



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2004 053 584 B4 2006.08.31**

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2004 053 584.1**
 (22) Anmeldetag: **05.11.2004**
 (43) Offenlegungstag: **08.06.2006**
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **31.08.2006**

(51) Int Cl.⁸: **G01N 29/04 (2006.01)**
G01N 27/90 (2006.01)
G01B 17/02 (2006.01)

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 2 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
**Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
 angewandten Forschung e.V., 80686 München, DE**

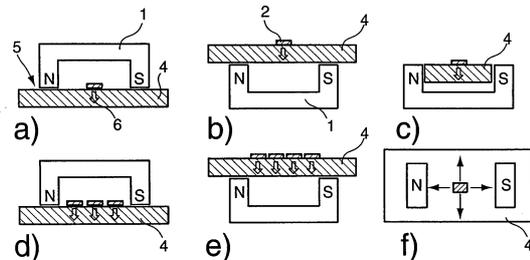
(74) Vertreter:
**Rösler, U., Dipl.-Phys.Univ., Pat.-Anw., 81241
 München**

(72) Erfinder:
**Kröning, Michael, Prof. Dr. rer. nat., 66123
 Saarbrücken, DE; Nichiforencu, Jorj, Dipl.-Ing.,
 66125 Saarbrücken, DE; Boulavinov, Andrei,
 Dipl.-Ing., 66125 Saarbrücken, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
 gezogene Druckschriften:
DE 195 43 481 A1
DE 35 11 676 A1
EP 07 81 994 A2
WO 04/0 07 138 A1
WO 97/05 469 A2
**M. Gori et al. "EMAT transducers and thickness
 characterization..", Ultrasonics 34, 1996, S.339-
 342;**

(54) Bezeichnung: **Vorrichtung und Verfahren zur Materialprüfung und/oder Dickenmessung an einem wenigstens elektrisch leitende und ferromagnetische Materialanteile aufweisenden Prüfobjekt**

(57) Hauptanspruch: Vorrichtung zur Materialprüfung an einem wenigstens elektrisch leitende und ferromagnetische Materialanteile aufweisenden Prüfobjekt (4), das über wenigstens eine technische Oberfläche (5) verfügt, mit wenigstens einer elektromagnetischen Ultraschallwandleranordnung (EMUS), die eine Permanent- oder Elektromagnetanordnung (1) mit wenigstens zwei der technischen Oberfläche (5) zugewandt angeordneten Magnetpolen (N, S) unterschiedlicher magnetischer Polarität aufweist, sowie wenigstens eine in Projektion auf die technische Oberfläche (5) zwischen beiden Magnetpolen (N, S) mittel- oder unmittelbar relativ zur technischen Oberfläche (5) angeordnete Wirbelstromspule (2) vorsieht, dadurch gekennzeichnet, dass die wenigstens eine Wirbelstromspule (2) derart ausgebildet und angeordnet ist, dass durch Versorgen der Wirbelstromspule (2) mit Wechselstrom freie, sich im Wesentlichen senkrecht zur technischen Oberfläche (5) innerhalb des Prüfobjektes (4) ausbreitende Ultraschallwellen (2) entstehen.



Beschreibung

Technisches Gebiet

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf eine Vorrichtung sowie ein Verfahren zur Materialprüfung an einem wenigstens elektrisch leitende und ferromagnetische Materialanteile aufweisenden Prüfobjekt, das über wenigstens eine technische Oberfläche verfügt, mit wenigstens einer elektromagnetischen Ultraschallwandleranordnung (EMUS), die eine Permanent- oder Elektromagnetanordnung mit wenigstens zwei der technischen Oberfläche zugewandt angeordneten Magnetpolen unterschiedlicher magnetischer Polarität aufweist, sowie wenigstens eine in Projektion auf die technische Oberfläche zwischen beiden Magnetpolen mittel- oder unmittelbar relativ zur technischen Oberfläche angeordnete Wirbelstromspule vorsieht.

Stand der Technik

[0002] Elektromagnetische Ultraschallwandler werden in an sich bekannter Weise zu Zwecken der zerstörungsfreien Materialprüfung und Vermessung von aus elektrisch leitenden Materialien bestehenden Prüfkörpern, die vorzugsweise zudem über ferromagnetische Eigenschaften verfügen, herangezogen.

[0003] Grundsätzlich können zwei Typen von elektromagnetischen Ultraschallwandler unterschieden werden, einerseits jene, mit denen die Erzeugung so genannter horizontal polarisierter Scherwellen möglich ist, die sich vorwiegend parallel zur Einkoppelfläche innerhalb des Prüfkörpers auszubreiten vermögen, und andererseits US-Wandler zur Erzeugung so genannter sich frei im Probenkörper ausbreitenden Ultraschallwellen, die sich vorzugsweise senkrecht zur Einkoppelfläche innerhalb des Probenkörpers ausbreiten. In beiden Fällen ist die Anregung von Ultraschallwellen innerhalb eines Prüfkörpers auf das Auftreten von Magnetostriktion sowie von Lorenzkraften innerhalb des Prüfkörpermaterials zurückzuführen, die durch die Präsenz eines zeitlich weitgehend konstanten Magnetfeldes in Überlagerung mit einem durch einen elektrischen Wechselstrom hervorgerufenen elektromagnetischen Wechselfeld erzeugbar sind.

Stand der Technik

[0004] Ein typischer Aufbau zur Anregung von Ultraschallwellen nach dem so genannten

[0005] EMUS-Prinzip ist aus der Fig. 5a, b zu entnehmen. Gängige EMUS-Wandler **3** weisen einen Permanentmagnet **1** sowie eine Wirbelstromspule **2** auf, die zur gemeinsamen Handhabung als Einheit ausgebildet sind. Typischerweise ist die Wirbelstromspule **2** als Rechteck- oder Spiralfachspule ausgebil-

det und an einer Magnetpolseite des Permanentmagneten **1** angebracht, so dass die Spule **2** senkrecht von einem Permanentmagnetfeld durchsetzt wird. Wird der vorbezeichnete EMUS-Wandler **3** auf ein elektrisch leitendes, ferromagnetisches Prüfobjekt **4** aufgesetzt, so überlagern sich das Permanentmagnetfeld mit einem durch die Wirbelstromspule hervorgerufenen Wirbelstromfeld innerhalb des Prüferkörpers, wodurch sich einerseits aufgrund der Überlagerung der Magnetfeldkomponenten des Wirbelstromfeldes mit dem senkrecht durch die Oberfläche des Prüfobjektes eintretenden Permanentmagnetfeldes magnetostriktive Effekte hervorgerufen werden, andererseits durch die in das Prüfobjekt induzierten Wirbelströme Lorenzkraften generiert werden, wodurch letztlich normal zur Prüfobjektoberfläche auftretende Druckwellen als auch radial polarisierte Scherwellen erzeugt werden, die sich in Form von Ultraschallwellen innerhalb des Prüfobjektes auszubreiten vermögen. Beide Wellenarten, d.h. die normal zur Prüfobjektoberfläche sich ausbreitenden Ultraschallwellen sowie auch die durch die radial polarisierten Scherwellen sich längs zur Prüfobjektoberfläche ausbreitenden Ultraschallwellen eignen sich nach dem Stand der Technik sowohl zur Fehlerprüfung, wie beispielsweise Rissprüfung innerhalb des Prüfobjektes als auch zur Wandstärken- bzw. Wanddickenmessung des Prüfobjektes.

