt eine deutliche Erhöhung im Bereich der mechanischen Eigenfrequenz eines ME-Sensors, was an der Resonanzverstärkung der Schwingungsamplitude liegt.

Insbesondere für niedrige Frequenzen des magnetischen Wechselfeldes, z.B. 1-10 Hz, wie sie für biomagnetische Messungen relevant sind, ergibt sich aus dem Vorgesagten eine deutliche
20 Verschlechterung der Detektionsgrenze. Durch das $1/f$ -Rauschen verliert man ca. 3 Größenordnungen an Empfindlichkeit und durch die fehlende Resonanzverstärkung in diesem Niederfrequenzbereich noch weitere 2-3 Größenordnungen. Dies führt dazu, dass die in der mechanischen Resonanz bei etwa 1 kHz erreichten Detektionsgrenzen von besser als $1 \text{ pT/Hz}^{1/2}$ sich bei 1 Hz auf mindestens $100 \text{ nT/Hz}^{1/2}$ verschlechtern.

25 Die Patentschrift EP 2 635 913 B1 adressiert das Problem der Messung langsam veränderlicher, schwacher Magnetfelder mit ME-Sensoren. Dort wird eine Frequenzumsetzung in die mechanische Resonanz des ME-Sensors vorgeschlagen, die durch Überlagern des zu messenden Magnetfeldes, i. F. Messmagnetfeld, mit einem kontrollierten Modulationsmagnetfeld auf dem Sensor erreicht wird. Die Druckschrift führt dazu aus, dass der
30 Verlauf der Magnetostruktionskennlinie ursächlich dafür ist, dass der Sensor Magnetfeldanteile mit Mischfrequenzen detektiert, insbesondere solche, die Summe und Differenz aus Messmagnetfeld-Frequenz, i. F. kurz Messfeldfrequenz, und Modulationsmagnetfeld-Frequenz, i. F. kurz Modulationsfrequenz, aufweisen. Dadurch wird es möglich, mittels gezielter Auswahl

der Modulationsfrequenz passend zur vorbekannten mechanischen Eigenfrequenz des ME-Sensors auch ein Messmagnetfeld mit sehr niedriger Messfeldfrequenz in der Resonanz des ME-Sensors zu detektieren. Das Signal bei der Messfeldfrequenz wird durch einen physikalischen Mischvorgang zu seinem Nachweis auf die Resonanzfrequenz umgesetzt.

- 5 Weiterhin führt die EP 2 635 913 B1 aus, dass für den Fall, dass ein Spektrum niedriger Messfrequenzen untersucht werden soll, auch ein Variieren der Modulationsfrequenz über ein entsprechend komplementäres Frequenzband durchgeführt werden kann, um eine Mehrzahl von Messfrequenzen sequenziell umzusetzen und zu detektieren.

Die Frequenzumsetzung hat neben der Vermeidung des $1/f$ -Rauschen und der Resonanzverstärkung auch langsam oszillierender Magnetfeldanteile überdies den Vorteil, dass
10 der ME-Sensor nicht unmittelbar mit einem Bias-Gleichfeld ausgestattet werden muss. Insbesondere sind keine Permanentmagneten erforderlich. Allerdings wird es als vorteilhaft herausgestellt, das Modulationsmagnetfeld mit einer Amplitude zu versehen, die gerade dem Betrag des herkömmlichen Bias-Feldes entspricht.

- 15 Aus der Patentschrift US 8,222,898 B1 ist eine Vorrichtung zu entnehmen, die genau dasselbe Konzept der Frequenzumsetzung realisiert, indem eine kontrolliert bestromte Spule um den ME-Sensor herum angeordnet wird zur Erzeugung eines Modulationsmagnetfeldes mit einer Modulationsfrequenz in einem zur Messfrequenz komplementären Intervall.

Die Nachteile der bislang bekannten Frequenzumsetzung bei ME-Sensoren liegen in der
20 Notwendigkeit zur Erzeugung eines möglichst homogenen, zeitlich veränderlichen Modulationsmagnetfeldes mit geeigneten apparativen Mitteln. Solche Mittel vorzusehen ist komplex und kostenträchtig. Es ist schwierig, das Modulationsmagnetfeld bei hohen Modulationsfrequenzen zu erzeugen. Überdies verbraucht die Magnetfelderzeugung nach dem Biot-Savart-Gesetz viel Energie. Nicht zuletzt sind die Modulationsmagnetfeldstärken auch groß
25 gegenüber den Messfeldstärken und können erheblich benachbarte Sensoren stören, wenn etwa mehrere Messfeldkomponenten simultan gemessen werden sollen.

Die Erfindung stellt sich daher die Aufgabe, eine Magnetfeldmessung mit ME-Sensor und Frequenzumsetzung vorzuschlagen, die ohne Modulationsmagnetfeld auskommt und apparativ sehr einfach bleibt.

- 30 Verfahrensgemäß wird die Aufgabe durch den Hauptanspruch gelöst, nämlich durch ein Magnetfeldmessverfahren mit einem magnetoelektrischen Kompositelement als Oszillator, bei dem ein zeitabhängiges Messmagnetfeld auf die magnetostriktive Phase des

Kompositelements wirkt, eine elektrische Messspannung über der piezoelektrischen Phase des Kompositelements abgegriffen wird und hieraus auf das Messmagnetfeld geschlossen wird, gekennzeichnet durch die Schritte (i) Vorsehen wenigstens einer dielektrischen Phase in stoffschlüssiger Verbindung mit der magnetostriktiven Phase des Kompositelements, wobei die
5 dielektrische Phase bei Anlegen einer elektrischen Spannung eine Längenänderung zeigt, deren Betrag nicht-linear vom Betrag der Spannung abhängt, und (ii) Anlegen einer zeitlich periodischen elektrischen Modulationsspannung an die dielektrische Phase.

