

(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  
07. November 2019 (07.11.2019)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2019/210900 A1**

(51) Internationale Patentklassifikation:

G01R 33/02 (2006.01) H01L 41/12 (2006.01)  
G01R 33/18 (2006.01) H01P 7/00 (2006.01)  
G01R 33/028 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2019/100286

(22) Internationales Anmeldedatum:  
26. März 2019 (26.03.2019)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:  
10 2018 110 511.8  
02. Mai 2018 (02.05.2018) DE

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

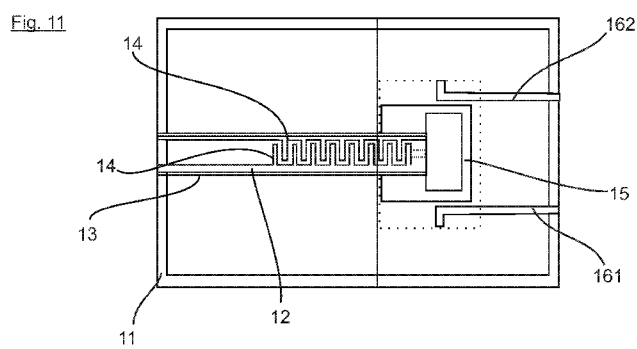
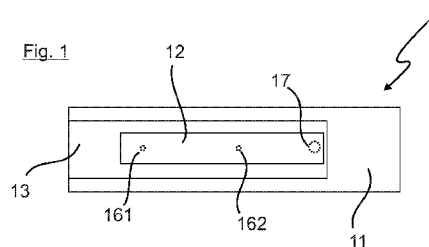
(72) Erfinder: SALZER, Sebastian; Hafendamm 39, 24937 Flensburg (DE). KNÖCHEL, Reinhard; Wacholderweg 23, 25336 Elmshorn (DE). QUANDT, Eckhard; Steenkamp 9, 24226 Heikendorf (DE). THORMÄHLEN, Lars; Muhliusstraße 91, 24103 Kiel (DE).

(74) Anwalt: HANSEN UND HEESCHEN PATENTANWÄLTE; 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, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP,

(54) Title: MICROWAVE RESONATOR MAGNETIC FIELD MEASURING DEVICE AND MAGNETIC FIELD MEASURING METHOD

(54) Bezeichnung: MIKROWELLENRESONATOR-MAGNETFELDMESSVORRICHTUNG SOWIE MAGNETFELDMESSVERFAHREN



(57) Abstract: The invention relates to a microwave resonator magnetic field measuring device (1) for measuring alternating magnetic fields, comprising a base plate (11) having at least one supporting/bearing/clamping point (111), at least one mechanical oscillator (12 + 13) formed as a cantilever (13) having at least one magnetostrictive layer (12), the latter being connected and mounted at at least one point to the base plate (11) in the at least one supporting/bearing/clamping point (111), at least one input coupling means (161) for microwaves and at least one output coupling means (162) for microwaves, wherein the base plate (11) and the mechanical oscillator (12+13) formed as a microwave resonator are at least partly electrically conductive and electrically conductively connected to one another. The invention also relates to a magnetic field measuring method having a magnetic

WO 2019/210900 A1

KR, KW, 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)

---

field measuring device according to the invention.

(57) **Zusammenfassung:** Die Erfindung betrifft eine Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung (1) zur Messung von magnetischen Wechselfeldern umfassend eine Grundplatte (11) mit wenigstens einem Abstütz-/Lager-/Einspannpunkt (111), wenigstens einen als Mikrowellen-Resonator ausgebildeten mechanischen Schwinger (12 + 13) in Form eines Cantilevers (13) mit wenigstens einer magnetostriktiven Schicht (12), wobei dieser wenigstens an einer Stelle mit der Grundplatte (11) in dem wenigstens einen Abstütz-/Lager-/Einspannpunkt (111) verbunden und gelagert ist, wenigstens eine Einkopplung (161) für Mikrowellen und wenigstens eine Auskopplung (162) für Mikrowellen wobei die Grundplatte (11) und der als Mikrowellen-Resonator ausgebildete mechanische Schwinger (12 + 13) wenigstens teilweise elektrisch leitfähig ausgebildet und miteinander elektrisch leitfähig verbunden sind. Ferner betrifft die Erfindung ein Magnetfeldmessverfahren mit einer erfindungsgemäßen Magnetfeldmessvorrichtung.

## Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung sowie Magnetfeldmessverfahren

Die Erfindung betrifft eine Magnetfeldmessvorrichtung zur Messung von magnetischen Wechselfeldern mit einer Grundplatte und einem Cantilever mit wenigstens einer magnetostriktiven Schicht. Ferner betrifft die Erfindung ein Magnetfeldmessverfahren mit einer erfindungsgemäßen Magnetfeldmessvorrichtung.

Im Sinne dieser Offenbarung werden Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtungen auch als magnetoelektrische Sensoren, kurz auch ME-Sensoren, verstanden bzw. bezeichnet. Ferner werden im Sinne dieser Offenbarung Cantilever auch als Biegebalken oder mit weiteren Schichten darauf als mechanischer Schwinger bezeichnet.

Aus dem **Stand der Technik** sind unterschiedliche Anordnungen bekannt, bei denen konventionelle ME-Sensoren ein magnetisches Wechselfeld über ein magnetostriktives Material in eine Längenänderung umsetzen, welche in einer piezoelektrischen Schicht eine Polarisationsänderung und damit eine Klemmenspannung als Messsignal hervorrufen. Es sind auch ME-Sensoren bekannt, bei denen die durch die Längenänderung verursachte mechanische Auslenkung optisch detektiert wird, beispielsweise mittels Laser.

Magnetoelektrische Dünnschichten werden bisher in Verbindung mit Mikrowellen als Filter eingesetzt. Dabei wird meist ein Yttrium Eisen Granat (YIG) Film auf eine Mikrowellenleitung aufgebracht. Wird nun eine Mikrowelle mit einer Frequenz in der Nähe der ferromagnetischen Resonanz, nachfolgend auch FMR, angelegt, wird diese in das aufgebrachte Substrat eingekoppelt und bei der FMR teilweise absorbiert bzw. transmittiert, was eine Filterwirkung hervorruft, offenbart in Tsai, Chen S.; Su, Jun 1999: „A wideband electronically tunable microwave notch filter in yttrium iron garnetgallium arsenide material structure“ In Appl. Phys. Lett. 74 (14), pp. 2079-2080. DOI : 10.1063/1.123763.

Aus der Druckschrift „Millimeter-wave magnetoelectric effects in bilayers of barium hexaferrite and lead zirconate titanate“ von Srinivasan, G.; Zavislyak, I.V.; Tatarenko, A. S. 2006 „Millimeter-wave magnetoelectric effects in bilayers of barium hexaferrite and lead zirconate titanate“. In Appl. Phys. Lett. 89 (15), p. 152508. DOI: 10.1063/1.2360901 ist bekannt, dass über ein magnetisches Gleichfeld die FMR verschoben werden kann, was eine Verstimmung des Filters bewirkt. Über eine piezoelektrische Schicht kann die FMR über den inversen magnetoelektrischen Effekt auch über eine angelegte Spannung verändert werden. Ziel ist in der Regel die Abstimmbarkeit der Filter.

Ferner ist aus der Veröffentlichung „Electronically Tunable Miniaturized Antennas on Magnetolectric Substrates With Enhanced Performance“ von Yang, Guo-Min; Xing, X.; Daigle, A.; Liu, M.; Obi, O.; Wang, J. W. et al. 2008: “Electronically Tunable Miniaturized Antennas on

Magnetolectric Substrates With Enhanced Performance” In IEEE Trans. Magn. 44 (11), pp. 3091-3094. DOI: 10.1109/TMAG.2008.2003062 eine Anwendung der Abstimmbarkeit und Ausnutzung der Mikrowellenresonanz bei Antennen bekannt. So entstandene nano-elektromagnetische (NEMS) Resonatoren können auch als Sensoren für die Messung von  
5 kleinen magnetischen Gleichfeldern verwendet werden, vgl. „Self-biased 215 MHz magnetolectric NEMS resonator for ultra-sensitive DC magnetic field detection”, Nan, Tianxiang; Hui, Yu; Rinaldi, Matteo; Sun, Nian X 2013: “Self-biased 215 MHz magnetolectric NEMS resonator for ultra-sensitive DC magnetic field detection” In Scientific reports 3, p. 1985. DOI: 10.1038/srep01985. In Abhängigkeit eines angelegten Gleichfeldes ändert sich die  
10 Impedanz des Resonators bei der Mikrowellenfrequenz, die damit in Amplitude und Phase verstimmt wird. Dabei lässt sich auch die elektro-mechanische Resonanz des NEMS Resonators ausnutzen, um das Ausgangssignal zu steigern. Es wird ein Sensor mit mechanischer Resonanzfrequenz um 215 MHz beschrieben, der piezoelektrisch angeregt und ausgelesen wird. Das Messprinzip basiert auf der Veränderung der Resonanz durch eine  
15 Änderung des E-Moduls im Messmagnetfeld, dem delta E-Effekt, wobei sich dieses zur Messung von zeitlich konstanten Magnetfeldern eignet.

Ferner sind aus dem Übersichtsartikel von Patrick Pons, Hervé Aubert, Manos Tentzeris, „Overview of Electromagnetic Transducers with Radar Interrogation for Passive Wireless Sensors Applications”, International Conference on Microwaves, Radar and Wireless  
20 Communications (MIKON), Jun 2014, Gdansk, Poland <hal-01024205> fernabfragbare Sensoren auf Basis von HF-Resonatoren (>> 1 GHz) für verschiedene physikalische Messgrößen bekannt, wobei auch als weitere Quellen die Druckschriften US 2014 049 268 A1 und US 2005 241 403 A1 zu nennen sind.

Weiter sind aus den Druckschriften US 6,404,304 B1 und US 7,339,446 B2 verstimmbare  
25 Mikrowellenfilter in MEMS-Bauweise zu entnehmen, bei denen ein biegbares Element („elastic member“) zur Kontrolle der HF-Resonanzfrequenz dient.

Das Messen von zeitabhängigen und schwachen Magnetfeldern gelingt u. a. mit magnetoelektrischen Sensoren, kurz ME-Sensoren, die üblich einen Materialverbund mit wenigstens einer magnetostriktiven und einer piezoelektrischen Materialphase in mechanischer  
30 Kopplung miteinander umfassen. Die magnetostriktive Phase erfährt dabei durch das Magnetfeld eine Längenänderung, die sich über die mechanische Kopplung auf die piezoelektrische Phase überträgt und eine messbare elektrische Spannung hervorruft. Ist das Magnetfeld zeitlich periodisch oder gar harmonisch, dann vollführt der ME-Sensor eine oszillierende Bewegung, und es hat sich bewährt, ihn als Schwinger auszugestalten. Bei  
35 Anregung des Schwingers in seiner mechanischen Resonanz bewirkt die Überhöhung der Schwingungsamplitude, dass sehr schwache Magnetfelder bereits große Spannungssignale

hervorrufen. Dies ist der Grund für die Empfindlichkeit z.B. eines ME-Bimorphs, der gewöhnlich aus zwei Schichten und ggf. einem Substrat besteht.

Die resonante Schwingung kann unmittelbar durch das periodische Magnetfeld angeregt werden. Miniaturisierte ME-Schwinger weisen jedoch Resonanzen im hohen Kilohertz-Bereich  
5 auf, während sich die hier interessierenden biomagnetischen Felder im Frequenzband unterhalb von 200 Hz befinden. Mittels eines Modulationsmagnetfeldes nahe der mechanischen Resonanzfrequenz des Schwingers kann ein niederfrequentes Magnetfeld in die Resonanz umgesetzt werden, offenbart in der Druckschrift EP 2 635 913 B1.

Alternativ ist dies auch, offenbart in der Druckschrift EP 3 104 186 A1 durch das Anlegen einer  
10 Drive-Spannung an die piezoelektrische Phase des ME-Sensors möglich, sofern diese eine nicht-lineare Längenänderung mit der Drive-Spannung aufweist. Die elektrisch vermittelte Frequenzumsetzung ist technisch deutlich leichter zu realisieren als ein magnetisches Modulationsfeld, allerdings stört die Drive-Spannung als Großsignal auch das Spannungsmesssignal des ME-Sensors.

15 Eine weitere Störquelle für das magnetoelektrische-Sensorsignal ist das thermische Rauschen der piezoelektrischen Phase. Ferner ist noch das diesbezügliche Problem der Sensitivität zu nennen, das insbesondere bei schwachen beispielsweise biologischen Magnetfeldern zum Tragen kommt.