[0006] Da die im Einsatz befindlichen Wirbelstromspulen sehr empfindlich hinsichtlich äußerer mechanischer Einwirkungen sind, gilt es derartige Spulen prinzipiell vor mechanischem Verschleiss zu schützen. Dies ist vor allem dadurch erschwert, zumal bei ferromagnetischen Prüfobjekten die zwischen dem Permanentmagnet und dem Prüfobjekt befindliche Wirbelstromspule aufgrund der anziehend wirkenden Magnetkräfte auf die Oberfläche des Prüfobjektes regelrecht gepresst wird und daher einen hohen Reibverschleiss erfährt.

[0007] In diesem Zusammenhang geht aus der DE 35 11 076 A1 ein Prüfmolch für elektromagnetische Prüfungen an Rohrleitungswandungen aus Stahl hervor, mit dem beispielsweise im Rahmen einer zerstörungsfreien Prüfung Wandschwächungen durch Rostfraß an Rohrleitungswandungen untersucht und detektiert werden kann. Ein in der Druckschrift näher beschriebenes Molchglied ist mit gleichförmig am Umfang verteilten Elektromagneten versehen, die jeweils zwei in axialer Flucht zueinander liegenden Messköpfe, ein die Messköpfe verbindendes Joch und eine Magnetisierungsspule auf diesen Messköpfen aufweisen. Das Feld eines jeden Elektromagneten verläuft dabei parallel zur Rohrmittelachse. Zur Ultraschallmessung ist direkt an zumindest einem der Pole bzw. Magnetköpfe eine Wirbelstromspule angeordnet, die mit starken und sehr steilflankigen Stromimpulsen beaufschlagt wird. Die als Pipelines ausgebildeten Rohrleitungen sind an den Nahtstellen

zweier benachbarter Rohrleitungsstücke Rundnähte vorgesehen, die bei einem Überfahren der Nähte mit dem vorstehend skizzierten Prüfmolch bei einer kontinuierlichen Inspektion eine Schlagbelastung auf den elektromagnetischen Wandler ausüben, die zudem durch die vorhandenen zwischen dem Elektromagneten und der Rohrleitungswand herrschenden magnetischen Kräften deutlich verstärkt wird. Sowohl der vorstehend beschriebene Reibverschleiss als auch die zusätzliche Stossbelastung auf den elektromagnetischen Ultraschallwandler, insbesondere auf die Wirbelstromspule, führen zu geringen Lebensdauern des EMUS-Wandlers, die es zu verbessern gilt.

[0008] Zwar ist es möglich, den Reibverschleiss durch Verringern der zwischen dem EMUS-Wandler und den zu untersuchenden Prüfobjekt herrschenden magnetischen Anziehungskräften zu reduzieren, beispielsweise durch Verringern der Magnetfeldinduktion, doch würde diese Massnahme zugleich auch zu einer deutlichen Effizienzmindering des EMUS-Wandlers führen, d.h. die zur Ultraschallgenerierung innerhalb des Prüfobjektes induzierte Kraftdichte reduziert sich im gleichem Maße, wodurch die Nachweisempfindlichkeit beim Empfang gestreuter oder reflektierter Ultraschallwellen gleichsam abnimmt.

[0009] Auch aus der EP 0 781 994 A2 ist ein elektromagnetischer Ultraschallwandler entnehmbar, der zur Aussendung und zum Empfang in einem bzw. aus einem elektrisch leitenden, ferromagnetischen Prüfkörper zwei getrennte Wirbelstromspulen vorsieht, die vorzugsweise über eine Isolationsschicht miteinander in Deckung gebracht sind. Aus dem Ausführungsbeispiel gemäß **Fig. 17** der zitierten Druckschrift ist ein EMUS-Wandler entnehmbar, bei dem zur Erzeugung eines Permanentmagnetfeldes ein U-förmig geformter Permanentmagnet eingesetzt wird, dessen beide einseitig endenden Magnetpole einen zu untersuchenden Prüfkörper zugewandt sind. Zwischen dem brückenartig vom U-förmig ausgebildeten Permanentmagnet überragenden Oberflächenbereich des Prüfobjektes sind jeweils die zur Ultraschallgenerierung sowie zum Ultraschallempfang dienenden Wirbelstromspulen, die jeweils als Mäanderspulen ausgebildet sind, vorgesehen. Aufgrund des mäanderförmigen Leiterbahnverlaufes sind die Stromrichtungen zweier unmittelbar benachbart verlaufender Leiterbahnabschnitte entgegengesetzt zueinander orientiert. Dies führt innerhalb des Prüfkörpers zu unmittelbar benachbart liegenden Wirbelstrombereichen, die in Überlagerung mit einem Oberflächen-nahen, parallel zur Prüfobjekt gerichteten Permanentmagnetfeld Lorzenzkräfte mit diametral unterschiedlichen Krafrichtungen hervorrufen, die wiederum Druckwellen unter Ausbildung horizontal polarisierter Scherwellen erzeugen, die sich in Form von Ultraschallwellen längs der Oberfläche

des Prüfkörpers ausbreiten. Derartige, sich parallel zur Prüfkörperoberfläche ausbreitende Ultraschallwellen eignen sich durchaus zur Oberflächen-nahen Materialprüfung, sind jedoch für Tiefen- oder Dickenmessungen an Prüfkörpern nicht geeignet.

[0010] Aus der Druckschrift WO 97/05469 A2 ist eine Vorrichtung zur Untersuchung von Flüssigkeiten mittels Ultraschall bekannt. Damit die Flüssigkeit mittels Ultraschall untersucht werden kann, ist neben dem Prüfobjekt (Flüssigkeit) ein Behälter erforderlich, der zumindest an einer Stelle der Behälterwandung eine dünne Metallwand oder eine dünne Metallfolie aufweist, die an der Behälterinnenseite mit der im Behälter enthaltenen Flüssigkeit in direktem Kontakt steht. Zur Untersuchung der Flüssigkeit mittels Ultraschall wird zunächst die dünne Metallwand in Ultraschallschwingung versetzt, um so Ultraschallwellen in die Flüssigkeit einzukoppeln. Nach Einkoppelung der Ultraschallwellen in die Flüssigkeit werden diese an Reflexionsstellen innerhalb der Flüssigkeit, bspw. durch eingelagerte Stoffe anderer Dichte, oder an Flüssigkeitsgrenzflächen reflektiert und gelangen somit als reflektierte Ultraschallwellen wieder zurück an die dünne Metallwand, so dass sie diese wiederum zu Schwingungen anregen, die es zu erfassen gilt.

[0011] In der Druckschrift DE 19543481 A1 wird eine Vorrichtung zur Prüfung von ferromagnetischen Prüfkörpern beschrieben, mit einer in Verbindung mit einem Magnetfeld als EMUS-Wandler dienenden Hochfrequenz-Stromspule zur Anregung und/oder Detektion von Ultraschallwellen im Prüfkörper. Die Vorrichtung zeichnet sich dadurch aus, dass der EMUS-Wandler mittig zwischen den beiden Polbereichen einer Magnetisierungseinheit angeordnet ist. Der Magnetisierungseinheit kommt dabei die Aufgabe zu im Prüfkörper eine parallel zur Prüfkörperoberfläche verlaufende Vormagnetisierung bis in die Nähe der magnetischen Sättigung zu erzeugen. Damit soll erreicht werden, dass durch den mittig zwischen den Polen der Magnetisierungseinheit angeordneten EMUS-Wandler keine derartig starke Änderung des Magnetfeldes innerhalb der Prüfkörpers erzeugt wird, dass bei Bewegen des EMUS-Wandlers die magnetischen Momente innerhalb der einzelnen Domänen im Prüfkörper ummagnetisiert, d.h. umgeklappt werden, wodurch ein das Barkhausen-Rauschen verursachender Strom induziert würde. Diese Anordnung soll mithin der Unterdrückung des Barkhausen-Rauschens und damit der Erhöhung des Signal-Rauschabstandes dienen.