Die Aufgabe wird anordnungsgemäß in einer ersten Variante gelöst durch eine Magnetfeldmessvorrichtung aufweisend ein magnetoelektrisches Kompositelement mit einer
10 piezoelektrischen Phase mit nicht-linearer Dehnungs-Spannungs-Kennlinie, wobei das Kompositelement als mechanisch schwingfähiger Oszillator ausgebildet ist, und eine Elektrodenanordnung auf der piezoelektrischen Phase sowie eine Einrichtung zum Abgreifen einer elektrischen Messspannung über der piezoelektrischen Phase bei Auslenkung des Oszillators, gekennzeichnet durch eine Einrichtung zum Beaufschlagen der piezoelektrischen
15 Phase mit einer zeitlich periodischen elektrischen Modulationsspannung.

Die Aufgabe wird anordnungsgemäß in einer zweiten Variante gelöst durch eine Magnetfeldmessvorrichtung aufweisend ein magnetoelektrisches Kompositelement, wobei das Kompositelement als mechanisch schwingfähiger Oszillator ausgebildet ist, und eine erste Elektrodenanordnung auf der piezoelektrischen Phase des Kompositelements sowie eine
20 Einrichtung zum Abgreifen einer elektrischen Messspannung über der piezoelektrischen Phase bei Auslenkung des Oszillators, gekennzeichnet durch eine dielektrische Phase mit nicht-linearer Dehnungs-Spannungs-Kennlinie in stoffschlüssiger Verbindung mit dem Kompositelement und eine zweite Elektrodenanordnung auf der dielektrischen Phase sowie eine Einrichtung zum Beaufschlagen der dielektrischen Phase mit einer zeitlich periodischen
25 elektrischen Modulationsspannung.

Die weiteren Unteransprüche geben vorteilhafte Ausgestaltungen an.

In der zweiten Variante der vorgenannten Vorrichtung werden – anders als in der ersten Variante – keine weiteren Anforderungen an die piezoelektrische Phase des Kompositelements gestellt. Stattdessen wird eine zusätzliche dielektrische Phase stoffschlüssig am
30 Kompositelement angeordnet, die eine nicht-lineare Längenänderung bei Anlegen einer elektrischen Spannung zeigt. Diese dielektrische Phase kann zugleich piezoelektrisch sein. Sie kann insbesondere aus einem Ferroelektrikum gebildet sein. Sie kann aber auch aus einem

Relaxormaterial gebildet sein, das ausgeprägte Elektrostriktion zeigt, und womöglich nicht piezoelektrisch ist.

Als Ferroelektrika kommen für die Ausführung der Erfindung beispielsweise Blei-Zirkonat-Titanat (PZT), Bariumtitanat, Kalium-Natrium-Niobat (KNN) oder Natrium-Bismut-Titanat (NBT) in Betracht, um hier nur eine kleine Auswahl zu nennen.

Relaxormaterialien sind mit den Ferroelektrika verwandt. Sie zeigen ähnlich der Ferroelektrika bei höheren Temperaturen einen paraelektrischen Zustand. Wird die Temperatur verringert, zeigen sie keine Umwandlung in den ferroelektrischen Zustand verbunden mit einer Phasenumwandlung, sondern einen breiten, diffusen und stark frequenzabhängigen Übergang, der nicht mit einer strukturellen Umwandlung verbunden ist. Folglich sind sie nach wie vor kubisch und somit zentrosymmetrisch, also nicht piezoelektrisch. Allerdings zeigen sie eine sehr hohe Elektrostriktion. Beispiele für Relaxormaterialien sind Blei-Magnesium-Niobat (PMN) und Blei-Lanthan-Zirkonium-Titanat (PLZT).

Wie bereits in der EP 2 635 913 B1 besteht das Prinzip der Frequenzumsetzung darin, die Messspannung über einer piezoelektrischen Phase, die ihrerseits durch eine von einem Messmagnetfeld verursachte Dehnung einer magnetostriktiven Phase hervorgerufen wird, im Takte einer vorbestimmten periodischen Modulation zeitlich zu verändern. Die Modulation erfolgt dabei immer mit einem Signal großer Amplitude, i. F. Großsignal, das einen nichtlinearen Bereich einer materialspezifischen Dehnungs-Kennlinie durchläuft, bei gleichzeitiger Anwesenheit eines Messsignals kleinerer Amplitude, i. F. Kleinsignal, für dessen zusätzliche Aussteuerung sich die Dehnungs-Kennlinie wegen der Kleinheit der Amplitude näherungsweise linear verhält.

Bei der ME-Sensormessung von z.B. biomagnetischen Signalen ist das Kleinsignal wesentlich niederfrequenter als das Großsignal, d.h. über eine Periode des Großsignals ändert sich das Kleinsignal kaum. Das Kleinsignal „sieht“ zeitlich variable Materialeigenschaften, die durch das Großsignal herbeigeführt werden. Insbesondere wird der piezoelektrische Koeffizient in der zum Abgriff der Messspannung vorgesehenen piezoelektrischen Phase im vorbestimmten Takt moduliert.

Im Falle der EP 2 635 913 B1 erfolgt die Modulation magnetisch, d.h. es wird ein magnetisches Modulationsmagnetfeld bereitgestellt, das über die magnetostriktive Phase – aufweisend eine vorbekannte, achsensymmetrische und schon deshalb nicht-lineare Magnetostriktionskennlinie – auch die piezoelektrische Phase dehnt und dadurch den piezoelektrischen Koeffizienten moduliert. Der zeitliche Verlauf der Dehnung durch das Kleinsignal wird durch das Großsignal

kommutiert (Schwebung) und über die piezoelektrische Phase in eine Spannung umgesetzt, die Frequenzanteile mit der Eigenperiodendauer des oszillierenden ME-Sensors enthält, wenn die Modulationsfrequenz passend zur Messfeldfrequenz eingerichtet ist. Dadurch erfolgt eine Resonanzverstärkung des an sich niederfrequenten Kleinsignals, also des Messmagnetfeldes.