Der vorliegenden Erfindung liegt die **Aufgabe** zugrunde, eine Mikrowellenresonator-  
20 Magnetfeldmessvorrichtung zur Messung von magnetischen Wechselfeldern sowie ein dazugehöriges Magnetfeldmessverfahren aufzuzeigen, wobei diese eine einfachere Herstellung insbesondere auch von magnetoelektrischen Dünnschicht-Sensoren, kurz auch ME-Sensoren, zur Messung von kleinsten magnetischen Wechselfeldern unterschiedlicher Frequenz ermöglichen soll.

25 Ferner soll das Auslesen derartiger Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung einfacher als bisher werden, wobei insbesondere Störeffekte und Rauschquellen in der Messung und / oder Auswertung eliminiert werden sollen, wobei insbesondere das thermische Rauschen der piezoelektrischen Schicht problematisch im Stand der Technik ist.

Ferner soll es möglich sein, eine weitere Miniaturisierung derartiger Mikrowellenresonator-  
30 Magnetfeldmessvorrichtungen zu ermöglichen, insbesondere derartige Sensoren zu miniaturisieren.

Ferner sollen weitere Einstellmöglichkeiten geschaffen werden, die eine Verbesserung der Messung ermöglichen.

Ein Erfindungsgedanke soll weiterhin auch darauf gerichtet sein, dass eine technologische einfache Herstellung ermöglicht wird, nämlich beispielsweise das bewusste Weglassen von Komponenten des Standes der Technik, wie beispielsweise der Piezoschicht, wobei bestimmte vorhandene Rauschquellen der konventionellen Auslesemethoden nicht mehr auftreten sollen, z.B. das Rauschen der Piezoschicht, und dass durch die Nutzung zweier unabhängiger Resonanzen die Sensitivität beispielsweise durch die Variation der Mikrowellen-Güte variiert werden soll.

**Gelöst** werden diese Aufgaben mit einer Magnetfeldmessvorrichtung zur Messung von magnetischen Wechselfeldern gemäß Hauptanspruch sowie einem Magnetfeldmessverfahren mit einer erfindungsgemäßen Magnetfeldmessvorrichtung gemäß nebengeordnetem Anspruch bzw. den jeweils untergeordneten Ansprüchen.

Die Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung zur Messung von magnetischen Wechselfeldern umfasst eine Grundplatte mit wenigstens einem Abstütz-/Lager-/Einspannpunkt, wenigstens einen als Mikrowellen-Resonator ausgebildeten mechanischen Schwinger in Form eines Cantilevers mit wenigstens einer magnetostriktiven Schicht, wobei dieser wenigstens an einer Stelle mit der Grundplatte in dem wenigstens einen Abstütz-/Lager-/Einspannpunkt verbunden und gelagert ist, wenigstens eine Einkopplung für Mikrowellen und wenigstens eine Auskopplung für Mikrowellen wobei die Grundplatte und der als Mikrowellen-Resonator ausgebildete mechanische Schwinger wenigstens teilweise elektrisch leitfähig ausgebildet und miteinander elektrisch leitfähig verbunden sind.

Die Erfindung schlägt in einem ersten Aspekt vor, zur Signalauskopplung auf das Piezo-Elektrikum zu verzichten und stattdessen die magnetostriktive Phase als Bestandteil einer veränderlichen oder beweglichen Komponente eines verstimmbaren Mikrowellen-Resonators vorzusehen. Mikrowellen- oder HF-Resonatoren sind üblich passive elektrische Schwingkreise, in die kapazitiv oder induktiv oszillierende elektromagnetische Felder ein- und ausgekoppelt werden können. Die HF-Resonanzfrequenz dieser Schwingkreise wird durch ihre Feldenergiespeicher, mithin durch ihre Form, bestimmt, und sie können als effektive Frequenzfilter wirken, da sie in entsprechender Ausführung nur Signale in ihrer HF-Resonanz passieren lassen bzw. wieder aussenden.

Erfolgt nun erfindungsgemäß durch Einwirken eines zu messenden Magnetfeldes auf die magnetostriktive Phase eine Änderung wenigstens eines der Feldspeicher des HF-Resonators, so ändert sich dessen HF-Resonanzfrequenz entsprechend im Takt des einwirkenden Magnetfeldes, wodurch sich im Prinzip hieraus bereits Amplitude und Frequenz des Magnetfeldes ablesen lassen.

Insbesondere kann in einer besonders bevorzugten Ausführungsform die Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung Piezoschicht-frei auslesbar ausgebildet sein, so dass eine die piezoelektrische Schicht weggelassen werden kann, was wiederum die technologische Komplexität verringert und das thermisch-elektrische Rauschen der piezoelektrischen Schicht  
5 vermeidet. Weiter kann zudem auf einen Ladungsverstärker verzichtet werden, dessen Verstärkung von der Sensorkapazität abhängig ist und dessen Rückkopplungsnetzwerk entsprechend angepasst werden müsste.

Die mechanische Auslenkung wird mit Hilfe eines zusätzlich integrierten Hochfrequenz-Mikrowellen-Resonators detektiert, was sich vorteilhaft zur Empfindlichkeitssteigerung  
10 ausnutzen lässt und technologische Schritte bei der Herstellung spart.

Durch die Auslesung über die Mikrowelle wird die piezoelektrische Schicht auf dem Sensor überflüssig und das thermische Rauschen durch die piezoelektrischen Verluste entfällt vollständig.

Die Erfindung gestattet zudem die Anwendung von magnetischen  
15 Frequenzumsetzungsverfahren, mit denen niederfrequente (z.B. biomagnetische) Signale in der mechanischen Resonanz des mechanischen Schwingers gemessen werden können. Durch das nichtlineare Verhalten der Magnetisierung des Sensors wird ein niederfrequentes Signal in die mechanische Resonanz des mechanischen Schwingers umgesetzt und dann über die Mikrowelle ausgelesen.

20 Die Einkopplung für Mikrowellen und/oder die Auskopplung für Mikrowellen erfolgt besonders bevorzugt kapazitiv oder induktiv. Es sind entsprechende Einkopplungs- und Auskopplungspunkte für die Mikrowellen vorgesehen.

In der Grundplatte kann insbesondere bevorzugt eine Abstimmerschraube und/oder eine einstellbare Reaktanz und/oder eine Geometrieverstellung zur Verstimmung des als  
25 Mikrowellen-Resonator ausgebildeten mechanischen Schwingers vorgesehen sein, so dass eine Einstellmöglichkeit des Resonators gegeben ist.

Der Gütefaktor des Resonators kann beispielsweise über die Mikrowellen-Resonanz eingestellt werden, beispielsweise durch Verstellen der Abstimm- bzw. der Stimmschraube oder Variieren der Verkopplung, was eine Abstimmung der Signalstärke ermöglicht.

30 Der als Mikrowellen-Resonator ausgebildete mechanische Schwinger kann in einer bevorzugten Ausführungsvariante in genau einem Punkt an einem der Enden oder in der Mitte oder in genau zwei Punkten, dem ersten und dem zweiten Ende des als Mikrowellen-Resonator ausgebildeten mechanischen Schwingers gelagert sein.

Durch die elektromagnetischen Felder fließen hochfrequente Ströme, die sich im Bereich der Skin-Eindringtiefe konzentrieren, wobei die Erfindung entsprechend optional vorsieht, die Oberfläche des Sensors in diesem Bereich möglichst leitfähig zu gestalten, was beispielsweise durch eine Ummantelung des mechanischen Schwingers mit einer Goldschicht entsprechender  
5 Dicke erfolgen kann. Hierdurch wird die Güte des Mikrowellen-Resonators gesteigert.

Es wird vorgeschlagen, den Cantilever auf seiner gesamten Oberfläche elektrisch gut leitend auszubilden, beispielsweise durch einen Goldüberzug.

Die Länge des mit einer gut leitfähigen Schicht versehenen Abschnitts des Cantilevers beträgt insbesondere sinnvollerweise  $\lambda\mu W/2$  oder  $\lambda\mu W/4$ , also die Hälfte bzw. ein Viertel der  
10 Mikrowellen-Wellenlänge. Die magnetostriktive Schicht unterhalb der gut leitfähigen Schicht kann über die volle oder auch nur einen Teil der Länge aufgebracht sein.

Die Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung kann als Hohlraumresonator ausgebildet sein.

Die magnetostriktive Schicht kann insbesondere in Dünnschichttechnologie auf dem Cantilever  
15 aufgebracht sein.

Weiter bzw. alternativ kann die magnetostriktive Schicht selbst als Cantilever ausgebildet sein.

Bei diesen zuvor genannten zwei Varianten wird diesseits auf miniaturisierte Magnetfeldsonden abgezielt, bei denen die magnetostriktive Phase in Dünnschichttechnologie auf Cantilevern abgeschieden bzw. selbst als Cantilever aufgebaut wird. Hier wird vorzugsweise die  
20 Resonanzüberhöhung der mechanischen Schwingung der Cantilever ausgenutzt werden, um auch schwache Felder zu detektieren. Die Anregung der Cantilever kann dabei elektrisch über ein Piezoelement erfolgen, welches allerdings nur als Antrieb und nicht mehr zur Signalauskopplung dient, was die bisherigen Störungen im Stand der Technik vermeidet. Dabei kann auch die Frequenzumsetzung des zu messenden Magnetfeldes in die mechanische  
25 Resonanz des Cantilevers wie zuvor erfolgen.

Die HF-Resonanzfrequenz ( $> 1$  GHz) liegt typisch wenigstens drei Größenordnungen über der mechanischen Resonanzfrequenz ( $< 1$  MHz), d.h. aus Sicht des HF-Resonators erfolgt seine Verstimmung auch im „doppelt resonanten“ Betrieb durch den schwingenden Cantilever langsam.

Die Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung kann besonders bevorzugt Piezoschichtfrei ausgebildet sein, wobei sich diese Piezoschicht-Freiheit auf die Signalauskopplbarkeit bezieht. Ein Erregen mittels einer Piezo-Transducer Schicht soll weiterhin möglich sein können, so dass zwar ein Erregen möglich ist, jedoch gerade ein Auslesen über eine piezoelektrische Schicht bevorzugt nicht möglich oder gar ausgeschlossen werden sollte.



Die Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung kann insbesondere kontaktlos auslesbar und/oder fernauslesbar ausgebildet sein.

Der als Mikrowellen-Resonator ausgebildete mechanische Schwinger kann in einer Ausführungsvariante über ein Piezo-Transducer-Element elektrisch anregbar ausgebildet sein.

- 5 Um die Güte der Anordnung zu erhöhen, kann die Anordnung auch als Hohlraumresonator ausgelegt werden, als dessen Deckel ein zweiseitig eingespannte Bieger fungiert. Ein angelegtes Wechselfeld wird den Bieger wiederum in Schwingung versetzen und die Resonanzfrequenz im Resonator variieren.

- 10 Da der Sensor in einem Hohlraum eingeschlossen werden kann, können externe akustische oder elektrische Störungen bereits durch die Anordnung abgeschirmt werden.

So genannte „Stimmgabelsensoren“ zur Unterdrückung von Gleichtaktstörungen sind auch möglich.

- 15 Bei dem Magnetfeldmessverfahren mit einer erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung wird die Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung insbesondere in der Grundvariante in Mikrowellen-Resonanz betrieben.

- 20 In einer bevorzugten Ausführungsform wird die Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung in doppelter Resonanz betrieben, wobei dies in Mikrowellen-Resonanz und in mechanischer Resonanz erfolgt, wobei hierbei ein Verstimmen des Mikrowellen-Resonators durch den zugleich in mechanischer Resonanz schwingenden mechanischen Schwinger erfolgt.

Ein weiterer Vorteil kann sich bei Verwendung von zwei getrennten Resonanzfrequenzen derart ergeben, da beide Frequenzen individuell eingestellt werden können, was wiederum neue Abstimmungsmöglichkeiten ermöglicht.

- 25 Ferner kann ein Fernauslesen des / der Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung erfolgen, wobei die Schwingung des als Mikrowellen-Resonator ausgebildeten mechanischen Schwingers ohne eigene Energieversorgung durch ein Einstrahlen von gepulster oder intensitätsmodulierter elektromagnetischer Strahlung hoher Energie angeregt wird und ein Auslesen dessen Reaktion / Antwort über Mikrowellenstrahlung erfolgt.