[0012] Weiterhin findet sich in dem Artikel von M. Gori et al. „EMAT transducers and thickness characterization on aged boiler tubes“, *Ultrasonics* 34 (1996), Seiten 339–342, ein Vergleich von piezoelektrischen Wandlern und EMUS-Wandlern für einen Einsatz zur Untersuchung der Dicke von Rohrleitungen.

[0013] Schließlich wird in dem Dokument WO 2004/007138 A1 eine EMUS-Wandler-Anordnung zur Prüfung von Schweißnähten beschrieben. Diese Vorrichtung dient dazu, die bei einer festen Schweißverbindung von Rohrenden entstehende Schweißnaht zu prüfen. Die offenbaren EMUS-Wandler-Anordnungen kommen dabei insbesondere im Bereich der Erdölförderung beim Verschweißen einzelner Rohrstücke des Bohrgestänges zum Einsatz. Die EMUS-Wandler kopplen in den Prüfkörper transversale Ultraschallschwerwellen in unterschiedlichen Moden und Winkeln ein, die sich in Richtung der Schweißnaht ausbreiten.

Aufgabenstellung

Darstellung der Erfindung

[0014] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Vorrichtung sowie ein Verfahren zur Materialprüfung an einem wenigstens elektrisch leitende und ferromagnetische Materialanteile aufweisenden Prüfobjekte auf Basis elektromagnetischer Ultraschallanregung und unter Einsatz einer elektromagnetischen Ultraschallwandleranordnung (EMUS), derart weiterzubilden, dass einerseits dafür Sorge getragen wird, dass die zur Erzeugung von Wirbelströmen erforderliche Wirbelstromspule keinen oder nur geringfügigen Reibverschleiss unterliegt, andererseits die Möglichkeit geboten wird, den Prüfkörper in seiner gesamten Tiefe bzw. Dicke zu untersuchen und Wanddickenmessungen durchzuführen. Insbesondere sollen die zu treffenden Massnahmen geeignet sein, rohrförmige sowie scheibenförmige Prüfkörpergeometrien zu untersuchen sowie zu vermessen.

[0015] Die Lösung der der Erfindung zugrunde liegenden Aufgabe ist im Anspruch 1 angegeben. Ein erfindungsgemäßes Verfahren zur Materialprüfung ist Gegenstand des Anspruches 16. Den Erfindungsgedanken vorteilhaft weiterbildende Merkmale sind Gegenstand der Unteransprüche sowie der Beschreibung, insbesondere unter Bezugnahme auf die Ausführungsbeispiele zu entnehmen.

[0016] Erfindungsgemäß ist eine Vorrichtung zur Materialprüfung an einem wenigstens elektrisch leitende und ferromagnetische Materialanteile aufweisenden Prüfobjekt, das über wenigstens eine technische Oberfläche verfügt, mit wenigstens einer elektromagnetischen Ultraschallwandleranordnung, die eine Permanent- oder Elektromagnetanordnung mit wenigstens zwei der technischen Oberfläche zugewandt angeordneten Magnetpolen unterschiedlicher magnetischer Polarität aufweist, sowie wenigstens eine in Projektion auf die technische Oberfläche zwischen beiden Magnetpolen mittel- oder unmittelbare relativ zur technischen Oberfläche angeordnete Wirbelstromspule vorsieht, derart ausgebildet, dass die wenigstens eine Wirbelstromspule derart ausgebildet

und angeordnet ist, dass durch Versorgen der Wirbelstromspule mit Wechselstrom freie, sich im wesentlichen senkrecht zur technischen Oberfläche innerhalb des Prüfobjektes ausbreitende Ultraschallwellen entstehen.

[0017] Die vorgeschlagene Vorrichtung ermöglicht eine von den zwischen der Permanent- oder Elektromagnetanordnung und dem Prüfobjekt herrschenden magnetischen Anziehungskräften unabhängige Positionierung der wenigstens einen Wirbelstromspule relativ zur technischen Oberfläche des Prüfobjektes, so dass sie keinerlei Reibverschleiss unterliegt, der durch eine magnetkraftbeaufschlagte Anpressung der Wirbelstromspule auf die technische Oberfläche des zu untersuchenden Prüfobjektes herrühren würde. Vielmehr ist die Wirbelstromspule in einem Bereich relativ zur technischen Oberfläche des Prüfobjektes angeordnet, der von einem durch die längs der technischen Oberfläche beabstandet zueinander angeordneten Magnetpole herrührenden tangential Magnetfeld durchsetzt wird, d.h. die durch die Permanent- oder Elektromagnetanordnung innerhalb des Prüfobjektes eingeleiteten magnetischen Feldlinien verlaufen weitgehend parallel zur technischen Oberfläche an der oder relativ zu der die Wirbelstromspule angeordnet ist. Im Gegensatz zu bisher bekannten EMUS-Wandlern, bei denen die Wirbelstromspule unmittelbar an der Magnetpolfläche einem Prüfobjekt zugewandt angeordnet ist, wirken bei der lösungsgemäßen Vorrichtung keinerlei durch äußere Magnetfelder induzierte Anziehungskräfte zwischen der Wirbelstromspule und dem zu untersuchenden Prüfobjekt. Je nach Ausführungsvariante ist es möglich, die wenigstens eine Wirbelstromspule durch Vorsehen einer geeigneten Halterung mit der Permanent- oder Elektromagnetanordnung fest zu verbinden. Eine derartige räumlich feste Zuordnung zwischen Permanent- oder Elektromagnetanordnung und der wenigstens einen Wirbelstromspule ermöglicht eine einheitliche und einfache Handhabung der lösungsgemäß ausgebildeten elektromagnetischen Ultraschallwandleranordnung. Gleichfalls kann eine unabhängige Handhabung von Permanent- oder Elektromagnetanordnung und der wenigstens einen Wirbelstromspule vorteilhafte Anwendungsmöglichkeiten bieten, beispielsweise in Fällen, in denen die Permanent- oder Elektromagnetanordnung auf einer Seite eines zu prüfenden Prüfobjektes angeordnet und die wenigstens eine Wirbelstromspule auf der, der Permanent- oder Elektromagnetanordnung abgewandten Seite des Prüfobjektes in einer Weise positioniert wird, so dass die wenigstens eine Wirbelstromspule in Projektion auf die technische Oberfläche stets zwischen beiden Magnetpolen der Permanent- oder Elektromagnetanordnung zu liegen kommt. In allen möglichen Ausführungsvarianten gilt es darauf zu achten, dass das längs zur technischen Oberfläche innerhalb des Prüfobjektes durch die Permanent- oder Elektromagnetanordnung eingeleitete Tangenti-

almagnetfeld in Überlagerung bzw. in Wechselwirkung mit dem innerhalb des Prüfobjektes durch die mit Wechselstrom beaufschlagte Wirbelstromspule induzierten Wirbelstromfeld tritt. Insbesondere im Falle der vorstehend skizzierten Anordnung der Permanent- oder Elektromagnetanordnung sowie der wenigstens einen Wirbelstromspule auf jeweils dem Prüfobjekt gegenüberliegenden Oberflächen ist zu gewährleisten, dass das in das Prüfobjekt induzierte Tangentialmagnetfeld tief genug hineinreicht, also auch in jenem Prüfobjektbereich vorherrscht, in dem das von der Wirbelstromspule induzierte Wirbelstromfeld wirksam ist.