- 5 Bei der hier beschriebenen erfindungsgemäßen Magnetfeldmessung steuert demgegenüber eine eigens zu diesem Zweck angelegte, zeitlich periodische Modulationsspannung als Großsignal die zum Abgreifen der Messspannung vorgesehene piezoelektrische Phase aus. Die Umsetzung der Modulationsspannung in eine Dehnung bzw. Längenänderung der zum Signalabgriff vorgesehenen piezoelektrischen Phase des ME-Sensors erfolgt erfindungsgemäß
- 10 durch die Längenänderung eines mit dem ME-Sensor stoffschlüssig verbundenen Dielektrikums in Abhängigkeit von der zeitlich periodischen Modulationsspannung. Das Dielektrikum bzw. die dielektrische Phase muss dabei eine nicht-lineare Dehnungs-Spannungs-Kennlinie aufweisen, die auch über ausgedehnte Bereiche der Nicht-Linearität von der Modulationsspannung durchlaufen werden muss; anderenfalls findet keine Frequenzumsetzung am ME-Sensor statt.
- 15 Die dielektrische Phase mit nicht-linearer Dehnungs-Spannungs-Kennlinie kann bei geeigneter Materialauswahl mit der piezoelektrischen Phase für den Abgriff der Messspannung identisch sein. Über die magnetostriktive Phase wirkt eine zusätzliche Kleinsignal-Dehnung ein, die an der piezoelektrischen Phase gemäß dem differentiellen piezoelektrischen Koeffizienten in Messspannung gewandelt wird. Da der differentielle piezoelektrische Koeffizient bei positiver
- 20 Modulationsspannung positiv (und umgekehrt) ist, wird die entstehende Messspannung ebenfalls im Takt der Modulationsspannung kommutiert, was letztlich ähnlich wirkt, wie schon bei der magnetischen Modulation.

Die elektrisch getriebene Modulation des ME-Sensors ist wesentlich schneller und energiesparender als die magnetische Modulation.

- 25 In der oben genannten ersten Variante der erfindungsgemäßen Magnetfeldmessvorrichtung wird die Modulationsspannung an die piezoelektrische Phase eines an sich bekannten ME-Sensors angelegt, wobei die piezoelektrische Phase eine nicht-lineare Dehnungs-Spannungs-Kennlinie aufweisen muss. Die piezoelektrische Phase kann beispielsweise aus PZT gebildet sein. Es ist aber nach experimentellen Befunden unzureichend, wenn die piezoelektrische
- 30 Phase etwa aus Aluminiumnitrid (AlN) gebildet ist, denn dieses Material zeigt über große Spannungsbereiche ein ausgeprägt lineares Dehnungsverhalten. Die angestrebte Frequenzumsetzung ist dann nicht zu beobachten. Eine piezoelektrische Phase mit nicht-linearer Dehnungs-Spannungs-Kennlinie erfüllt simultan zwei Aufgaben: (i) sie bewirkt die nicht-lineare Dehnung des magnetoelektrischen Kompositelements als Antwort auf die

Modulationsspannung und (ii) sie dient dem Abgreifen der piezoelektrischen Messspannung, sobald ein zeitabhängiges Magnetfeld auf die magnetostruktive Phase wirkt.

In der zweiten Variante der erfindungsgemäßen Magnetfeldmessvorrichtung wird eine zusätzliche dielektrische Phase mit nicht-linearer Dehnungs-Spannungs-Kennlinie stoffschlüssig am Kompositelement angeordnet und mit der Modulationsspannung beaufschlagt. Diese zusätzliche Materialphase hat nur die Funktion eines Antriebs, der die Modulationsspannung nicht-linear in eine Dehnung überführt und diese an die magnetostruktive Phase über die stoffschlüssige Verbindung der Phasen miteinander weitergibt. Die dielektrische Phase wird bevorzugt aus einem Ferroelektrikum, z.B. aus PZT, oder aus einem Relaxormaterial gebildet. Insbesondere ist jedes dielektrische Material geeignet, das ausgeprägte Elektrostriktion zeigt, da analog zur Magnetostruktion auch die Elektrostriktionskennlinie achsensymmetrisch und damit deutlich nicht-linear verläuft. Beispielsweise zeigt Bleimagnesiumniobat (PMN) solche Elektrostriktion. Die piezoelektrische Phase in der zweiten Variante dient demgegenüber allein zum Abgreifen der Messspannung in Anwesenheit eines zeitabhängigen Magnetfeldes. Sie kann beispielsweise aus PZT, PVDF oder auch aus Aluminiumnitrid gebildet sein.

Die Modulationsspannung soll zeitlich periodisch sein und dabei bevorzugt eine Periodendauer aufweisen, die sich um einen vorbestimmten Differenzbetrag größer als null von der Eigenperiodendauer des mechanischen Oszillators – d.h. des ME-Sensors – unterscheidet. Sie kann dabei einen harmonischen Zeitverlauf aufweisen, sie kann aber auch eine periodische Dreieck- oder Rechteckspannung oder ähnliches sein. Die Modulationsspannung soll vorzugsweise den ME-Sensor zu einer erzwungenen Schwingung abseits seiner Eigenschwingung veranlassen.

In einer bevorzugten Ausgestaltung ist die Modulationsspannung eine Rechteckspannung, die den differentiellen piezoelektrischen Koeffizienten in der zum Messspannungsabgriff vorgesehenen piezoelektrischen Phase zwischen positiven und negativen Werten hin- und herschaltet. Besonders bevorzugt werden dabei positive und negative Maximalwerte realisiert.

Die Erfindung wird im Folgenden noch näher erläutert anhand eines Ausführungsbeispiels und der Erklärung von Messdaten. Dabei zeigen die Figuren:

Fig. 1 die Schnitt-Skizze eines streifenförmigen ME-Sensors gemäß der beschriebenen zweiten Variante der Magnetfeldmessvorrichtung;

Fig. 2 die Messspannungen eines ME-Sensors des Aufbaus nach Fig. 1, der in Dünnschichttechnik realisiert worden ist.