- 30 Als diesbezüglich weiterer Aspekt der Erfindung ergibt sich also bei der Ausgestaltung des Magnetfeldsensors als fernauslesbare Einheit ohne eigene Energieversorgung. Es ist demnach möglich, die Schwingung des Cantilevers durch die Einstrahlung von gepulster oder intensitätsmodulierter EM-Strahlung hoher Energie anzuregen und seine Antwort über eine breitbandige Mikrowellenabfrage niedriger Energie auszulesen. Der Sensor verhält sich dabei wie ein modulierter Streukörper. Die Modulation bzw. ihr a priori unbekannter Anteil beruht

dabei unmittelbar auf dem am Ort des Sensors und entlang des Cantilevers zu messenden wirksamen Niederfrequenz-Magnetfeld.

Hierbei verhält sich die Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung als ein modulierter Streukörper und die Modulation bzw. der a priori unbekannte Anteil beruht unmittelbar auf dem am Ort der Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung und entlang des als Mikrowellen-  
5 Resonator ausgebildeten mechanischen Schwingers wirksamen Magnetfeldes.

Eine weitere besonders bevorzugte Ausgestaltungsvariante wird in der Ausgestaltung als passives System gesehen, wobei dem System Energie durch gepulste oder intensitätsmodulierte elektromagnetische Strahlung zugeführt wird, während gleichzeitig eine  
10 Abfrage des Sensors mit Mikrowellenstrahlung erfolgt. Die Pulsrate bzw. Modulationsfrequenz der Energie zuführenden Strahlung sind dabei auf die HF-Resonanz des Schwingkreises abgestimmt.

Diese Variante stellt jedoch eine interessante Alternative zum klassischen ME-Bimorph dar, dessen Eigenschaften auch in dieser Technologieoffenbarung die Grundlage der Auslegung  
15 bilden. Der neue Sensor kann ohne elektrische Spannungsversorgung und insbesondere ohne äußere Anschlüsse ausgestaltet sein. Vielmehr kann er als autonome Einheit in einer magnetisch neutralen Hülle, z.B. aus Kunststoff, gekapselt ausgestaltet sein. Dies lässt neue Einsatzmöglichkeiten, etwa im Außenraum unter Witterung oder sonstigen korrodierenden Bedingung oder auch im Inneren lebender Organismen zu.

Weiterhin kann eine Mehrzahl solcher Sensoren in einem Raumgebiet nach Belieben verteilt und einzeln oder zusammen von einem Nutzer abgefragt werden, der eine entsprechende EM-  
20 Strahlungsquelle ausrichtet. Die Technologie der Erfindung basiert auf der von ME-Sensoren bekannten Magnetostriktion mit Resonanzüberhöhung kombiniert mit bekannter und bereits umgesetzter HF-Resonatortechnik.

Zur Miniaturisierung oder zur Einführung eines Fernzugriffs kann das Layout des Mikrowellen-  
25 Resonators leicht verändert werden.

Die zum Auslesen benötigten Geräte sind beispielsweise Standard-Mikrowellengeräte.

Mögliche Anwendungsgebiete derartiger Magnetfeldmessvorrichtungen bzw. Sensoren sind beispielsweise bzw. auch insbesondere zerstörungsfreies Testen von Materialien, die Messung  
30 biomagnetischer Signale wie Herzsignale, beispielweise über Magnetokardiografie, oder die Lokalisation von Hirnschrittmacher-Elektroden.

Bevorzugte Ausführungsformen und Funktionsweisen:

Bei der erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung, auch als Dünnschicht-ME-Sensor bezeichnet, wird ein magnetostriktiv beschichteter Biegebalken

zusätzlich als Mikrowellen-Resonator betrieben. Dazu kann der Biegebalken insbesondere als mechanischer Schwinger der Länge einer viertel oder halben Wellenlänge der Mikrowelle über einer elektrisch leitenden Fläche einseitig oder beidseitig eingespannt ausgebildet sein. Über Magnetostriktion ändert sich die Länge  $l$  oder Höhe  $h$  des so entstandenen

5 Mikrowellenresonators und damit dessen Resonanzfrequenz proportional zur momentanen Stärke des zu messenden Magnetfeldes. Die Höhe des Biegebalkens über der leitenden Ebene / Grundplatte wird dabei möglichst klein, aber größer als die maximale Schwingungsamplitude des Biegers bei transversaler mechanischer Bewegung gewählt. Über kapazitive oder induktive Kopplungen wird eine Mikrowelle in den Resonator eingespeist und wieder ausgekoppelt. Durch

10 eine spezielle Anordnung der Ein- und Auskopplung kann das Mikrowellensignal durch den Sensor in Amplitude und Phasenwinkel verändert werden. Eine Abstimmerschraube kann insbesondere eine zusätzliche mechanische Abstimmung der Mikrowellenresonanz erlauben. Ein schwaches magnetisches Feld kann nun dadurch gemessen werden, dass

a) der ein- oder beidseitig eingespannte ME-Sensor durch ein magnetisches Feld in seiner

15 mechanischen Resonanz zum Schwingen mit einer erhöhten Amplitude angeregt wird;

b) ein zusätzliches magnetisches Gleichfeld kann die Bewegung des Sensors außerdem verändern;

c) die mechanische Bewegung verschiebt die Mikrowellenresonanz in Amplitude und Phase;

d) Amplitude und/oder Phase der Mikrowelle kann durch günstige Ausgestaltung der

20 elektromagnetischen Resonanz besonders stark beeinflusst und verändert werden;

e) gleichzeitig kann sowohl in mechanischer als auch in elektromagnetischer Resonanz gearbeitet werden, wobei diese sich weitgehend unabhängig voneinander einstellen lassen, wodurch Resonanzüberhöhungen doppelt ausgenutzt werden können;

f) die Ausgestaltung der Vorrichtung kann so gewählt werden, dass die Abhängigkeit der

25 Verschiebung sich möglichst linear zum zu messenden magnetischen Wechselfeld verhält.

Die Vorteile der Erfindung lassen sich nachfolgend zusammenfassen:

- Die Sensoren sind miniaturisierbar durch das Auslesen über Hochfrequenz (HF), was einen klaren Vorteil gegenüber im Stand der Technik üblichen Auslesemethoden wie beispielsweise optisch über Laser ergibt;

30

- technologisch einfach herzustellen, da auf die piezoelektrische Schicht zur Signalauskopplung verzichtet werden kann;
- die Integrierbarkeit mit HF Verstärkern ist auf einfachste Weise nunmehr möglich;
- die Ausnutzung zweier Resonanzen ergibt deutlich mehr Einstellmöglichkeiten, insbesondere ist ein präzises Einstellen der Mikrowellen ( $\mu\text{W}$ )-Resonanzen möglich, was bei den

35

- konventionellen Ausleseverfahren überhaupt nicht möglich ist;
- es handelt sich um ein technologisch einfacheres Herstellverfahren für derartige Sensoren,

da durch den bewussten Verzicht der piezoelektrischen Schicht einfachere Sensoren realisiert werden können;

- durch den Verzicht auf die piezoelektrische Schicht entfällt auch wenigstens eine Rauschquelle, nämlich unter anderem diejenige im Verstärker und in der piezoelektrischen Schicht selbst, bedingt durch das thermische Rauschen;
- ein Auslesen nach dem Sensor ist durch die HF-Technologie nicht mehr störanfällig;
- ferner ist erstmals ein Auslesen über Funkmodule mit anderem Frequenzbereich möglich;
- eine Vakuumverkapselung ist durch Anordnung als Kavität angezeigt bzw. möglich;
- das erfindungsgemäße Verfahren erlaubt auch ein Auslesen mit anderen Ansteuerungsmethoden, wie bspw. Delta E;
- die Vorrichtung in Form des Sensors sowie das Verfahren haben ein hohes Potential zur einfachen drahtlosen Abfrage von einer Mehrzahl von Sensoren, die in einem räumlich verteilten Netzwerk angeordnet sind.

15 Nachfolgend werden weitere Ausführungsbeispiele bzw. -formen der Erfindung anhand der beiliegenden Zeichnungen in der **Figurenbeschreibung** beschrieben, wobei diese die Erfindung erläutern sollen und nicht beschränkend zu werten sind:

Es zeigen:

- 20 Fig. 1 eine schematische Darstellung eines ersten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer Aufsicht;
- Fig. 2 eine schematische Darstellung des ersten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 aus Fig. 1 in einem Schnitt bzw. schematischen Seitenansicht;
- 25 Fig. 3 eine schematische Darstellung eines zweiten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer räumlichen Schrägansicht;
- Fig. 4 eine schematische Darstellung eines dritten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer schematischen Seitenansicht;
- 30 Fig. 5 eine schematische Darstellung eines vierten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer schematischen Seitenansicht;

- Fig. 6 eine schematische Darstellung eines fünften Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer schematischen Seitenansicht;
- 5 Fig. 7 eine schematische Darstellung eines sechsten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer schematischen Seitenansicht;
- Fig. 8 eine schematische Darstellung eines siebten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer räumlichen Schrägansicht;
- 10 Fig. 9 eine schematische Darstellung eines achten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer Aufsicht;
- Fig. 10 eine schematische Darstellung des achten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer schematischen Seitenansicht;
- 15 Fig. 11 eine schematische Darstellung eines neunten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer Aufsicht;
- Fig. 12 eine schematische Darstellung des neunten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer schematischen Seitenansicht;
- 20 Fig. 13 eine schematische Darstellung eines zehnten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer Aufsicht;
- Fig. 14 eine schematische Darstellung des zehnten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer schematischen Seitenansicht;
- 25 Fig. 15 eine schematische Darstellung eines elften Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer räumlichen Schrägansicht;
- Fig. 16 eine schematische Darstellung eines zwölften Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer räumlichen
- 30 Schrägansicht;
- Fig. 17 eine schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels eines Ausführungsbeispiels einer Frequenzdiskriminatorerkennung für den magnetoelektrischen  $\mu$ w-Resonator und

Fig. 18 eine schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels des magnetoelektrischen  $\mu$ w-Resonatorsystems in einem Blockschaltbild.

5 An dieser Stelle soll nochmals darauf hingewiesen werden, dass die hier dargestellten Ausführungsbeispiele die Erfindung nur erläutern und nicht in Ihrem Schutzbereich beschränken sollen.

Zum Verständnis der Erfindung wird auf die Bezugszeichenliste verwiesen, aus der die einzelnen Elemente und Merkmale, die in den Figuren beschrieben und dargestellt werden, entsprechend entnehmbar sind.

10 In Fig. 1 ist eine schematische Darstellung eines ersten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer Aufsicht dargestellt.

Der Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensor 1 umfasst eine Grundplatte 11 und einen daran über einen Cantilever-Abstütz-/Lager-/Einspannpunkt 111 angeordneten Cantilever 13, der eine magnetostruktive Schicht 12 aufweist. Der Cantilever 13 mit der magnetostruktiven Schicht 12 bilden zusammen einen mechanischen Schwinger 12 + 13, wobei dieser einseitig gelagert auf  
15 der Grundplatte 11 befestigt ist.

Hierbei sind in der Grundplatte 11 eine Einkopplung 161 und eine Auskopplung 162 für Mikrowellen vorgesehen.

Ferner ist noch eine Abstimmerschraube 17 in der Grundplatte 11 vorgesehen.

20 Die Grundplatte 11 und der als Mikrowellen-Resonator ausgebildete mechanische Schwinger 12 + 13 sind wenigstens teilweise elektrisch leitfähig ausgebildet und miteinander elektrisch leitfähig verbunden.

Das Mikrowellen-Signal kann beispielsweise kapazitiv mit Standard-SMA-Steckverbindungen über die Einkopplung 161 eingekoppelt werden, wobei der entsprechende Innenleiter über die  
25 Oberfläche der Grundplatte 11 hinausragen kann und dessen überstehende Länge die Kopplungsstärke beeinflusst.

Die Grundplatte 11 kann beispielsweise aus Kupfer gefertigt sein.

Zur Herstellung einer durchgängigen elektrischen Verbindung können insbesondere elektrisch leitfähige Kleber verwendet werden, um den mechanischen Schwinger 12 + 13 in dem  
30 Cantilever-Abstütz-/Lager-/Einspannpunkt 111 zu befestigen.

Die vorgesehene Abstimmerschraube 17 wird bevorzugt in der Nähe des maximalen elektrischen Feldes des Resonators positioniert, wobei je kleiner der Abstand zwischen Abstimmerschraube 17 und mechanischen Schwinger 12 + 13 ist, desto geringer ist die Resonanz-Frequenz des

Resonators und umso höher der gemessene Q-Faktor. Die Abstimmerschraube 17 kann manuell auf den nächstgelegenen Abstand zum mechanischen Schwinger 12 + 13 eingestellt werden, wobei der Stromkreis nicht kurzgeschlossen werden darf.

5 Als mögliche Materialien des mechanischen Schwingers 12 + 13 können Si-Freischwinger verwendet werden, die beispielsweise vollständig mit Ta und verschiedenen Au-Dicken beschichtet sein können.