[0018] Zur Erzeugung freier, sich im wesentlichen senkrecht zur technischen Oberfläche innerhalb des Prüfobjektes ausbreitenden Ultraschallwellen sind spezielle Wirbelstromspulen vorzusehen, die in geeigneter Weise relativ zum Tangentialmagnetfeld zu orientieren sind. So gilt es mit Hilfe der wenigstens einen Wirbelstromspule innerhalb des Prüfobjektes im Bereich des Tangentialmagnetfeldes einen Raumbereich zu schaffen, in dem ein Wirbelstrom mit einer erhöhten Stromdichte sowie mit einer einheitlichen Wirbelstromrichtung ausgebildet wird. Genauer gesagt gilt es, die wenigstens eine Wirbelstromspule derart auszubilden und gegenüber dem von dem Tangentialmagnetfeld durchdrungenen Prüfobjekt anzuordnen, so dass innerhalb des Prüfobjektes ein durch die Wirbelspulengeometrie räumlich abgrenzbarer Bereich geschaffen wird, in dem sich ein resultierendes Wirbelstromfeld mit einer gegenüber den umliegenden Raumbereichen erhöhten Wirbelstromdichte sowie einer einheitlichen Wirbelstromrichtung ausbildet. Zugleich gilt es, die in das Prüfobjekt induzierte Wirbelstromrichtung im Bereich der erhöhten Wirbelstromdichte senkrecht zum Verlauf der Magnetfeldlinien des Tangentialmagnetfeldes zu orientieren.

[0019] Eine bevorzugte Wirbelstromspule, die die vorstehenden Forderungen erfüllt, sieht eine mit Wechselstrom versorgbare elektrische Leiteranordnung vor, die zumindest bereichs- oder abschnittsweise wenigstens zwei, vorzugsweise eine Vielzahl im wesentlichen parallel zueinander verlaufende elektrische Leiter aufweist, die in gleicher Richtung vom Wechselstrom durchflossen werden. Um zu verhindern, dass wie im Falle einer Rechtecksspule, deren sich gegenüberliegende Spulenseiten, die jeweils in entgegengesetzten Richtungen vom Strom durchflossen werden und aufgrund einer zumeist kompakten Umwicklung räumlich eng zusammenliegen, die durch Magnetostriktion erzeugten Ultraschallwellen unter den jeweils gegenüberliegenden Spulenseiten aufgrund ihrer Phasenverschiebung von 180° destruktiv überlagern, gilt es jene Wirbelstromspulen für die erfindungsgemäße Vorrichtung auszuwählen, in denen sich gegenseitig innerhalb eines Prüfobjektes kompensierende Druckwellenerschei-

nungen ausbilden, gezielt zu meiden.

[0020] In den nachfolgenden Ausführungsbeispiele werden zwei bevorzugte Ausführungsformen für eine derartige Wirbelstromspulenordnung beschrieben, von denen eine eine dreidimensionale Wirbelstromspule darstellt und die andere eine zweidimensionale Leiterbahnanordnung vorsieht, die wenigstens zwei in Art jeweils einer Rechtecksspule ausgebildete Leiterbahnsektionen aufweist, wobei die Leiterbahnsektionen derart nebeneinander liegend angeordnet sind, dass beide Rechtecksspulen mit jeweils einem Rechtecksspulenabschnitt unmittelbar nebeneinanderliegend angeordnet sind, der jeweils mit Wechselstrom gleicher Orientierung durchsetzt wird.

[0021] Die lösungsgemäße Vorrichtung vermag freie, sich im Wesentlichen senkrecht zur technischen Oberfläche, gegenüber der der elektromagnetische Ultraschallwandler angeordnet ist, sich ausbreitende Ultraschallwellen einzukoppeln. Die Ultraschalleinkopplung basiert je nach Art des Prüfobjektes sowie dessen magnetischer Sättigung auf dem magnetostriktiven Effekt oder auf Lorenzkräften. Beide Ultraschalleinkopplungsmechanismen werden im Weiteren unter Bezugnahme auf die Figuren im Einzelnen beschrieben.

[0022] Der lösungsgemäßen Vorrichtung liegt ein Verfahren zur Materialprüfung an einem wenigstens elektrisch leitende und ferromagnetische Materialanteile aufweisenden Prüfobjekt im Wege einer elektromagnetischen Ultraschallwellenerzeugung innerhalb des über eine technische Oberfläche verfügenden Prüfobjektes zugrunde, das sich durch die nachfolgenden Verfahrensschritte im einzelnen auszeichnet. Zunächst gilt es, ein Magnetfeld innerhalb des Prüfobjektes zu erzeugen, bei dem die Magnetfeldlinien zumindest bereichsweise parallel zur technischen Oberfläche orientiert sind und ein so genanntes Tangentialmagnetfeld bilden. Des Weiteren wird eine mit Wechselstrom beaufschlagte Wirbelstromspule relativ zur technischen Oberfläche zu Zwecken der Induzierung eines magnetischen Wechselfeldes in das Prüfobjekt vorgesehen, wobei das durch die Wirbelstromspule induzierte Wechselfeld in Überlagerung mit dem Tangentialmagnetfeld tritt. Hierbei gilt es, die Orientierung beider Magnetfelder jeweils derart vorzunehmen, dass ihre Magnetfeldlinien parallel zueinander, jedoch nicht notwendigerweise gleichgerichtet zueinander sind. Dies führt dazu, dass je nach Orientierung der sich periodisch wechselnden Magnetfeldlinienrichtung des Wechselfeldes ein resultierendes Magnetfeld innerhalb des Bereiches, in dem sich beide Magnetfelder überlagern, ergibt, das sich entweder aus der Addition oder Subtraktion beider Magnetfeldstärken ergibt. Durch den magnetostriktiven Effekt des sich periodisch ändernden resultierenden Magnetfeldes innerhalb des Prüfobjektes werden Druckwellen induziert, durch die freie Ultraschallwel-

len freigesetzt werden, die sich senkrecht zur technischen Oberfläche innerhalb des Prüfkörpers ausbreiten. Gleichsam treten durch die im Prüfobjekt induzierten Wirbelströme, die sich im Bereich des Tangentialmagnetfeldes wirken, Lorenzkraften auf, die ebenso Druckwellen zur Ausbildung freier Ultraschallwellen erzeugen, deren Ausbreitungsrichtung senkrecht zur technischen Oberfläche orientiert ist. Beide Effekte tragen in der vorstehend beschriebenen Konstellation zwischen dem durch die Permanent- oder Elektromagnetanordnung hervorgerufenen Tangentialmagnetfeld und den durch die Wirbelstromspule erzeugbaren Wirbelströmen zur Generierung freier Ultraschallwellen bei, mit denen ein Prüfobjekt längs seiner gesamten Tiefenerstreckung erfasst und entsprechend überprüft werden kann.

[0023] Da die Wechselstromanregung der Wirbelstromspule vorzugsweise pulsweise erfolgt, ist es möglich, im Rahmen von Laufzeitmessungen, neben der Materialprüfung auch Wanddickenstärken des Prüfobjektes zu erfassen. Hierzu werden die Laufzeiten erfasst, zwischen Ultraschallwellenerzeugung sowie Ultraschallwellenempfang, wobei die erzeugten Ultraschallwellen an einer Grenzfläche bzw. Oberfläche des Prüfobjektes reflektiert werden.

[0024] Somit eignet sich die lösungsgemäße Vorrichtung in besonders vorteilhafter Weise zur Dickenmessung an rohrförmig ausgebildeten Prüfobjekten, wie beispielsweise Fernrohrleitungen oder Pipelines sowie auch an scheibenförmig ausgebildeten Prüfobjekten, wie beispielsweise Eisenbahnradern.