In Fig. 1 ist eine Schnittskizze durch einen ME-Sensor in Streifenform dargestellt, der als Ausführungsbeispiel der zweiten Variante der Magnetfeldmessvorrichtung in Dünnschichttechnik realisierbar ist. Die Skizze ist nicht maßstabsgerecht.

5 Auf einem Siliziumsubstratfilm (16) mit 300 µm Filmdicke wird auf der Oberseite ein magnetostriktives Schichtsystem (14) nach der Lehre der EP 2 538 235 B1 mit FeCoSiB als magnetostriktivem Material gebracht. Dieses Schichtsystem (14) enthält antiferromagnetische Lagen und bildet durch Exchange Bias lagengebundene Magnetfelder aus, die das Schichtsystem (14) insgesamt in einen Arbeitspunkt mit günstigem piezomagnetischem Koeffizienten befördern, ohne dass außerhalb des Schichtsystems (14) nennenswerte magnetische Streufelder auftreten. Die mittels Exchange Bias eingerichtete Bias-Gleichfeldstärke liegt etwa bei 5 Oe.

Auf das Schichtsystem (14) und auf die Unterseite des Substratfilms (16) werden jeweils 100 Nanometer dicke metallische Schichten aus Tantal/Platin aufgebracht, die auch als Unterelektroden (12, 22) dienen.

15 Die piezoelektrische Phase (10) – hier: Schicht der Dicke 2 µm – ist im Beispiel aus Aluminiumnitrid gebildet auf der oberen Unterelektrode (12). Die dielektrische Phase (18) – hier: Schicht der Dicke 2 µm – mit nicht-linearer Dehnungs-Spannungs-Kennlinie ist aus PZT gebildet und auf die untere Unterelektrode (22) aufgebracht.

20 Zwischen der – in der Regel – leitfähigen, magnetostriktiven Phase (14) und der piezoelektrischen Phase (10) ist die Unterelektrode (12) gewöhnlich nicht zwingend erforderlich. Sie dient hier in erster Linie der Texturlöschung zur Erzeugung einer besseren Piezoschicht (10) und wird nebenbei als Unterelektrode (12) benutzt.

Demgegenüber ist es unerlässlich, eine erste Elektrodenanordnung (20) auf der piezoelektrischen Schicht (10) zum Abgreifen der Messspannung vorzusehen. In der zweiten Variante der erfindungsgemäßen Magnetfeldmessvorrichtung wird überdies eine zweite Elektrodenanordnung (24) auf der dielektrischen Schicht (18) mit nicht-linearer Dehnungs-Spannungs-Kennlinie aufgebracht. Diese dient dem Anlegen der erfindungsgemäßen Modulationsspannung, im vorliegenden Beispiel über die dielektrische Schicht (18) mittels der Elektroden (22, 24). Die jeweils außen angeordneten Elektroden (20, 24) sind aus Chrom/Gold gebildet und ca. 100 Nanometer dick.

Gegenüber der zweiten Variante der Magnetfeldmessvorrichtung entfallen bei der ersten Variante alle Materialschichten (18, 22, 24) auf der Unterseite des Substratfilms (16) unter der

Voraussetzung, dass die piezoelektrische Phase (10) aus einem Material mit nicht-linearer Dehnungs-Spannungs-Kennlinie gebildet wird, beispielsweise aus PZT, aber eben gerade nicht aus Aluminiumnitrid.

5 Es liegt im Rahmen der Erfindung, die Auswahl, Dimensionierung und Reihenfolge der Materialschichten insbesondere auch nach der Lehre der EP 2 717 343 B1 vorzunehmen, so dass die Elektroden (22, 24) auch einzeln oder beide als Interdigitalelektroden ausgestaltet sein können, und elektrische Spannungen entlang der Schichten – und nicht über die Schichtdicken – angelegt oder abgegriffen werden können.

10 Auf der rechten Seite der Fig. 1 wird durch einen Block angedeutet, dass der Substratfilm (16) beispielsweise aus einem Siliziumwafer herausgearbeitet sein kann. Der Block symbolisiert ganz allgemein eine einseitige Fixierung des ME-Sensors am rechten Rand, so dass er nach Art eines freitragenden Balkens oszillieren kann. Im Ausführungsbeispiel wird die mechanische Eigenfrequenz des ME-Sensors zu $f_R = 688$ Hz bestimmt. Der Biegebalken ist etwa 20 mm lang – frei stehend – und ca. 2 mm breit.

15 In Fig. 2 ist die Messspannung abgegriffen zwischen den Elektroden (12) und (20) über der Piezoschicht (10) als Funktion der Frequenz dargestellt. Fig. 2 A zeigt dabei das Signal in Abwesenheit elektrischer oder magnetischer Wechselfelder; es erfolgt nur eine akustische Einkopplung (Störung durch Luftschall). Es ist zu beachten, dass die Messspannung auf logarithmischer Skala angegeben wird.

20 Fig. 2 B zeigt die Messspannung, wenn eine periodische Modulationsspannung $U_A(t) = U_0 \cos(2\pi f_{\text{mod}} t)$ mit U_0 als Amplitude und f_{mod} als Modulationsfrequenz an die Elektroden (22) und (24) angelegt wird. Im Beispiel der Fig. 2 B ist $U_0 = 40$ V und $f_{\text{mod}} = 678$ Hz. Nur eine Frequenzkomponente der Messspannung – eben die für f_{mod} – ist dominant, d.h. der ME-Sensor vollführt eine erzwungene Schwingung neben seiner Eigenfrequenz.