Insbesondere kann der Cantilever 13 vollständig mit einem leitfähigen Material wie Gold bedeckt sein, wobei dessen Dicke größer als die Leitschichtdicke (Skin-Effekt) sein kann.

10 An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Position der  $\mu$ w-Kopplung frei gewählt werden kann.

Fig. 2 zeigt eine schematische Darstellung des ersten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 aus Fig. 1 in einem Schnitt bzw. schematischen Seitenansicht.

15 Fig. 3 zeigt eine schematische Darstellung eines zweiten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer räumlichen Schrägansicht.

Hierbei ist der mechanische Schwinger 12 + 13 zweiseitig auf der Grundplatte 11 gelagert.

Die entsprechende transversale Oszillation  $T_0$  ist ebenso dargestellt. Ebenso sind die entsprechenden elektrischen Felder / E-Feld E und magnetischen Felder / H-Feld H dargestellt.

20 Es ist quasi ein magnetoelektrischer Resonator mit Mikrowellenstreifenleitung ausgebildet.

In Fig. 4 ist eine schematische Darstellung eines dritten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer schematischen Seitenansicht gezeigt.

25 Hierbei ist eine beidseitige Lagerung des mechanischen Schwingers 12 + 13 auf der Grundplatte 11 vorgesehen. In der Mitte ist die entsprechende Abstimmerschraube 17 angeordnet.

Ferner sind die E-Felder und H-Felder dargestellt.

30 Fig. 5 zeigt eine schematische Darstellung eines vierten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer schematischen Seitenansicht.

Hierbei ist ebenfalls eine beidseitige Lagerung des mechanischen Schwingers 12 + 13 auf der Grundplatte 11 vorgesehen. In der Mitte ist alternativ zur Abstimmerschraube 17 eine einstellbare Reaktanz 171 angeordnet.

In Fig. 6 wird eine schematische Darstellung eines fünften Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer schematischen Seitenansicht gezeigt.

Hierbei ist eine mittige Lagerung des mechanischen Schwingers 12 + 13 vorgesehen, wobei im Außenbereich des Cantilevers 13 eine kapazitive Ein- 161 bzw. Auskopplung 162 für Mikrowellen vorgesehen ist.

Die entsprechenden E-Felder und H-Felder sind dazugehörig dargestellt.

Fig. 7 zeigt eine schematische Darstellung eines sechsten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer schematischen Seitenansicht.

Hierbei sind zwei mechanische Schwinger 12 + 13 mit zueinander ausgerichteten magnetostriktiven Schichten 12 auf der jeweiligen Cantilever-Oberfläche 13 dargestellt, wobei diese über eine Cantilever-Beabstandung 131 zueinander derart beabstandet sind, dass diese frei schwingen können und sich dabei nicht berühren.

Hierdurch werden Gleichtaktstörungen unterdrückbar, da quasi eine Stimmgabelsensorik ausgebildet ist.

Fig. 8 zeigt eine schematische Darstellung eines siebten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer räumlichen Schrägansicht.

Hierbei handelt es sich um eine im Vergleich zu Fig. 7 um 90° gedrehte Stimmgabelresonatoranordnung mit Mikrowellenbandleitung.

Fig. 9 erläutert eine schematische Darstellung eines achten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer Aufsicht.

Hierbei ist eine erste Ausführungsform eines miniaturisierten Mikrowellenresonators 1 dargestellt. Es handelt sich um einen einseitig gelagerten Cantilever 13 mit magnetostriktiver Schicht 12, der an einer Grundplatte 11 in einem Cantilever- Abstütz-/Lager-/Einspannpunkt 111 angeordnet ist.

Es sind entsprechende Mittel zur Einkopplung 161 und Auskopplung 162 vorgesehen. Ferner ist ein entsprechender Mikrowellenresonator in Mikrostreifenleitertechnik 15 vorgesehen. Eine mögliche Realisierung ist hierbei in Form eines Split-Ring Resonators gegeben.

In Fig. 10 ist eine schematische Darstellung des achten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer schematischen Seitenansicht gezeigt.



Fig. 11 zeigt eine schematische Darstellung eines neunten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer Aufsicht.

Hierbei ist ergänzend ein Piezo-Transducer 14 auf dem Cantilever 13 vorgesehen, wobei dieser gerade nicht zum Auslesen verwendet wird, sondern ausschließlich zum Anregen des als  
5 Mikrowellen-Resonator ausgebildeten mechanischen Schwingers 12 + 13 dient, so dass der Cantilever 13 in Schwingungen versetzt wird. Mögliche Ausbildungsformen für den Piezo-Transducer 14 umfassen unter anderen IDT Elektroden und Plattenkondensator Elektroden.

Fig. 12 zeigt eine schematische Darstellung des neunten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer schematischen  
10 Seitenansicht.

In Fig. 13 ist eine schematische Darstellung eines zehnten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer Aufsicht gezeigt.

Hierbei ist ein Ferrit-Element 18 auf der Unterseite des Cantilevers 13 angeordnet.

Fig. 14 zeigt eine schematische Darstellung des zehnten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer schematischen  
15 Seitenansicht.

Fig. 15 zeigt eine schematische Darstellung eines elften Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer räumlichen Schrägansicht.

20 Hierbei ist ein kontaktloses Auslesen gezeigt, bei dem eine Auslesevorrichtung 19 mit einer Antenne entsprechend auf den Mikrowellenresonator 1 gerichtet ist. Hierbei ist der Mikrowellenresonator 1 als modulierter Streukörper ausgebildet.

Durch unterschiedliche Mikrowellenresonanzfrequenzen einzelner Mikrowellenresonatoren 1 können eine Vielzahl von Mikrowellenresonatoren 1 unterschieden werden.

25 In Fig. 16 ist eine schematische Darstellung eines zwölften Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensors 1 in einer räumlichen Schrägansicht dargestellt.

Ergänzend zu Fig. 15 ist in diesem Beispiel ein magnetostriktiver Schwinger 12 + 13 mit einem zusätzlichen Piezo-Transducer 14 ausgestattet, wobei zusätzlich zu dessen Ansteuerung ein  
30 Dipol für pulsmodierte Mikrowellen  $f_{\text{mod}}$  22 sowie ein Hüllkurvengleichrichter 23 vorgesehen sind, so dass über eine zusätzliche Antenne 21 eine Einstrahlung einer pulsmodulierten Mikrowelle  $f_{\text{mod}}$  zur Schwingungsanregung vorgesehen ist.

Fig. 17 zeigt eine schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels eines Ausführungsbeispiels einer Frequenzdiskriminatorerkennung für den magnetoelektrischen  $\mu\text{w}$ -Resonator 1. Systemrauschenquellen sind durch gestrichelte Kästchen dargestellt. Umgebungslärmquellen sind mit gestrichelten Kästchen gekennzeichnet.

- 5 Das Sensorsignal 47 moduliert die  $\mu\text{w}$ -Resonanz des Resonators 1, angezeigt durch den Steuerpfeil. Abhängig von der eingestellten  $\mu\text{w}$ -Signalfrequenz werden Phase und Amplitude der Mikrowelle moduliert, die als Seitenbänder im Ausgangsspektrum zu sehen sind.

Fig. 18 stellt eine schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels des magnetoelektrischen  $\mu\text{w}$ -Resonatorsystems 1 in einem Blockschaltbild dar.

- 10 Für dieses Erkennungsschema wird das  $\mu\text{w}$ -Auslesesignal durch einen 3-dB-Leistungsteiler 44 in einen Sensor 45 und einen Referenzpfad 46 unterteilt. Es wird eine statische Phasenverschiebung  $\varphi_{\text{ME}}$  ohne angelegtes Signal  $B_s$  eingeführt. Im Referenzpfad 46 fügt ein in den Signalpfad eingefügter Phasenschieber 48 eine eingestellte Phase  $\varphi_{\text{PS}}$  ein, wobei dieser die Einstellung der relativen Phasendifferenz  $\Delta\varphi_{\text{FD}} = \varphi_{\text{ME}} - \varphi_{\text{PS}}$  am Phasendiskriminator ohne  
15 angelegtes Magnetsignal  $B_s$  ermöglicht.

## Bezugszeichenliste

	1	Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung Mikrowellenresonator-Magnetfeldsensor, kurz auch $\mu$ W-Sensor
5	11	Grundplatte
	111	Cantilever- Abstütz-/Lager-/Einspannpunkt
	12	magnetostriktive Schicht
	13	Cantilever
	131	Cantilever-Beabstandung
10	14	Piezo-Transducer
	15	Split-Ring Resonator
	161	Einkopplung
	162	Auskopplung
	17	Abstimmerschraube
15	171	einstellbare Reaktanz
	18	Ferrit
	19	Auslesevorrichtung, Antenne
	21	Einstrahlantenne
	22	Dipol für pulsmodierte Mikrowelle fmod
20	23	Hüllkurvengleichrichter
	30	Magnetisches Umgebungsrauschen
	31	Magnetisches Signal
	32	Magnetischer Bias
	33	Magnetisches Rauschen
25	34	Magnetostriktion
	35	Thermischmechanisches Rauschen
	36	Mechanische Kopplung
	37	Akustisches Rauschen
	38	Mechanische Resonanz
30	39	HF-Resonanz / $\mu$ w-Resonanz
	40	HF-Signal / $\mu$ w-Resonanz
	41	Rauschen Signalverarbeitung
	42	Analoge Signalverarbeitung
	43	Phasenrauschen
35	44	3 dB Teiler
	45	Sensor Zweig
	46	Referenz Zweig

47	Sensorsignal
48	Phasenschieber
49	Rauschen Spektrumanalysator
50	Spektrumanalysator
5	E E-Feld
	H H-Feld
	f Frequenz
	T <sub>o</sub> Transversale Oszillation
	L <sub>o</sub> Longitudinale Oszillation

10

## A N S P R Ü C H E

1. Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung (1) zur Messung von magnetischen Wechselfeldern umfassend:
- 5 - eine Grundplatte (11) mit wenigstens einem Abstütz-/Lager-/Einspannpunkt (111);
- wenigstens einen als Mikrowellen-Resonator ausgebildeten mechanischen Schwinger (12 + 13) in Form eines Cantilevers (13) mit wenigstens einer magnetostriktiven Schicht (12), wobei dieser wenigstens an einer Stelle mit der Grundplatte (11) in dem wenigstens einen Abstütz-/Lager-/Einspannpunkt (111) verbunden und gelagert ist;
- 10 - wenigstens eine Einkopplung (161) für Mikrowellen und
- wenigstens eine Auskopplung (162) für Mikrowellen wobei die Grundplatte (11) und der als Mikrowellen-Resonator ausgebildete mechanische Schwinger (12 + 13) wenigstens teilweise elektrisch leitfähig ausgebildet und miteinander
- 15 elektrisch leitfähig verbunden sind.
2. Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung (1) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung (1) Piezoschicht-frei auslesbar ist.
3. Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung (1) nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Einkopplung (161) für Mikrowellen und/oder die Auskopplung (162) für Mikrowellen kapazitiv oder induktiv ausgebildet ist.
- 20
4. Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung (1) nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** in der Grundplatte (11) eine Abstimmerschraube (17) und/oder eine einstellbare Reaktanz (171) und/oder eine Geometrieverstellung zur Verstimmung des als Mikrowellen-Resonator ausgebildeten mechanischen Schwingers (12 + 13) vorgesehen ist.
- 25

5. Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung (1) nach einem der vorangehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet, dass**  
der als Mikrowellen-Resonator ausgebildete mechanische Schwinger (12 + 13):  
5 - in genau einem Punkt (111) an einem der Enden oder in der Mitte  
oder  
- in genau zwei Punkten (111), dem ersten und dem zweiten Ende  
des als Mikrowellen-Resonator ausgebildeten mechanischen Schwingers (12 + 13)  
gelagert ist.
- 10 6. Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung (1) nach einem der vorangehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet, dass**  
die Länge des mit einer leitfähigen Schicht versehenen Abschnitts des Cantilevers (13)  
 $\lambda_{\mu W}/2$  oder  $\lambda_{\mu W}/4$  beträgt, wobei die magnetostriktive Schicht unterhalb der leitfähigen  
15 Schicht über die volle oder auch nur einen Teil der Länge aufgebracht ist.
7. Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung (1) nach einem der vorangehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet, dass**  
die Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung (1) als Hohlraumresonator  
20 ausgebildet ist.
8. Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung (1) nach einem der vorangehenden Ansprüche 1 bis 5,  
**dadurch gekennzeichnet, dass**  
die magnetostriktive Schicht (12) in Dünnschichttechnologie auf dem Cantilever (13)  
25 aufgebracht ist  
oder  
die magnetostriktive Schicht (12) selbst als Cantilever (13) ausgebildet ist.
9. Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung (1) nach einem der vorangehenden Ansprüche,  
30 **dadurch gekennzeichnet, dass**  
die Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung (1) Piezoschicht-frei ausgebildet ist,  
wobei sich diese Piezoschicht-Freiheit auf die Signalauskoppelbarkeit bezieht.

10. Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung (1) nach einem der vorangehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet, dass**  
die Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung (1) kontaktlos auslesbar und/oder  
5 fernauslesbar ist.
11. Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung (1) nach einem der vorangehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet, dass**  
der als Mikrowellen-Resonator ausgebildete mechanische Schwinger (12 + 13) über ein  
10 Piezo-Transducer-Element (14) elektrisch anregbar ist.
12. Magnetfeldmessverfahren mit einer Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung (1)  
nach einem der vorangehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet, dass**  
die Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung (1) in Mikrowellen-Resonanz  
15 betrieben wird.
13. Magnetfeldmessverfahren nach dem vorangehenden Anspruch,  
**dadurch gekennzeichnet, dass**  
die Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung (1) in doppelter Resonanz  
betrieben wird, wobei dies in Mikrowellen-Resonanz und in mechanischer Resonanz  
20 erfolgt, wobei hierbei ein Verstimmen des Mikrowellen-Resonators durch den zugleich in  
mechanischer Resonanz schwingenden mechanischen Schwinger (12 + 13) erfolgt.
14. Magnetfeldmessverfahren mit einer Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung (1)  
nach einem der vorangehenden Ansprüche 1 bis 11 oder nach den beiden  
vorangehenden Ansprüchen,  
25 **dadurch gekennzeichnet, dass**  
ein Fernauslesen des / der Mikrowellenresonator-Magnetfeldmessvorrichtung (1) erfolgt,  
wobei die Schwingung des als Mikrowellen-Resonator ausgebildeten mechanischen  
Schwingers (12 + 13) ohne eigene Energieversorgung durch ein Einstrahlen von gepulster  
oder intensitätsmodulierter elektromagnetischer Strahlung hoher Energie angeregt wird  
30 und ein Auslesen dessen Reaktion / Antwort über Mikrowellenstrahlung erfolgt.

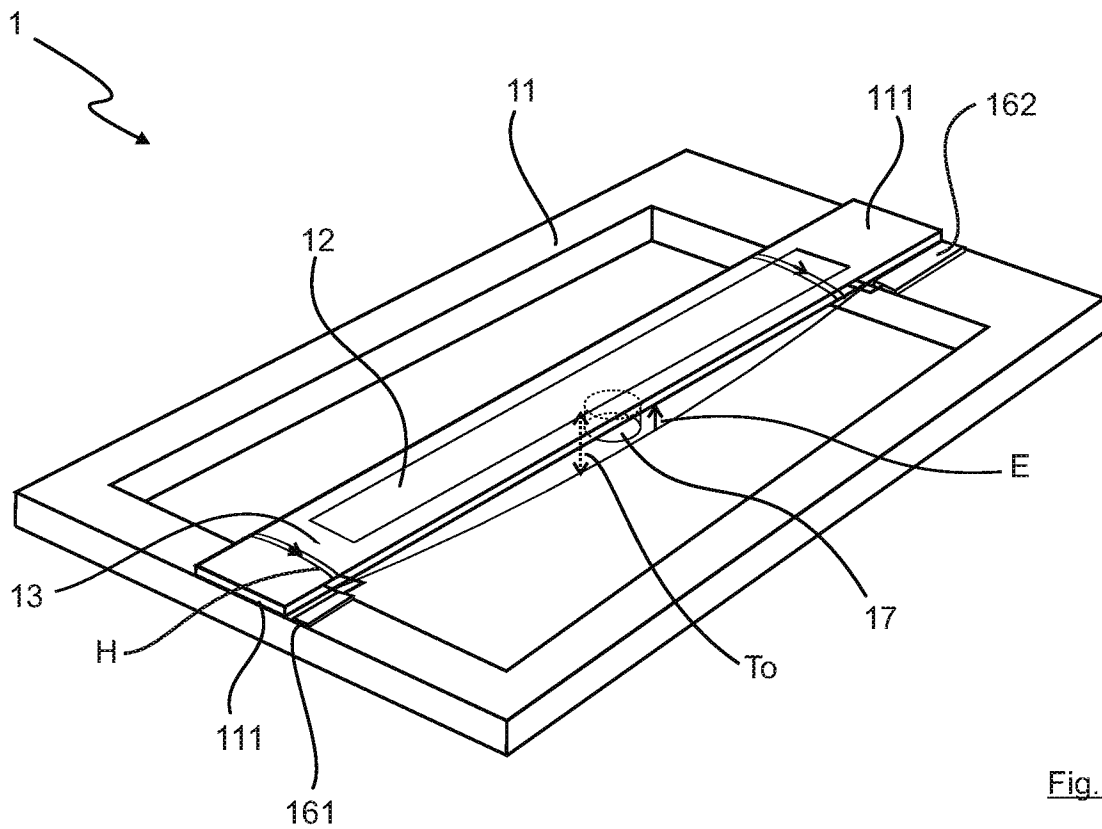
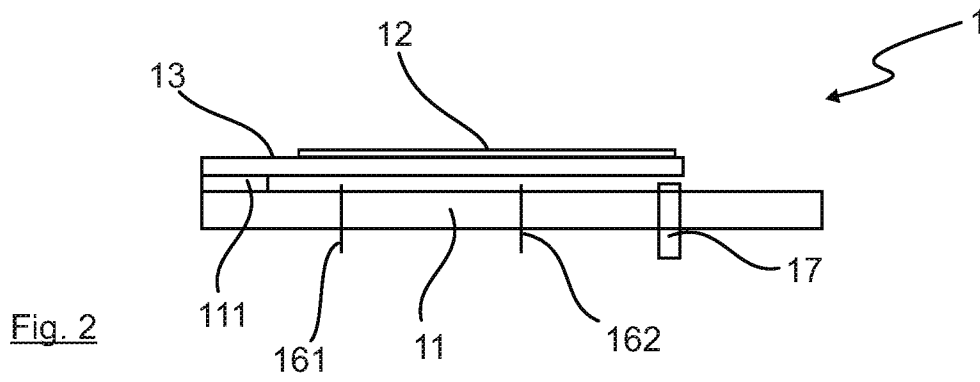
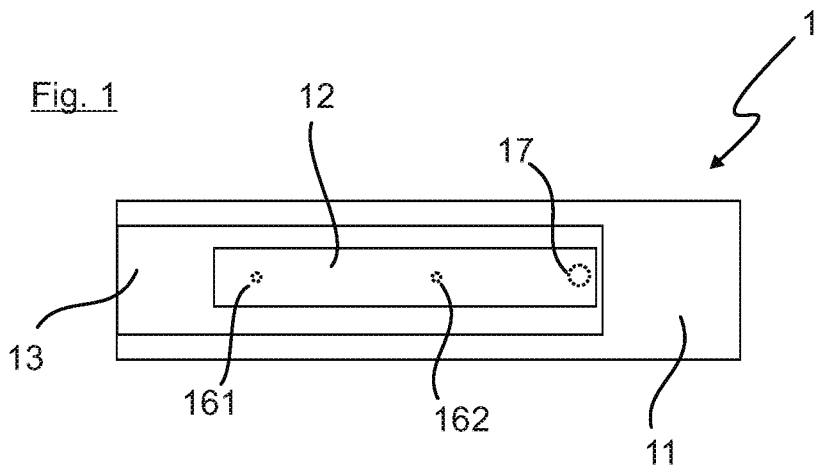