[0025] In einem bevorzugten Ausführungsbeispiel dient die lösungsgemäße Vorrichtung als integraler Bestandteil eines Prüfmolches, der über einen geeigneten Antrieb im Inneren längs einer Rohrleitung geführt wird, wobei die Rohrleitung auf Materialfehler überprüft und insbesondere deren Wanddicke erfasst wird, ohne dabei Schaden am elektromagnetischen Ultraschallwandler nehmen zu müssen. Auf weitere Einzelheiten wird auf die Beschreibung unter Bezugnahme auf die weiteren Ausführungsbeispiele verwiesen.

Ausführungsbeispiel

Kurze Beschreibung der Erfindung

[0026] Die Erfindung wird nachstehend ohne Beschränkung des allgemeinen Erfindungsgedankens anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnungen exemplarisch beschrieben. Es zeigen:

[0027] Fig. 1a–f unterschiedliche Anordnungen eines lösungsgemäß ausgebildeten EMUS-Wandlers relativ zu einem Prüfobjekt,

[0028] Fig. 2a, b Darstellung des Anregungsprinzips des Ultraschalls im Wege des magnetostriktiven Effektes sowie durch Lorenzkraft,

[0029] Fig. 3 eine schematisierte Draufsicht auf eine lösungsgemäß ausgebildete Wirbelstromspule,

[0030] Fig. 4a, b schematisierte Darstellung einer alternativ ausgebildeten Wirbelstromspule,

[0031] Fig. 5a, b EMUS-Wandler gemäß Stand der Technik, sowie

[0032] Fig. 6a–c Prinzipdarstellungen zur Faced-Array-Ansteuerung einer Vielzahl von Wirbelstromspulen,

[0033] Fig. 7 und Fig. 8 alternative Ausführungsbeispiele zur Anwendung eines EMUS-Wandlers zur Prüfung einer Rohrleitung.

Wege zur Ausführung der Erfindung, gewerbliche Verwendbarkeit

[0034] In den Fig. 1a bis f sind unterschiedliche Anordnungs- und Ausbildungsmöglichkeiten der erfindungsgemäßen Vorrichtung dargestellt. Zur Materialuntersuchung aber insbesondere zur Dickenmessung eines Prüfobjektes 4, das aus einem elektrisch leitenden und ferromagnetischem Material besteht, ist eine U-förmig ausgebildete Permanentmagnetanordnung 1 vorgesehen, die Joch-artig das Prüfobjekt 4 überspannt und stirnseitig mit ihren Magnetpolen N, S unmittelbar auf der technischen Oberfläche des Prüfobjektes 4 aufliegt. Wie insbesondere im Weiteren unter Bezugnahme auf die Fig. 2 hervorgeht, speist der Permanentmagnet 1 im Bereich zwischen den Magnetpolen N, S innerhalb des Prüfobjektes 4 ein Tangentialmagnetfeld ein, das im Falle eines Permanentmagneten 1 zeitlich konstant ist. Ebenso ist es möglich, anstelle des in den Fig. 1 dargestellten Permanentmagneten 1 einen Elektromagnet in gleicher oder ähnlicher Konfiguration einzusetzen, der ein zeitlich variables Tangentialmagnetfeld in das Prüfobjekt 4 einzuspeisen vermag. In diesem Falle ist dafür Sorge zu tragen, dass die zur Ausbildung des Tangentialmagnetfeldes erforderliche Wechselstromfrequenz sehr viel niedriger ist, als die Wechselstromfrequenz, mit der die wenigstens eine Wirbelstromspule 2 gespeist wird, die auf der technischen Oberfläche 5 des Prüfobjektes 4 im Bereich des wirkenden Tangentialmagnetfeldes angeordnet ist. Im Weiteren sei der Einfachheit halber angenommen, dass die Magnetanordnung 1, wie bereits vorstehend erläutert, als Permanentmagnet ausgebildet ist.

[0035] Durch die Wechselstrombeaufschlagung der Wirbelstromspule 2 wird ein Wirbelstromfeld in den Bereich des Prüfobjektes 4 induziert, in dem das durch die Permanentmagnetanordnung 1 einge-

speiste Tangentialmagnetfeld vorherrscht. Durch die Überlagerung beider Felder werden auf der Grundlage magnetostriktiver Effekte sowie die Erzeugung von Lorenzkraften, wie dies insbesondere aus der Bilddarstellung gemäß [Fig. 2](#) noch im einzelnen erläutert wird, freie Ultraschallwellen **6** generiert, die senkrecht zur technischen Oberfläche **5** in das Innere des Prüfbodentes **4** eingeschaltet werden. Im Wege einer an sich bekannten Puls-Echo-Laufzeitmessung der an der technischen Oberfläche **5** im Wege des elektromagnetischen Ultraschallwandlerwirkprinzips eingekoppelten Ultraschallwellen kann unter anderem die Wandstärke- bzw. dicke des Prüfbodentes **4** ermittelt werden. Die alternativen Ausführungsbeispiele gemäß den [Fig. 1a bis c](#) verdeutlichen die Variabilität, mit der die wenigstens eine Wirbelstromspule **2** relativ zum Permanentmagnet **1** am Prüfbodent angeordnet werden kann. Im Falle der Anordnung gemäß [Fig. 1b](#) befindet sich die Wirbelstromspule **2** auf einer dem Permanentmagnet **1** gegenüberliegenden Oberfläche des Prüfbodentes **4**. In diesem Fall gilt es sicher zu stellen, dass das durch den Permanentmagnet **1** in das Prüfbodent **4** eingekoppelte Tangentialmagnetfeld in der gesamten Dicke des Prüfbodentes **4** wirkt. Im Ausführungsbeispiel gemäß [Fig. 1c](#) befindet sich das Prüfbodent **4** zwischen beiden Magnetpolen N, S, so dass sich das Tangentialmagnetfeld längs der gesamten Längserstreckung des Prüfbodentes **4** ausbildet.

[0036] Um großflächige Prüfbodente **4** zu erfassen bzw. zu vermessen, bietet es sich an, gemäß den Ausführungsbeispielen der [Fig. 1d](#) und [e](#) mehrere Wirbelstromspulen **2** in entsprechender Weise einzusetzen.

[0037] [Fig. 1f](#) gibt eine schematisierte Draufsicht auf die elektromagnetische Ultraschallwandleranordnung, beispielsweise gemäß [Fig. 1a](#), wieder und verdeutlicht, dass die Wirbelstromspule **2** unabhängig von der Magnetanordnung längs oder quer zu den Tangentialmagnetfeldlinien, die vom Nordpol zum Südpol verlaufen, bewegt werden. Bei Bedarf kann ein Luftspalt zwischen der Wirbelstromspule **2** und dem Prüfbodent **4** entsprechend eingestellt bzw. variiert werden, falls Oberflächenkrümmungen oder Unebenheiten, beispielsweise bedingt durch Schweißnahtüberhöhungen, hervorstehende Überwälzung, Korrosion, Schmutz oder andere Unebenheiten vorhanden sind.

[0038] Um freie Ultraschallwellen im Inneren des Prüfbodentes **4** zu generieren, deren Ausbreitungsrichtung im Wesentlichen senkrecht zur technischen Oberfläche orientiert ist, bedarf es bestimmter Vorkehrungen, die unter Bezugnahme auf [Fig. 2](#) geschildert sind. In den Ausführungsbeispielen gemäß [Fig. 2a](#) und [b](#) ist jeweils ein U-förmiger Permanentmagnet **1** zur Einspeisung eines zeitlich konstanten Tangentialmagnetfeldes B_t innerhalb des Prüfbodentes **4**

angeordnet. Ferner sei angenommen, dass die Wirbelstromspule **2** aus einer Vielzahl parallel zueinander verlaufender elektrischer Leiter **7** zusammengesetzt ist, die von einem Wechselstrom mit jeweils gleicher Stromrichtung durchflossen werden.