25 Die Messspannung in Fig. 2 C weist einen Hauptanteil mit der Frequenz f_{mod} auf und zwei Seitenbandanteile bei den Frequenzen $f_{\text{mod}} - f_{\text{mess}}$ und $f_{\text{mod}} + f_{\text{mess}}$, wenn zusätzlich zur Modulationsspannung – in diesem Fall eine Rechteckspannung mit Periodendauer $1/f_{\text{mod}}$ – über der dielektrischen Phase (18) auch ein Messmagnetfeld mit Frequenz f_{mess} auf die magnetostriktive Phase (14) wirkt. Im Beispiel der Fig. 2 C hat die Messfeldstärke die Amplitude
30 $H_{\text{mess}} = 10$ Oe, die Messfeldfrequenz ist $f_{\text{mess}} = 10$ Hz und die Amplitude der Modulationsspannung beträgt $U_0 = 5$ V. Da das rechte Seitenband (688 Hz) genau die Resonanz des ME-Sensors erregt, wird die Messspannung wie gewollt überhört – hier um mehr als eine Größenordnung gegenüber dem linken Seitenband.

Insbesondere kann bei der vorliegenden Erfindung f_{mod} über ein vorbestimmtes Frequenzintervall variiert werden, um ein Frequenzband von Messmagnetfeldern zu durchlaufen. Für beliebige zeitlich periodische Modulationsspannungen, bevorzugt Rechteckspannungen, ist die Einrichtung zum Beaufschlagen mit Modulationsspannung
5 vorteilhaft dazu ausgebildet, allgemein die Periodendauer der Modulationsspannung zwischen vorbestimmten Intervallgrenzen automatisch zu variieren.

Die Fig. 2 zeigt die Frequenzanteile der Messspannung als unmittelbare Ausgaben eines Spektralanalysators, dem die Spannungswerte fortlaufend zugeführt worden sind. Eine nachgeschaltete Auswerteeinrichtung kann vorteilhaft dazu ausgebildet sein, die
10 Messspannung als Funktion der Periodendauer der Modulationsspannung zu erfassen und aufzuzeichnen und/oder auszugeben. Bevorzugt ermittelt die Auswerteeinrichtung dabei lokale Maxima der Messspannung und schließt aus Betrag und Position wenigstens eines ermittelten Maximums auf Amplitude und Frequenz wenigstens einer zu messenden Magnetfeldkomponente. Im einfachsten Fall erfolgt die Übersetzung von Messspannung in
15 Magnetfeldstärke anhand einer in einem einmaligen Vorversuch erstellten Kalibriertabelle.

Die automatische Suche und Übersetzung von lokalen Spannungsmaxima in Magnetfeldstärken unterstützt auch das schnelle Durchsuchen eines vorbestimmten Periodendauerintervalls bzw. Frequenzbandes nach etwaig vorhandenen Frequenzanteilen des Messmagnetfeldes, wenn dieses mehrere – a priori womöglich unbekannte – Frequenzen aufweist. Dabei kann es
20 vorteilhaft sein, eine Rückkopplung der Auswerteeinheit auf die Einrichtung zur Beaufschlagung mit Modulationsspannung, die ihrerseits das Variieren der Modulationsfrequenz steuert, vorzusehen. Modulationsfrequenzbereiche, die zu ausgeprägten lokalen Spannungsmaxima führen, können so mit angepasster – bevorzugt reduzierter – Geschwindigkeit durchsucht werden, etwa um genauere Peak-Werte zu bestimmen.

25 Die EP 2 635 913 B1 sagt aus, dass die Frequenzumsetzung ohne ein konstantes Bias-Magnetfeld entlang der magnetostriktiven Phase gelingt. Bevorzugt wird dabei die Amplitude des Modulationsmagnetfeldes etwa bei der Feldstärke des herkömmlichen Bias-Konstantfeldes eingerichtet, das man ansonsten bräuchte, um den Bereich des maximalen piezomagnetischen Koeffizienten in der magnetostriktiven Phase als Arbeitspunkt des ME-Sensors einzustellen.

30 Grundsätzlich ist bei der vorliegenden Erfindung ein Bias-Konstantfeld ebenfalls völlig verzichtbar, aber man wird bei der elektrischen Modulation die magnetostriktive Phase (14) in der Regel nicht soweit dehnen, dass sie in den Zustand mit maximalem piezomagnetischem Koeffizienten gerät. Es kann daher hier vorteilhaft sein, ein Bias-Feld zur Optimierung des

Arbeitspunktes des ME-Sensors vorzusehen. Besonders vorteilhaft ist es dabei, die magnetostriktive Phase (14) als mehrlagiges Schichtsystem mit abwechselnden ferromagnetischen und antiferromagnetischen Lagen auszugestalten, die nach der Lehre der EP 2 538 235 B1 eine Vormagnetisierung des Schichtsystems durch Exchange Bias ohne nennenswerte Streufelder erlauben (vgl. Ausführungsbeispiel). Auf diese Weise kann eine hohe Empfindlichkeit für schwache, niederfrequente Magnetfelder auch dann erreicht werden, wenn eine Mehrzahl von ME-Sensoren auf engem Raum benachbart angeordnet werden.