Fig. 4

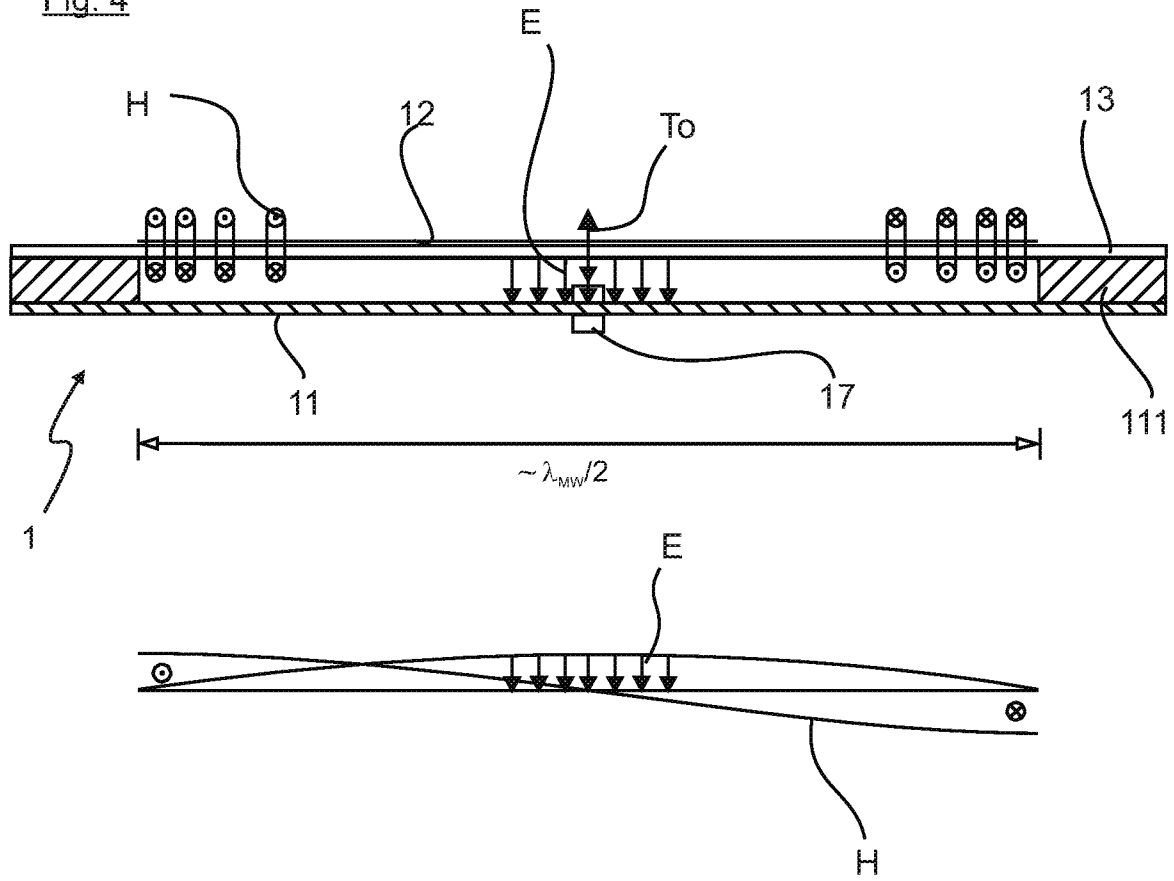


Fig. 5

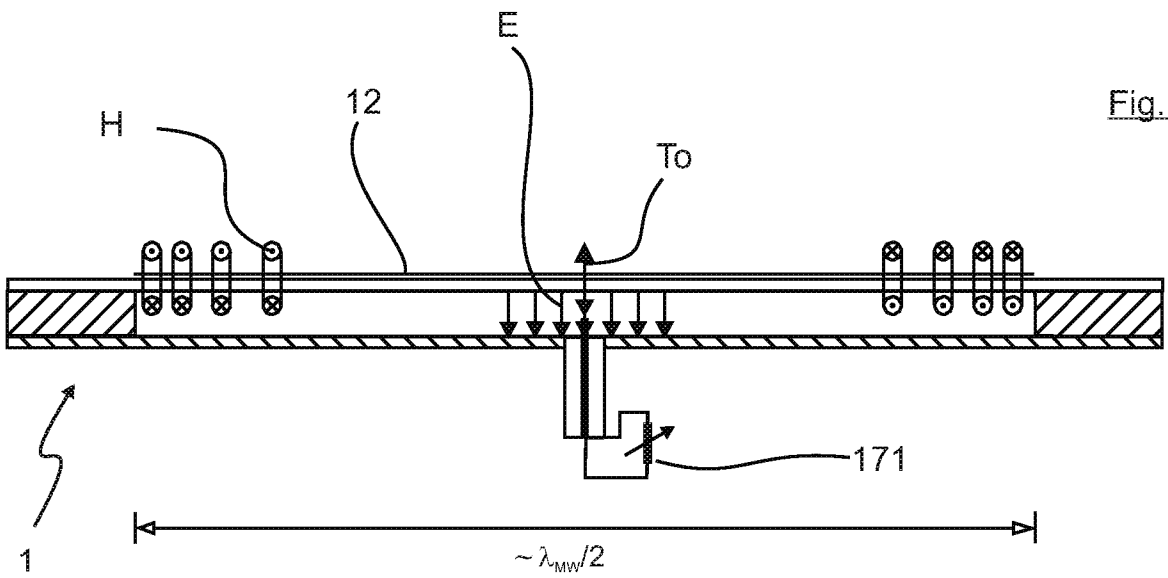


Fig. 6

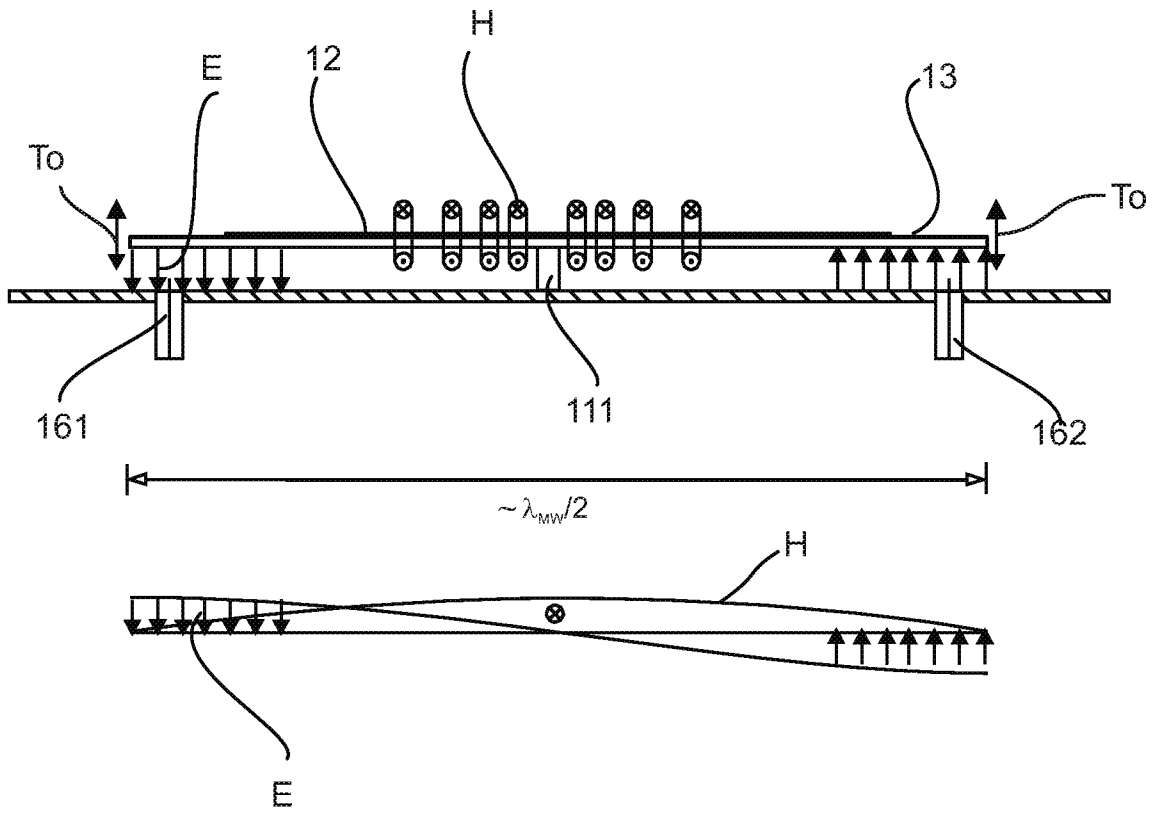


Fig. 7

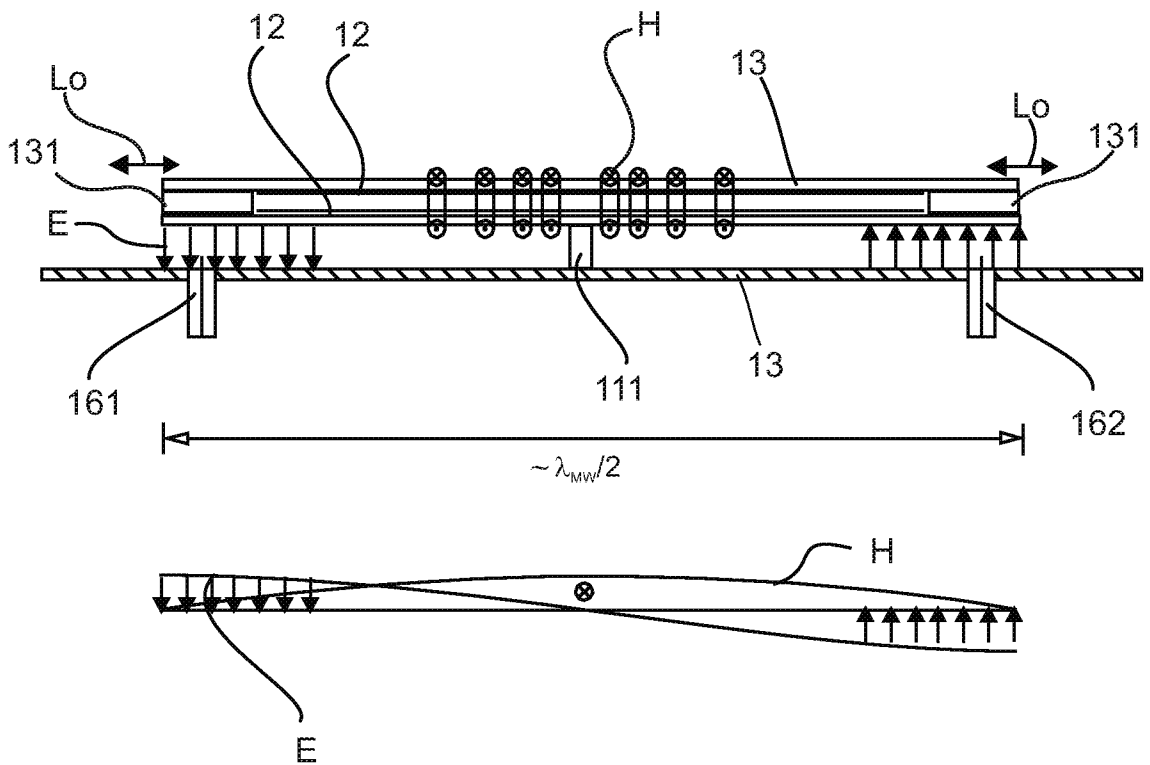


Fig. 8

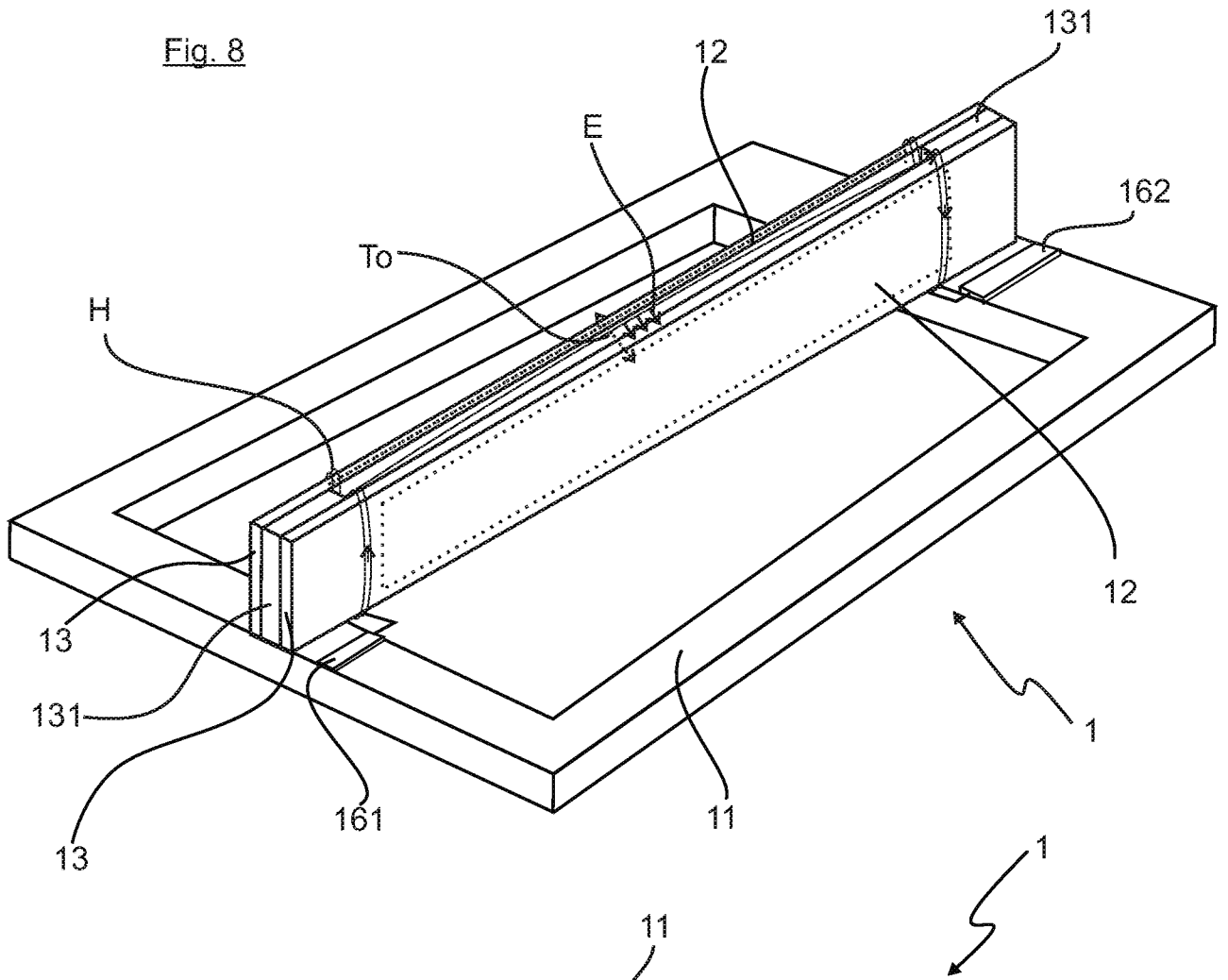


Fig. 9

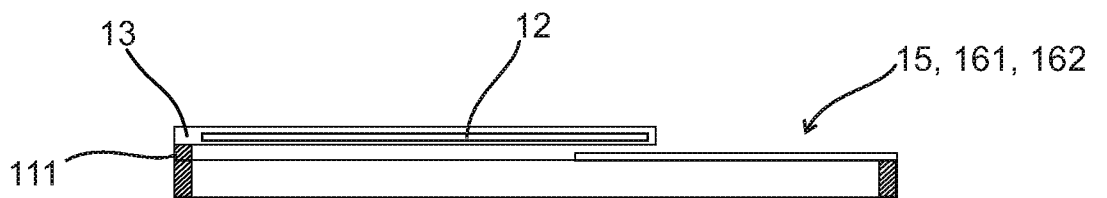
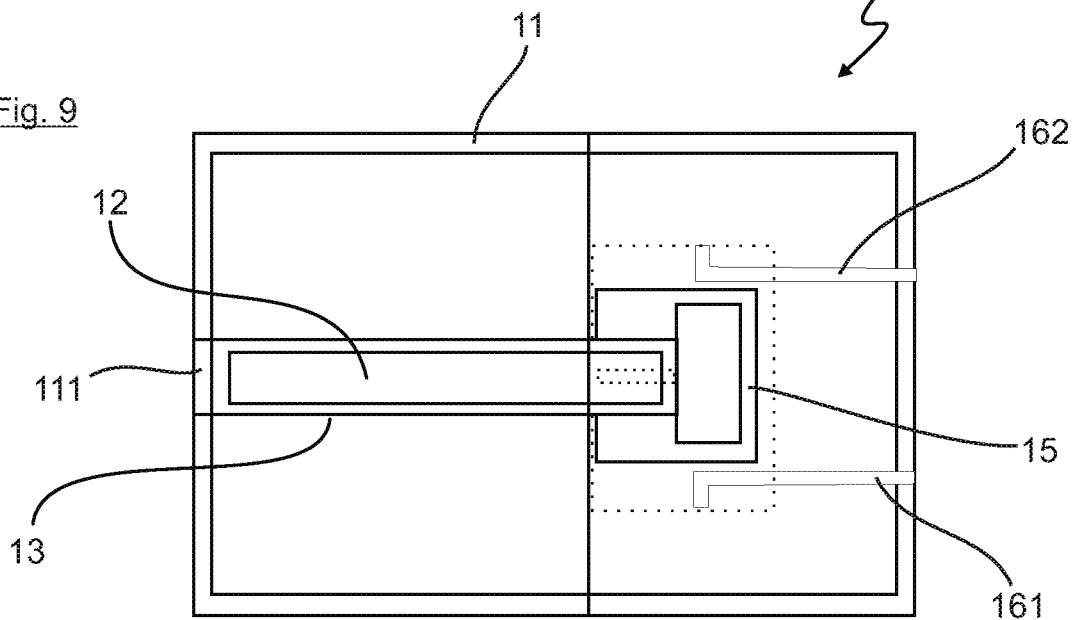