[0039] Bezüglich der in [Fig. 2a](#) oberen Darstellung gezeigten Situation sei angenommen, dass die elektrischen Leiter **7** der Wirbelstromspule **2** einheitlich vom elektrischen Strom durchflossen werden, der aus der Zeichenebene herausgerichtet ist. Im Wege des Stromflusses wird ein Wechselmagnetfeld B_{ws} generiert, das im Bereich des Prüfbodentes konstruktiv mit dem Tangentialmagnetfeld B_t überlagert. In diesem Falle herrscht zumindest im Bereich des von der Wirbelstromspule **2** innerhalb des Prüfbodentes **4** induzierten Wechselmagnetfeldes B_{ws} ein resultierendes Magnetfeld B , für das gilt $B = B_t + B_{ws}$.

[0040] In der in [Fig. 2a](#) unteren Fallsituation werden die elektrischen Leiter **7** der Wirbelstromspule **2** einheitlich von einem Strom durchflossen, der in die Zeichenebene hineingerichtet ist. In Folge dessen kommt es, unter Berücksichtigung der vorstehenden Überlegungen, zu einer Subtraktion des Wechselmagnetfeldes B_{ws} von dem zeitlich konstanten Tangentialmagnetfeld B_t . Das resultierende Magnetfeld im Bereich des von der Wirbelstromspule **2** generierten Wechselmagnetfeldes B_{ws} ergibt sich somit wie folgt: $B = B_t - B_{ws}$.

[0041] Durch das sich zeitlich ändernde resultierende Magnetfeld B ergeben sich auf Grundlage des magnetostriktiven Effektes Ultraschallwellen, die als Transversalwellen senkrecht zur technischen Oberfläche **5** in das Prüfbodent **4** abgeschallt werden.

[0042] In Überlagerung bzw. alternativ zur Ultraschallwellenerzeugung auf der Grundlage des magnetostriktiven Effektes werden freie Ultraschallwellen auch durch innerhalb des Prüfbodentes wirkende Lorenzkraften generiert, obgleich dieser Effekt bei ferromagnetischen Materialien wesentlich schwächer ausgebildet ist als jener auf der Magnetostraktion beruhend. Insbesondere eignet sich die auf Lorenzkraften beruhende Ultraschallwellenerzeugung in Form longitudinaler Wellen in nicht ferromagnetischen Werkstoffen. Ein diesbezüglicher Anregungsmechanismus ist in [Fig. 2b](#) dargestellt. In der [Fig. 2b](#) oberen Darstellung ist angenommen, dass die elektrischen Leiter **7** der Wirbelstromspule **2** einheitlich von einem Strom durchsetzt werden, der in die Zeichenebene hineingerichtet ist. Durch diesen Stromfluss werden innerhalb des Prüfbodentes Wirbelströme generiert, die unter Ausbildung von Lorenzkraften F_L in Überlagerung mit dem Tangentialmagnetfeld B_t treten und im geschilderten Fallbeispiel senkrecht in das Prüfbodent **4** hineingerichtet sind. Ist die Stromflussrichtung durch die elektrischen Leiter **7** umgekehrt orientiert, wie im Fallbeispiel der [Fig. 2b](#) unteren Bildar-

stellung, so generieren sich Lorenzkraften F_L senkrecht auf die technische Oberfläche **5** zugewandt. Es ist evident, dass die alternierenden Lorenzkraften F_L in jeweils entgegengesetzter Wirkrichtung in Abhängigkeit der Wechselstromrichtung longitudinale Ultraschallwellen mit einer Ausbreitungsrichtung senkrecht zur technischen Oberfläche zu erzeugen vermögen.

[0043] Die vorstehenden Anregungsmechanismen zur Freisetzung freier Ultraschallwellen innerhalb des Prüfobjektes **4** machen deutlich, dass spezielle Wirbelstromspulenordnungen einzusetzen sind, die in einem begrenzten Raumbereich innerhalb des Prüfobjektes eine erhöhte Stromdichte mit einer bevorzugten Stromrichtung, die im wesentlichen senkrecht zum Tangentialmagnetfeld orientiert ist, erzeugen sollen. In den [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#) sind entsprechende alternative Ausführungsformen derartiger Wirbelstromspulen dargestellt.

[0044] [Fig. 3](#) zeigt eine zweidimensionale Wirbelstromspule, die eine Schmetterlingsflügel nachgebildete Leiterbahnanordnung vorsieht. Sie besteht aus zwei gleichen Leiterbahnsektionen **8**, **9**, die derart nebeneinander liegend angeordnet sind, dass beide als Rechtecksspulen ausgebildete Leiterbahnsektionen mit jeweils einem Rechtecksspulenabschnitt unmittelbar nebeneinander liegend angeordnet sind, der jeweils mit Wechselstrom gleicher Orientierung durchsetzt wird (siehe den strichliert umrandeten Bereich sowie die Pfeildarstellungen, die jeweils die Stromflussrichtung angeben). Der durch die strichlierte Umrandung einbeschriebene Bereich **10** ist die so genannte Arbeitszone, in der die elektrischen Ströme der stromdurchflossenen elektrischen Leiterbahnabschnitte stets gleich orientiert sind. Die Wirbelstromdichte im Prüfobjekt unter der Arbeitszone **10** ist somit bedeutend höher als in anderen Bereichen, so dass durch diesen Gradienten die Ultraschallwellen an dieser Stelle bzw. an diesem Bereich am besten erzeugt werden.

[0045] In [Fig. 4a](#) und [b](#) ist eine weitere alternative dreidimensional ausgebildete Wirbelstromspule **2** zur Anregung freier Ultraschallwellen dargestellt. In [Fig. 4a](#) ist gezeigt, dass der die Wirbelstromspule **2** zusammensetzende elektrische Leiter um eine würfelförmige Spulenhalterung **11** gewickelt ist. [Fig. 4b](#) gibt einen Querschnitt durch einen diesbezüglich ausgebildeten elektromagnetischen Ultraschallwandler, bei dem die würfelförmig gewickelte Wirbelstromspule **2** von dem U-förmig geformten Permanentmagnet **1** überragt wird. Es sei angenommen, dass die elektrischen Leiterbahnen **7** der Wirbelstromspule, die unmittelbar auf der technischen Oberfläche **5** des Prüfobjektes **4** aufliegen einheitlich von einem Strom durchflossen werden, der im Falle der [Fig. 4b](#) aus der Zeichenebene herausgerichtet ist. Es liegt auf der Hand, dass eine derartige Spulen-

geometrie nur mit einer Spulenseite der ansonsten dreidimensional ausgebildeten Wirbelstromspule Wirbelströme im Prüfgegenstand anregt. In dem gezeigten Ausführungsbeispiel können keine entgegengesetzt orientierten Wirbelströme innerhalb des Prüfgegenstandes entstehen, die sich gegenseitig aufheben können, wie beispielsweise im Falle einer an sich bekannten Rechtecksspulengeometrie.

[0046] Bezüglich der Bilddarstellung in [Fig. 5](#), die einen an sich bekannten elektromagnetischen Ultraschallwandler darstellt, sei auf die vorstehend beschriebene Beschreibungseinleitung verwiesen.