P A T E N T A N S P R Ü C H E

1. Magnetfeldmessverfahren mit einem magnetoelektrischen Kompositelement als Oszillator, bei dem ein zeitabhängiges Messmagnetfeld auf die magnetostriktive Phase des Kompositelements wirkt, eine elektrische Messspannung über der piezoelektrischen Phase des Kompositelements abgegriffen wird und hieraus auf das Messmagnetfeld geschlossen wird,
- 5
- gekennzeichnet durch die Schritte**
- (i) Vorsehen wenigstens einer dielektrischen Phase in stoffschlüssiger Verbindung mit der magnetostriktiven Phase des Kompositelements, wobei die dielektrische Phase bei Anlegen einer elektrischen Spannung eine Längenänderung zeigt, deren Betrag nicht-linear vom Betrag der Spannung abhängt, und
- 10
- (ii) Anlegen einer zeitlich periodischen elektrischen Modulationsspannung an die dielektrische Phase.
2. Magnetfeldmessvorrichtung, insbesondere zur Umsetzung des Magnetfeldmessverfahrens, aufweisend ein magnetoelektrisches Kompositelement mit piezoelektrischer Phase (10) mit nicht-linearer Dehnungs-Spannungs-Kennlinie, wobei das Kompositelement als mechanisch schwingfähiger Oszillator ausgebildet ist, und eine Elektrodenanordnung (12, 20) auf der piezoelektrischen Phase (10) sowie eine Einrichtung zum Abgreifen einer elektrischen Messspannung über der piezoelektrischen Phase (10) bei Auslenkung des Oszillators,
- 15
- gekennzeichnet durch**
- eine Einrichtung zum Beaufschlagen der piezoelektrischen Phase (10) mit einer zeitlich periodischen elektrischen Modulationsspannung.
- 20
3. Magnetfeldmessvorrichtung, insbesondere zur Umsetzung des Magnetfeldmessverfahrens, aufweisend ein magnetoelektrisches Kompositelement, wobei das Kompositelement als mechanisch schwingfähiger Oszillator ausgebildet ist, und eine erste Elektrodenanordnung (12, 20) auf der piezoelektrischen Phase (10) des Kompositelements sowie eine Einrichtung zum Abgreifen einer elektrischen Messspannung über der piezoelektrischen Phase (10) bei Auslenkung des Oszillators,
- 25
- gekennzeichnet durch**
- eine dielektrische Phase (18) mit nicht-linearer Dehnungs-Spannungs-Kennlinie in stoffschlüssiger Verbindung mit dem Kompositelement und eine zweite Elektrodenanordnung (22, 24) auf der dielektrischen Phase (18) sowie eine Einrichtung zum Beaufschlagen der dielektrischen Phase (18) mit einer zeitlich periodischen elektrischen Modulationsspannung.
- 30

4. Magnetfeldmessvorrichtung nach Anspruch 2,
dadurch gekennzeichnet, dass
die piezoelektrische Phase (10) aus einem Ferroelektrikum gebildet ist.
5. Magnetfeldmessvorrichtung nach Anspruch 3,
dadurch gekennzeichnet, dass
die dielektrische Phase (18) aus einem Ferroelektrikum oder einem Relaxormaterial gebildet ist.
6. Magnetfeldmessvorrichtung nach einem der Ansprüche 4 oder 5,
dadurch gekennzeichnet, dass
das Ferroelektrikum ein Material aus der Gruppe Blei-Zirkonat-Titanat (PZT), Bariumtitanat, Kalium-Natrium-Niobat (KNN) oder Natrium-Bismut-Titanat (NBT) ist.
7. Magnetfeldmessvorrichtung nach Anspruch 5,
dadurch gekennzeichnet, dass
das Relaxormaterial ein Material aus der Gruppe Blei-Magnesium-Niobat (PMN) oder Blei-Lanthan-Zirkonium-Titanat (PLZT) ist.
8. Magnetfeldmessvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Einrichtung zum Beaufschlagen mit Modulationsspannung zur Vorgabe einer Periodendauer der Modulationsspannung ausgebildet ist, die sich um einen vorbestimmten Differenzbetrag größer als null von der Eigenperiodendauer des mechanischen Oszillators unterscheidet.
9. Magnetfeldmessvorrichtung nach Anspruch 8,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Einrichtung zum Beaufschlagen mit Modulationsspannung ausgebildet ist, eine Rechteckspannung auszugeben, die eine periodische nicht-lineare Dehnung der piezoelektrischen Phase (10) bewirkt, bei der der differentielle piezoelektrische Koeffizient in der piezoelektrischen Phase (10) zwischen positiven und negativen Werten hin- und hergeschaltet wird.
10. Magnetfeldmessvorrichtung nach einem der Ansprüche 8 oder 9,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Einrichtung zum Beaufschlagen mit Modulationsspannung dazu ausgebildet ist, die

Periodendauer der Modulationsspannung zwischen vorbestimmten Intervallgrenzen automatisch zu variieren.

11. Magnetfeldmessvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet, dass

5 eine Auswerteeinrichtung dazu ausgebildet ist, die Messspannung als Funktion der Periodendauer der Modulationsspannung zu erfassen und aufzuzeichnen und/oder auszugeben.

12. Magnetfeldmessvorrichtung nach Anspruch 11,

dadurch gekennzeichnet, dass

10 die Auswerteeinrichtung dazu ausgebildet ist, lokale Maxima der Messspannung zu ermitteln und aus Betrag und Position wenigstens eines ermittelten Maximums auf Amplitude und Frequenz wenigstens einer zu messenden Magnetfeldkomponente zu schließen.

13. Magnetfeldmessvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet, dass

15 die magnetostruktive Phase (14) als mehrlagiges Schichtsystem mit abwechselnden ferromagnetischen und antiferromagnetischen Lagen ausgebildet ist.