Fig. 10

Fig. 11

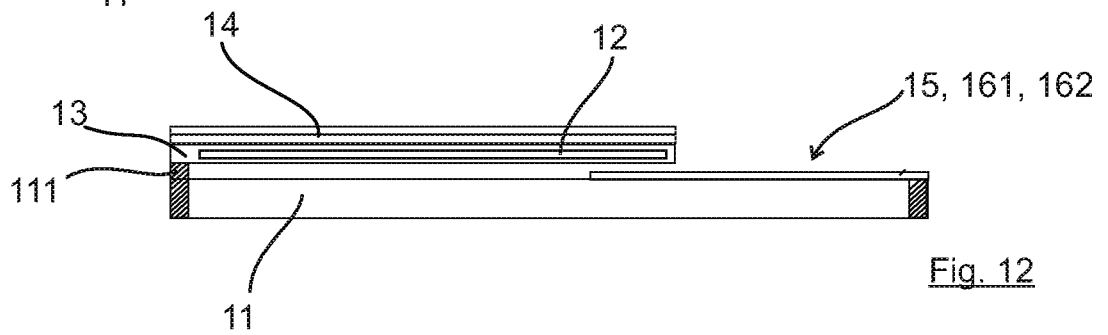
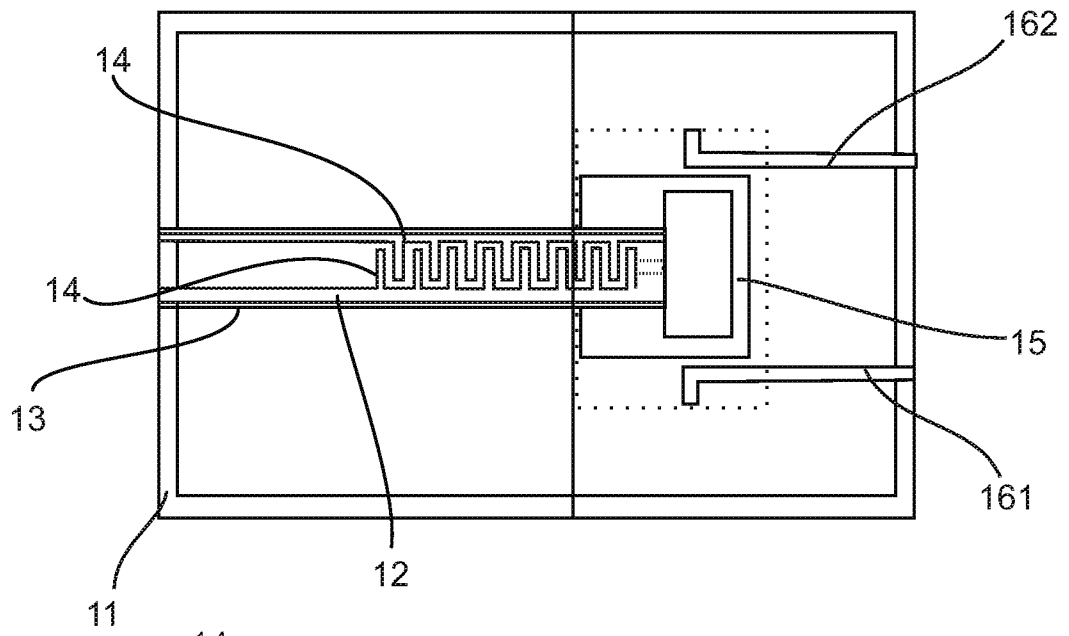


Fig. 12

Fig. 13

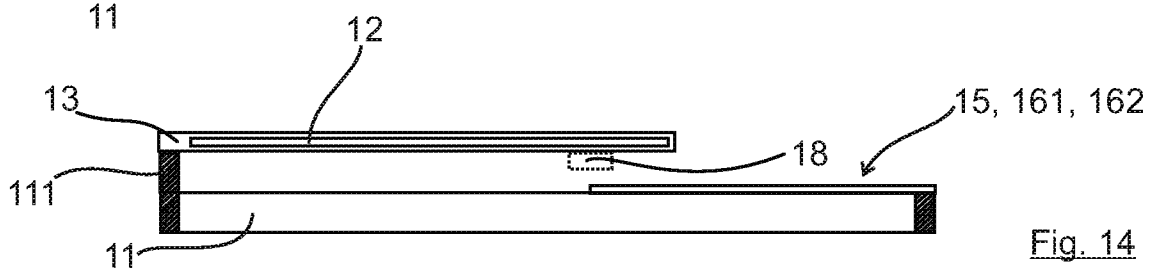
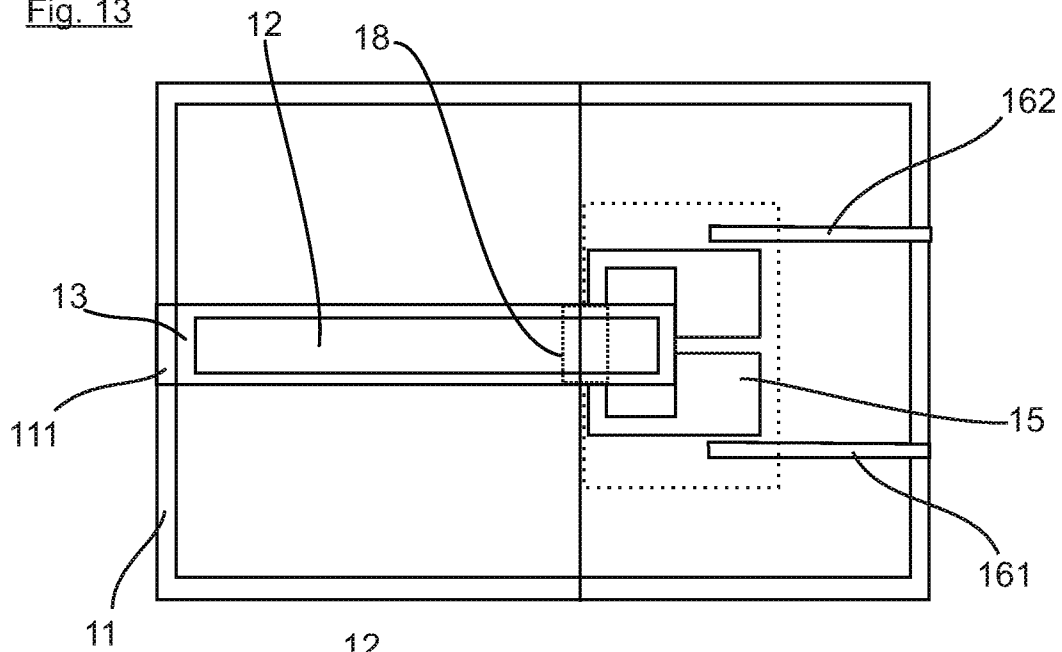


Fig. 14

Fig. 15

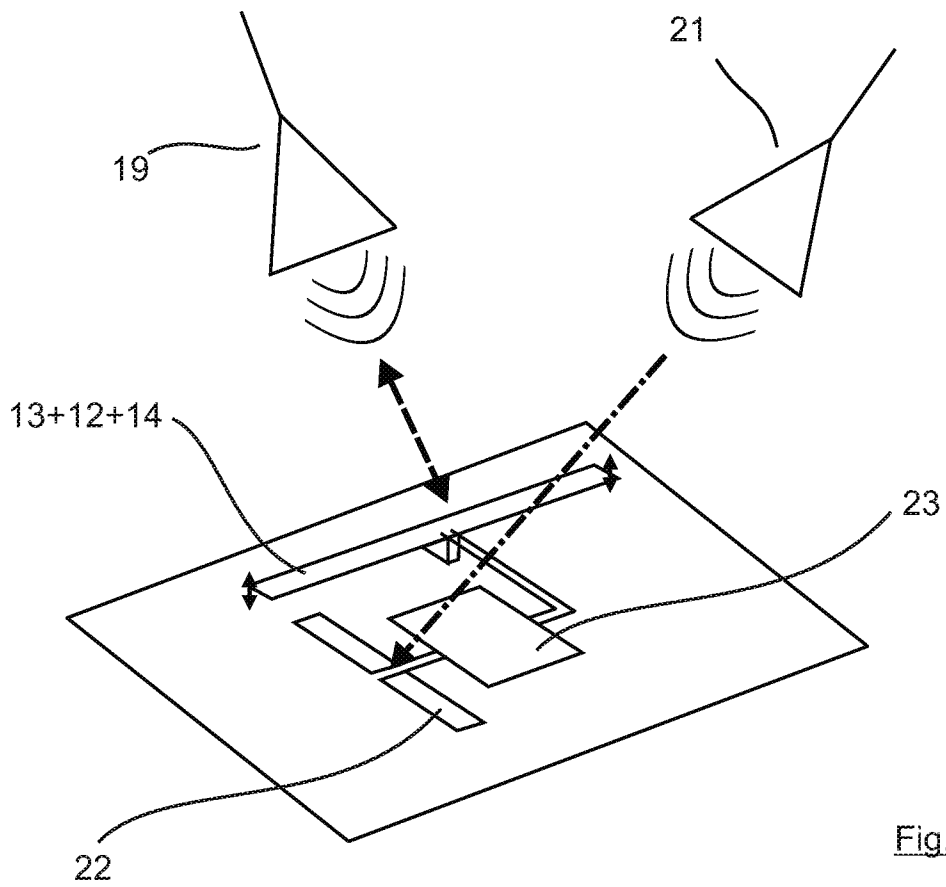
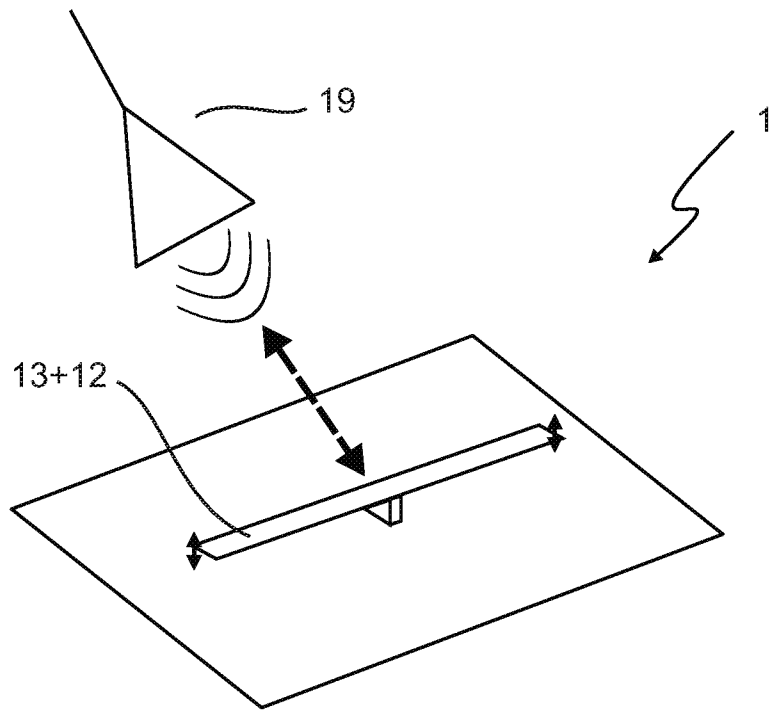