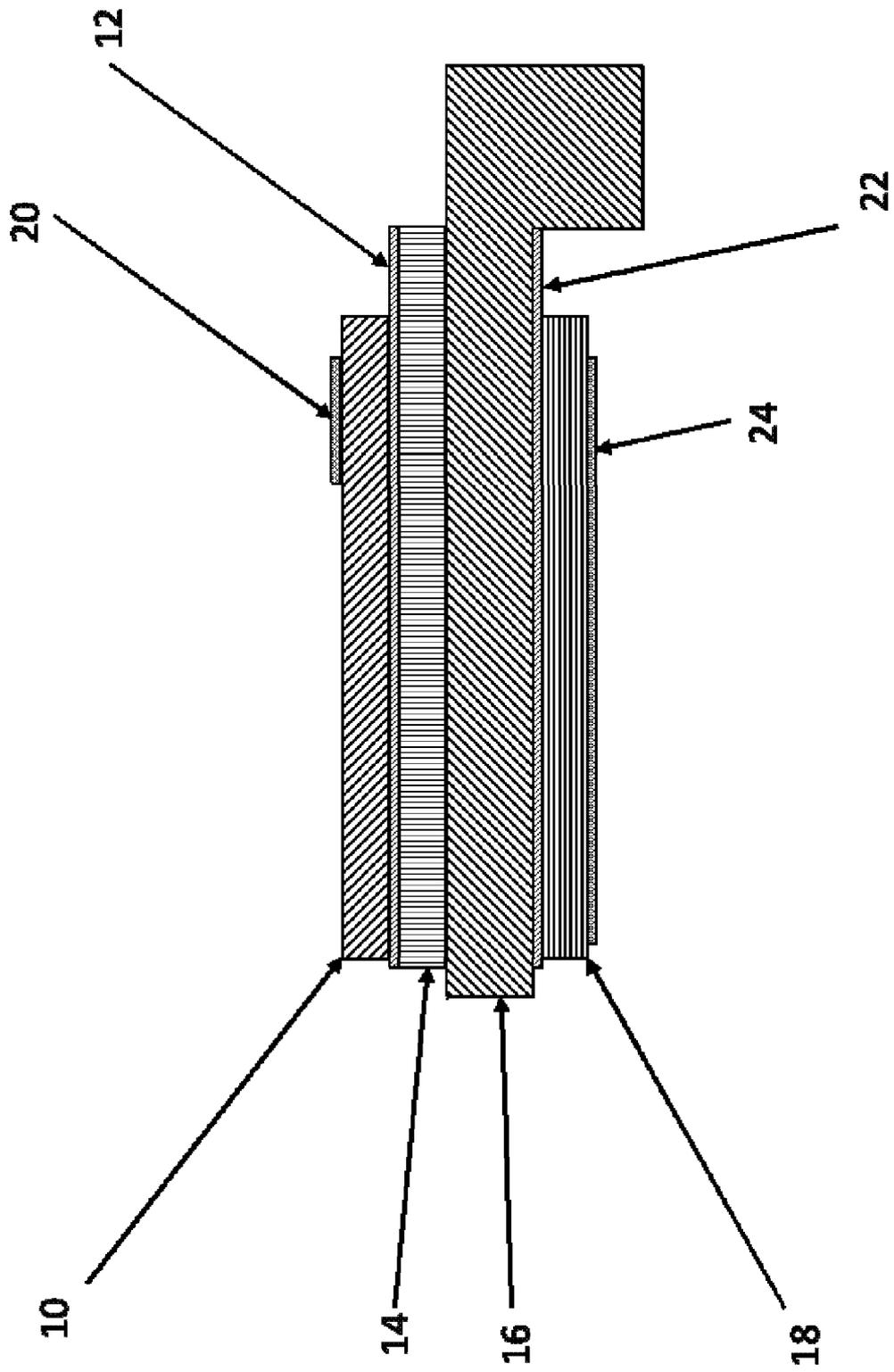


Fig. 1

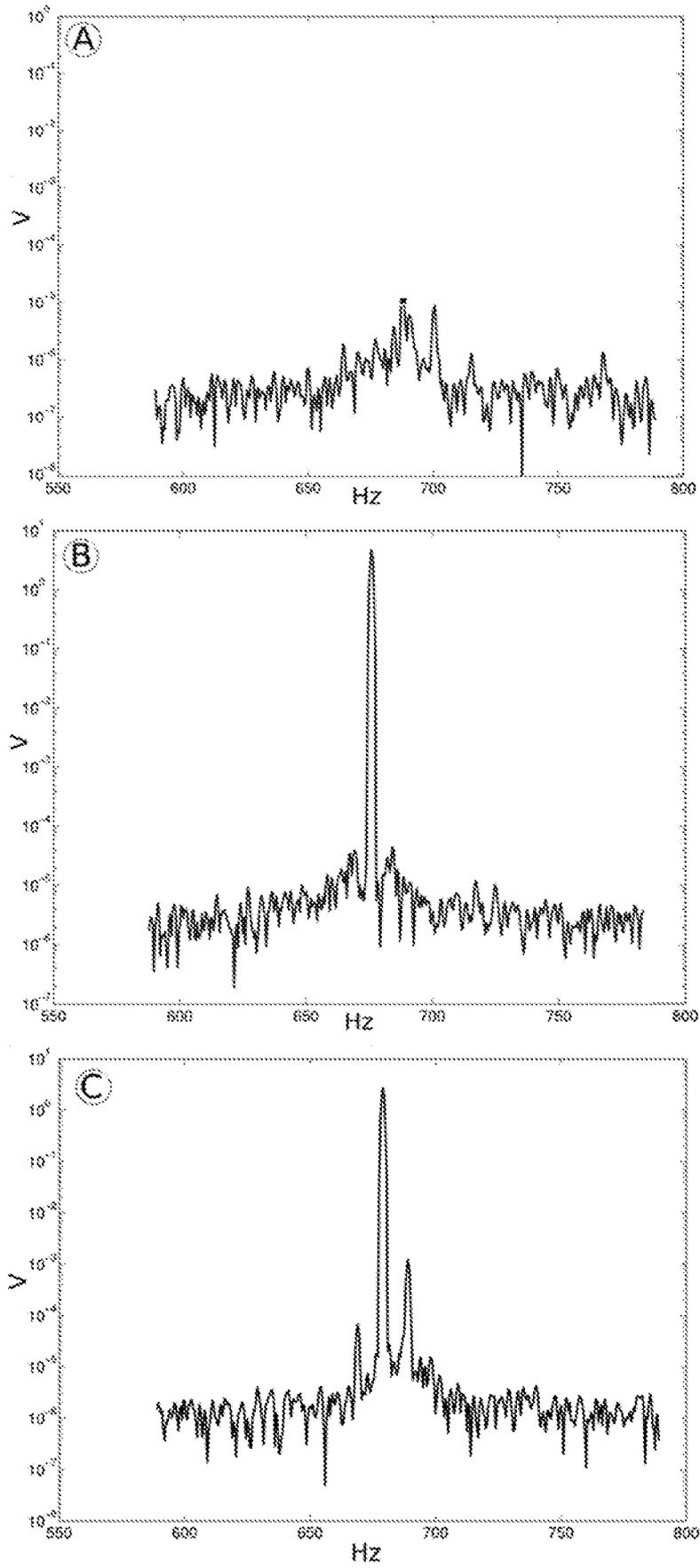


Fig. 2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/DE2016/100250

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
 INV. G01R33/09 H01L41/00 H01L41/047 G01R33/00 G01R33/06
 G01R33/18
 ADD.
 According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED
 Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
 G01R H01L
 Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
 EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	DE 10 2011 008866 A1 (UNIV KIEL CHRISTIAN ALBRECHTS [DE]) 19 July 2012 (2012-07-19) cited in the application abstract page 2, paragraph [0003] - paragraph [0007] page 5, paragraph [0035] - page 6, paragraph [0048]; figures 1-5 -----	1,2,4-13
X	US 8 222 898 B1 (EDELSTEIN ALAN SHANE [US]) 17 July 2012 (2012-07-17) cited in the application abstract column 6, line 46 - column 11, line 67; figures 1-11 ----- -/--	1,2,4-13

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	"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
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"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
"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)	"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
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	"&" document member of the same patent family
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 16 September 2016	Date of mailing of the international search report 26/09/2016
--	--

Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer Bergado Colina, J
--	---

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/DE2016/100250

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	EP 2 717 343 B1 (UNIV KIEL CHRISTIAN ALBRECHTS [DE]) 24 September 2014 (2014-09-24) cited in the application the whole document	1-13
A	----- EP 2 538 235 B1 (UNIV KIEL CHRISTIAN ALBRECHTS [DE]) 31 July 2013 (2013-07-31) cited in the application the whole document -----	1-13

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/DE2016/100250

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
DE 102011008866 A1	19-07-2012	CN 103460067 A	18-12-2013
		DE 102011008866 A1	19-07-2012
		EP 2635913 A2	11-09-2013
		JP 5946471 B2	06-07-2016
		JP 2014508287 A	03-04-2014
		KR 20140010379 A	24-01-2014
		US 2013289913 A1	31-10-2013
		WO 2012097796 A2	26-07-2012

US 8222898	B1 17-07-2012	NONE	

EP 2717343	B1 24-09-2014	CN 104737316 A	24-06-2015
		EP 2717343 A1	09-04-2014
		JP 2016500813 A	14-01-2016
		KR 20150068453 A	19-06-2015
		US 2015247904 A1	03-09-2015
		WO 2014056842 A1	17-04-2014

EP 2538235	B1 31-07-2013	CN 103620435 A	05-03-2014
		EP 2538235 A1	26-12-2012
		JP 2014525138 A	25-09-2014
		KR 20140068005 A	05-06-2014
		US 2014125332 A1	08-05-2014
		WO 2012175567 A1	27-12-2012

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/DE2016/100250

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
 INV. G01R33/09 H01L41/00 H01L41/047 G01R33/00 G01R33/06
 G01R33/18
 ADD.
 Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTER GEBIETE
 Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
 G01R H01L

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)
 EPO-Internal, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	DE 10 2011 008866 A1 (UNIV KIEL CHRISTIAN ALBRECHTS [DE]) 19. Juli 2012 (2012-07-19) in der Anmeldung erwähnt Zusammenfassung Seite 2, Absatz [0003] - Absatz [0007] Seite 5, Absatz [0035] - Seite 6, Absatz [0048]; Abbildungen 1-5 -----	1,2,4-13
X	US 8 222 898 B1 (EDELSTEIN ALAN SHANE [US]) 17. Juli 2012 (2012-07-17) in der Anmeldung erwähnt Zusammenfassung Spalte 6, Zeile 46 - Spalte 11, Zeile 67; Abbildungen 1-11 ----- -/--	1,2,4-13

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

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

- "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
- "E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
- "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
- "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
- "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist
- "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
- "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
- "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
- "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absenddatum des internationalen Recherchenberichts
16. September 2016	26/09/2016

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Bevollmächtigter Bediensteter Bergado Colina, J
--	--

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	EP 2 717 343 B1 (UNIV KIEL CHRISTIAN ALBRECHTS [DE]) 24. September 2014 (2014-09-24) in der Anmeldung erwähnt das ganze Dokument	1-13
A	----- EP 2 538 235 B1 (UNIV KIEL CHRISTIAN ALBRECHTS [DE]) 31. Juli 2013 (2013-07-31) in der Anmeldung erwähnt das ganze Dokument -----	1-13

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/DE2016/100250

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 102011008866 A1	19-07-2012	CN 103460067 A	18-12-2013
		DE 102011008866 A1	19-07-2012
		EP 2635913 A2	11-09-2013
		JP 5946471 B2	06-07-2016
		JP 2014508287 A	03-04-2014
		KR 20140010379 A	24-01-2014
		US 2013289913 A1	31-10-2013
		WO 2012097796 A2	26-07-2012

US 8222898	B1 17-07-2012	KEINE	

EP 2717343	B1 24-09-2014	CN 104737316 A	24-06-2015
		EP 2717343 A1	09-04-2014
		JP 2016500813 A	14-01-2016
		KR 20150068453 A	19-06-2015
		US 2015247904 A1	03-09-2015
		WO 2014056842 A1	17-04-2014

EP 2538235	B1 31-07-2013	CN 103620435 A	05-03-2014
		EP 2538235 A1	26-12-2012
		JP 2014525138 A	25-09-2014
		KR 20140068005 A	05-06-2014
		US 2014125332 A1	08-05-2014
		WO 2012175567 A1	27-12-2012