Fig. 16

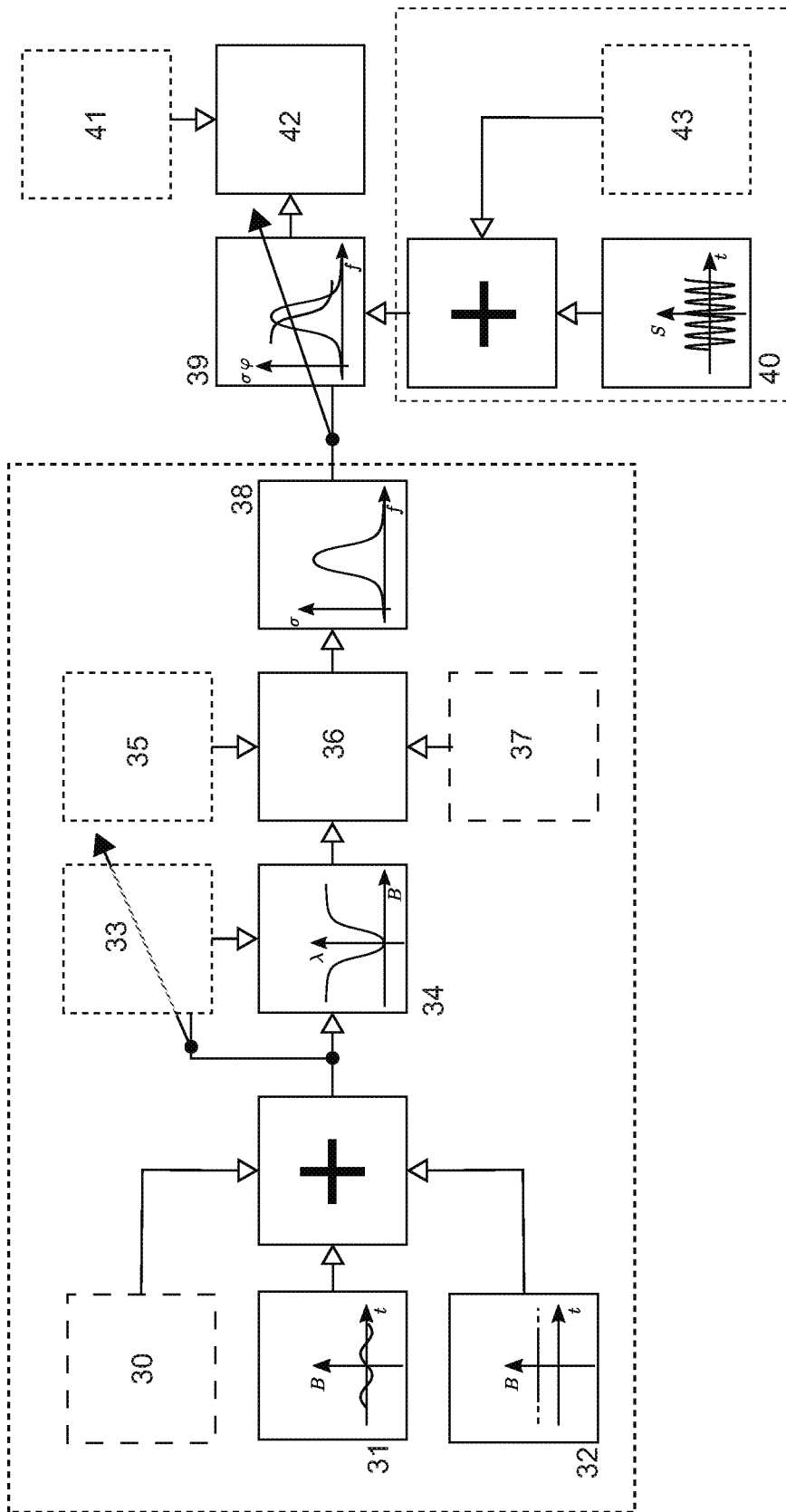


Fig. 17

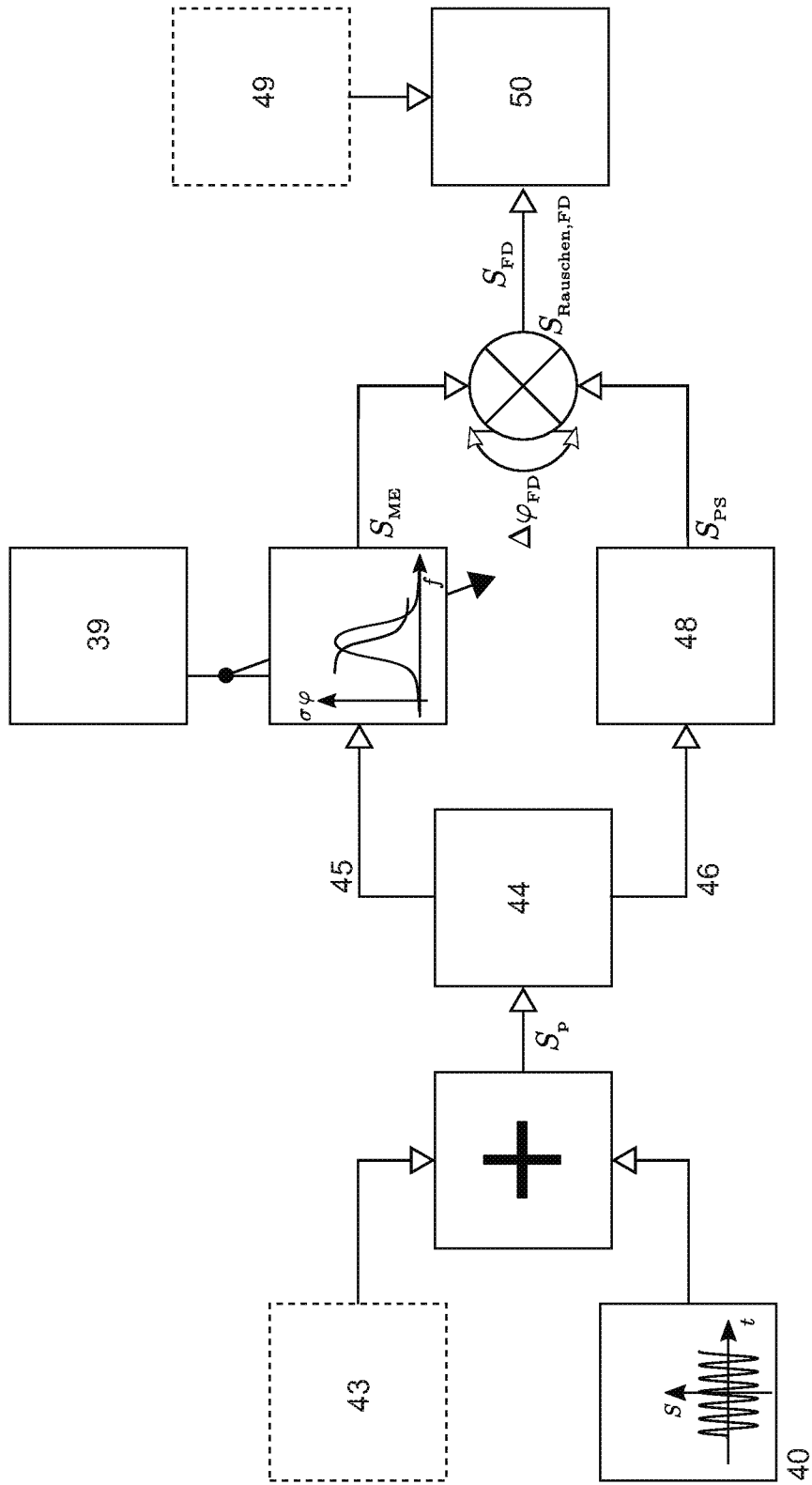


Fig. 18

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

**PCT/DE2019/100286**

<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b>		
<b>G01R 33/02</b> (2006.01)i; <b>G01R 33/18</b> (2006.01)i; <b>G01R 33/028</b> (2006.01)i; <b>H01L 41/12</b> (2006.01)n; <b>H01P 7/00</b> (2006.01)n		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
<b>B. FIELDS SEARCHED</b>		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G01R; H02N; H01P; H01L; G01B		
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		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	WO 2017210373 A1 (UNIV NORTHEASTERN [US]) 07 December 2017 (2017-12-07) pages 11, 12, 14, 15, 20; all figures	1,3,5,8,12,13 2-4,6,7,9-11,14
Y	US 9454061 B1 (ABDO BALEEGH [US] ET AL) 27 September 2016 (2016-09-27) all figures; columns 4-6	2-4,6,7,9
Y	WO 2010088011 A1 (GEN ELECTRIC [US]; SEXTON DANIEL WHITE [US] ET AL.) 05 August 2010 (2010-08-05) all figures; pages 3, 4	10
Y	US 2014145244 A1 (DANEMAN MICHAEL J [US] ET AL) 29 May 2014 (2014-05-29) all figures; paragraph [0026]	11
Y	WO 2018071993 A1 (UNIV WESTERN AUSTRALIA [AU]; VERYASKIN ALEXEY VLADIMIROVICH [AU]) 26 April 2018 (2018-04-26) all figures; paragraphs [0129], [0134], [0151] - [0154], [0164], [0165]	14
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search <b>03 June 2019</b>		Date of mailing of the international search report <b>28 June 2019</b>
Name and mailing address of the ISA/EP <b>European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands</b> Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer <b>Schwarz, Cornelia</b>  Telephone No.



**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
**Information on patent family members**

International application No.

**PCT/DE2019/100286**

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
WO	2017210373	A1	07 December 2017	NONE	
US	9454061	B1	27 September 2016	CN 108431687 A	21 August 2018
				DE 112016005783 T5	20 September 2018
				GB 2560472 A	12 September 2018
				JP 2019512161 A	09 May 2019
				US 9454061 B1	27 September 2016
				WO 2017103698 A1	22 June 2017
WO	2010088011	A1	05 August 2010	CN 102301214 A	28 December 2011
				KR 20110123730 A	15 November 2011
				SG 173051 A1	29 August 2011
				WO 2010088011 A1	05 August 2010
US	2014145244	A1	29 May 2014	US 2014145244 A1	29 May 2014
				US 2016031702 A1	04 February 2016
				US 2017297900 A1	19 October 2017
				US 2018312394 A1	01 November 2018
WO	2018071993	A1	26 April 2018	AU 2017346946 A1	06 June 2019
				CA 3041107 A1	26 April 2018
				WO 2018071993 A1	26 April 2018

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES INV. G01R33/02 G01R33/18 G01R33/028 ADD. H01L41/12 H01P7/00		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
B. RECHERCHIERTE GEBIETE		
Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole) G01R H02N H01P H01L G01B		
Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen		
Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe) EPO-Internal, WPI Data		
C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	WO 2017/210373 A1 (UNIV NORTHEASTERN [US]) 7. Dezember 2017 (2017-12-07)	1,3,5,8, 12,13
Y	Seiten 11, 12, 14, 15, 20; alle Abbildungen	2-4,6,7, 9-11,14
Y	US 9 454 061 B1 (ABDO BALEEGH [US] ET AL) 27. September 2016 (2016-09-27) alle Abbildungen; Spalten 4-6	2-4,6,7, 9
Y	WO 2010/088011 A1 (GEN ELECTRIC [US]; SEXTON DANIEL WHITE [US] ET AL.) 5. August 2010 (2010-08-05) alle Abbildungen; Seiten 3, 4	10
	----- -/-	
<input checked="" type="checkbox"/> Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen <input checked="" type="checkbox"/> 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
3. Juni 2019		28/06/2019
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  Schwarz, Cornelia

## C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
Y	US 2014/145244 A1 (DANEMAN MICHAEL J [US] ET AL) 29. Mai 2014 (2014-05-29) alle Abbildungen; Absatz [0026] -----	11
Y	WO 2018/071993 A1 (UNIV WESTERN AUSTRALIA [AU]; VERYASKIN ALEXEY VLADIMIROVICH [AU]) 26. April 2018 (2018-04-26) alle Abbildungen; Absätze [0129], [0134], [0151] - [0154], [0164], [0165] -----	14

**INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT**

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/DE2019/100286

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
WO 2017210373	A1	07-12-2017	KEINE
-----			
US 9454061	B1	27-09-2016	CN 108431687 A 21-08-2018
			DE 112016005783 T5 20-09-2018
			GB 2560472 A 12-09-2018
			JP 2019512161 A 09-05-2019
			US 9454061 B1 27-09-2016
			WO 2017103698 A1 22-06-2017
-----			
WO 2010088011	A1	05-08-2010	CN 102301214 A 28-12-2011
			KR 20110123730 A 15-11-2011
			SG 173051 A1 29-08-2011
			WO 2010088011 A1 05-08-2010
-----			
US 2014145244	A1	29-05-2014	US 2014145244 A1 29-05-2014
			US 2016031702 A1 04-02-2016
			US 2017297900 A1 19-10-2017
			US 2018312394 A1 01-11-2018
-----			
WO 2018071993	A1	26-04-2018	CA 3041107 A1 26-04-2018
			WO 2018071993 A1 26-04-2018
-----			