[0047] Bezugnehmend auf die Bilddarstellungen in [Fig. 6a](#), [b](#) und [c](#) sei auf die Möglichkeit verwiesen, eine Vielzahl von Wirbelstromspulen **2** relativ zu einer technischen Oberfläche **5** eines Prüfobjektes **4** anzuordnen und phasengesteuert, im Wege einer so genannten Phased-Array-Ansteuerung, anzuregen. Auf die bildliche Darstellung der eingangs erwähnten Magnetanordnung **1** ist aus Gründen einer vereinfachten Darstellung verzichtet worden. Das Prinzip eines Phased-Arrays basiert auf der phasengesteuerten Anregung des aus mehreren Elementen bestehenden Ultraschall-Wandlers. So lässt sich durch eine Schallfeldsteuerung das Schallbündel, das von der Gesamtheit der Wirbelstromspulen **2** abgeschallt wird, schwenken bzw. fokussieren. Im Falle der geschwenkten Abschallung eines Ultraschallwellenfeldes gemäß [Fig. 6a](#) sind die einzelnen Wirbelstromspulen **2** zeitlich linear verzögert anzusteuern. Im Falle einer Fokussierung gemäß Bilddarstellung in [Fig. 6b](#) gilt es die einzelnen Wirbelstromspulen gemäß des parabolischen Verzögerungsgesetzes anzuregen. Beide vorstehend genannten Anregungsprinzipien folgen dem Schallfeld nach dem Huygens'schen Prinzip gemäß Bilddarstellung in [Fig. 6c](#).

[0048] In den [Fig. 7](#) und [Fig. 8](#) sind praktische Anwendungsfälle der lösungsgemäß ausgebildeten Vorrichtung zur Materialprüfung insbesondere zur Materialwanddickenmessung dargestellt. In beiden Fällen gilt es, Rohre, beispielsweise in Form von Fernrohrleitungen zu untersuchen. Hierzu sind die Prüfvorrichtungen gemäß [Fig. 7](#) und [Fig. 8](#) mit einer entsprechenden Bewegungskinematik, beispielsweise mit einem so genannten Prüfmolch zu kombinieren, um eine Vorwärtsbewegung längs des Rohres zu ermöglichen.

[0049] In dem Ausführungsbeispiel gemäß [Fig. 7](#) sind zu Zwecken einer möglichst großflächigen Erfassung der Rohrwand eine Vielzahl einzelner Wirbelstromspulen **2** zwischen zwei Magnetpolen N, S, vorzugsweise in Form einer Schachbrettmusteranordnung angeordnet. Die Magnetpole N, S können entweder nebeneinander in Achsrichtung des Rohres **12** oder in zirkulärer Anordnung um die Rohrachse (siehe Querschnittsdarstellung in [Fig. 7](#)) angeordnet

werden.

[0050] In [Fig. 8](#) sind die Magnetpole N, S jeweils ringförmig ausgebildet und über eine gemeinsame Achse A miteinander verbunden. Die ring- oder scheibenartige Ausbildung der Magnetpole N, S ist jeweils an die Innengeometrie des zu untersuchenden Rohres **12** angepasst. Vorzugsweise befinden sich an den Umfangsrändern der Magnetpole N, S Bürsten, um einerseits Verklebungen zwischen der Magnetanordnung und der Rohrwand zu vermeiden und andererseits für einen Reinigungszweck zu sorgen. Zwischen beiden ringförmig angeordneten Magnetpolen N, S ist eine Vielzahl von Wirbelstromspulen **2** längs des Umfangsrandes einer Scheibenanordnung **14** vorgesehen. Die Scheibenanordnung **14** ist fest mit der gemeinsamen Magnetachse A, die beide Magnetpole N, S verbindet, verbunden. Die in [Fig. 8](#) dargestellte Wandleranordnung vermag den vollständigen Innenumfang eines Rohrabschnittes in axialer Richtung zu erfassen.

[0051] Die vorstehend geschilderte lösungsgemäße elektromagnetische Ultraschallwandleranordnung vermag somit folgende Vorteile auf sich zu vereinen:

- Die konventionelle Konstruktion des EMUS-Wandlers mit einer Magnetisierung im unmittelbaren Bereich der Wirbelstromspule wird lösungsgemäß durch eine Anordnung ersetzt, bei der ein wesentlich größerer Bereich des Prüfobjektes mit einem tangential verlaufenden Magnetfeld magnetisiert wird. Der Abstand zwischen den Magnetpolen ist bedeutend größer als die Abmessungen der Wirbelstromspulen.
- Im Falle einer derartigen globalen Magnetisierung werden bei der Bewegung des Magnetsystems auf dem Prüfobjekt nur die unmittelbar unter den Polen liegenden Bereiche des Prüfgegenstandes ummagnetisiert. Die zwischen den Polen liegenden Bereiche werden nahezu gleich bzw. homogen in Form eines sich tangential ausbildenden Magnetfeldes magnetisiert. So registrieren die Wirbelstromspulen keine durch Barkhausen-Rauschen bedingten Störsignale.
- Es können eine oder mehrere Wirbelstromspulen verwendet werden. Die Wirbelstromspulen können an beliebigen Stellen über dem magnetisierten Bereich des Prüfobjektes in einer beliebigen Anordnung positioniert werden. Der Einsatz von mehreren Wirbelstromspulen, den so genannten Spulen-Arrays, wird bei der Prüfung von großen Objekten bevorzugt eingesetzt. Auf diese Weise kann eine hohe Prüfgeschwindigkeit ohne zeitaufwendiges Abtasten des Prüfobjektes durchgeführt werden.
- Durch den Einsatz einer Magnetisierungseinheit für mehrere Wirbelstromspulen werden eine wesentliche Einsparung von Permanentmagneten sowie eine Vereinfachung der Konstruktion des EMUS-Sensors erreicht.

– Durch phasengesteuerte Anregung mehrerer Wirbelstromspulen kann unter wählbaren Winkeln eingeschallt werden, womit der Nachweis von rissartigen Fehlern auf der Grundlage entsprechender Regelwerke möglich wird.

– Die Belastung der Wirbelstromspule durch magnetische Anziehungskräfte, die auf der Grundlage einer Kraftwechselwirkung zwischen den Magneten und dem Prüfobjekt beruhen, entfällt vollständig. Dadurch wird der Verschleiss der Prüfkopfberührungsfläche geringer und die Lebensdauer des EMUS-Sensors länger.

– Eine feste mechanische Verbindung des Magneten und der Wirbelstromspule kann entfallen. Die Wirbelstromspule kann sich beliebig über der Oberfläche des Prüfobjektes innerhalb des magnetisierten Bereiches bewegen. Insbesondere ist es möglich, die Wirbelstromspule unabhängig vom Oberflächenprofil des Prüfobjektes zu bewegen und an Unebenheiten, wie beispielsweise Krümmungen, Schweißnähte etc. anzupassen.

Bezugszeichenliste

1	Magnet
2	Wirbelstromspule
3	EMUS-Wandler
4	Prüfobjekt
5	technische Oberfläche
6	Freie Ultraschallwellen
7	elektrischer Leiter
8,9	Leiterbahnsektion
10	Arbeitszone
11	Würfelgeometrie
12	Rohr
13	Bürsten
14	Scheibenanordnung

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Materialprüfung an einem wenigstens elektrisch leitende und ferromagnetische Materialanteile aufweisenden Prüfobjekt (**4**), das über wenigstens eine technische Oberfläche (**5**) verfügt, mit wenigstens einer elektromagnetischen Ultraschallwandleranordnung (EMUS), die eine Permanent- oder Elektromagnetanordnung (**1**) mit wenigstens zwei der technischen Oberfläche (**5**) zugewandt angeordneten Magnetpolen (N, S) unterschiedlicher magnetischer Polarität aufweist, sowie wenigstens eine in Projektion auf die technische Oberfläche (**5**) zwischen beiden Magnetpolen (N, S) mittel- oder unmittelbar relativ zur technischen Oberfläche (**5**) angeordnete Wirbelstromspule (**2**) vorsieht, **dadurch gekennzeichnet**, dass die wenigstens eine Wirbelstromspule (**2**) derart ausgebildet und angeordnet ist, dass durch Versorgen der Wirbelstromspule (**2**) mit Wechselstrom freie, sich im Wesentlichen senkrecht zur technischen Oberfläche (**5**) innerhalb des Prüfobjektes (**4**) ausbreitende Ultraschallwellen (**2**) entste-

hen.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die wenigstens eine Wirbelstromspule (2) eine mit Wechselstrom beaufschlagbare elektrische Leiteranordnung vorsieht, die zumindest bereichs- oder abschnittsweise wenigstens zwei, vorzugsweise eine Vielzahl im Wesentlichen parallel zueinander verlaufende elektrische Leiter (7) aufweist, die in gleicher Richtung vom Wechselstrom durchflossen werden.

3. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Permanent- oder Elektromagnetanordnung (1) zwischen den Magnetpolen (N, S) innerhalb des Prüfobjektes (4) ein im Wesentlichen parallel zur technischen Oberfläche (5) orientiertes magnetisches Tangentialfeld B_t erzeugt, dass die im Wesentlichen parallel zueinander verlaufenden Leiter (7) senkrecht zum magnetischen Tangentialfeld B_t angeordnet sind und bei einer Wechselstrombeaufschlagung innerhalb des Prüfobjektes (4) ein Wechselmagnetfeld B_{ws} induzieren, so dass sich innerhalb des Prüfobjektes (4) ein Magnetfeld B in folgender Weise ergibt: $B = B_t \pm B_{ws}$.

4. Vorrichtung nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Permanent- oder Elektromagnetanordnung (1) zwischen den Magnetpolen (N, S) innerhalb des Prüfobjektes (4) ein im Wesentlichen parallel zur technischen Oberfläche (5) orientiertes magnetisches Tangentialfeld B_t erzeugt, dass die im Wesentlichen parallel zueinander verlaufenden Leiter (7) senkrecht zum magnetischen Tangentialfeld B_t angeordnet sind und bei einer Wechselstrombeaufschlagung innerhalb des Prüfobjektes (4) Wirbelströme induzieren, durch die im Prüfobjekt (4) im Bereich der Wirbelströme orthogonal zur technischen Oberfläche (5) orientierte Lorentz-Kräfte (F_L) erzeugbar werden, durch die longitudinale Ultraschallwellen mit einer senkrecht zur technischen Oberfläche (5) gerichteten Abstrahlcharakteristik entstehen.

5. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Wirbelstromspule (2) als dreidimensionaler Körper ausgebildet ist, mit einem reellen oder virtuellen Körperkern, auf dessen reeller oder virtueller Körperkernoberfläche ein elektrischer Leiter (7) mit einem einheitlichen Wicklungssinn aufgewickelt ist, und dass der dreidimensionale Körper (11) einen an die technische Oberfläche (5) angepassten Bereich der Körperkernoberfläche aufweist, in dem der Leiter (7) eine Vielzahl parallel nebeneinander liegende Leiterabschnitte vorsieht.

6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Wirbelstromspule (2) einer zweidimensionalen Leiterbahnanordnung nachgebildet ist, die wenigstens zwei in Art jeweils ei-

ner Rechtecksspule ausgebildete Leiterbahnsektionen (8, 9) aufweist, und dass die Leiterbahnsektionen (8, 9) derart nebeneinander liegend angeordnet sind, dass beide Rechtecksspulen mit jeweils einem Rechtecksspulenabschnitt (10) unmittelbar nebeneinander liegend angeordnet sind, der jeweils mit Wechselstrom gleicher Orientierung durchsetzt wird.

7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die wenigstens eine Wirbelstromspule (2) mit der Permanent- oder Elektromagnetanordnung (1) derart in mechanischer Wirkverbindung steht, dass die Wirbelstromspule (2) berührungslos über der technischen Oberfläche (5) angeordnet ist oder nahezu kraftfrei auf der technischen Oberfläche (5) aufliegt.

8. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die wenigstens eine Wirbelstromspule (2), vorzugsweise als manuell bedienbare Einheit unabhängig von der Permanent- oder Elektromagnetanordnung (1) relativ zur technischen Oberfläche (5) anordenbar ist.

9. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Permanent- oder Elektromagnetanordnung (1) einen U-förmigen Magnetkörper aufweist, dessen Magnetpole (N, S) flächig an der technischen Oberfläche (5) aufliegen und der einen Bereich der technischen Oberfläche (5) brückenartig überspannt, in dem die wenigstens eine Wirbelstromspule (2) oder an dessen dem Prüfobjekt (4) abgewandten Oberfläche die wenigstens eine Wirbelstromspule (2) angeordnet ist.

10. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Permanent- oder Elektromagnetanordnung (1) zwei längs einer Achse (A) beabstandete, ringförmig ausgebildete Magnetkörper jeweils mit einer Ringebene aufweist, deren Ringebenen die Achse (A) senkrecht schneiden und deren Umfangsrand jeweils einem Magnetpol mit unterschiedlicher Magnetpolung entsprechen, und dass sich zwischen beiden Magnetkörpern wenigstens eine Wirbelstromspule vorgesehen ist.

11. Vorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Magnetkörper längs der Achse (A) einstückig miteinander verbunden sind.

12. Vorrichtung nach Anspruch 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, dass eine Vielzahl von Wirbelstromspulen (2) längs des Umfangsrandes einer Ring- oder Scheibenanordnung (14) vorgesehen ist, deren Umfangsrand mit gleichem oder kleinerem Abstand zur Achse (A) ausgebildet ist als der Umfangsrand der ringförmigen Magnetkörper.

13. Verwendung der Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 12 zur Dickenmessung an einem

Prüfobjekt.

14. Verwendung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Dickenmessung im Wege eines Puls-Echo-Verfahrens durchgeführt wird, indem Ultraschallwellen senkrecht zur technischen Oberfläche in Pulsform in das Prüfobjekt (4) eingeschallt werden und an einer gegenüberliegenden Oberfläche reflektiert werden, wobei eine Laufzeitmessung durchgeführt wird, bei der der Aussende- und Empfangszeitpunkt der Ultraschallwellen erfasst werden.

15. Verwendung der Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 12 zur Materialprüfung und/oder Dickenmessung an Fernrohrleitungen oder Eisenbahnrädern.

16. Verfahren zur Materialprüfung an einem wenigstens elektrisch leitende und ferromagnetische Materialanteile aufweisenden Prüfobjekt (4) im Wege einer elektromagnetischen Ultraschallwellenerzeugung innerhalb des über eine technische Oberfläche (5) verfügenden Prüfobjektes (4),

gekennzeichnet durch folgende Verfahrensschritte:

- Erzeugen eines Magnetfeldes B_t innerhalb des Prüfobjektes (4), bei dem die Magnetfeldlinien zumindest Bereichsweise parallel zur technischen Oberfläche (5) orientiert sind und ein Tangentialmagnetfeld B_t darstellen,
- Vorsehen einer mit Wechselstrom beaufschlagten Wirbelstromspule (2) relativ zur technischen Oberfläche (5) zu Zwecken einer Induzierung eines magnetischen Wechselfeldes B_{ws} in das Prüfobjekt (4), das in Überlagerung mit dem Tangentialmagnetfeld B_t tritt, so dass gilt:

$$B = B_t \pm B_{ws}$$

- Ausbilden von im Wege der Magnetostriktion und/oder innerhalb des Prüfobjektes (4) sich ausbildenden Lorentzkräften hervorgerufenen freien Ultraschallwellen (6), die sich senkrecht zur technischen Oberfläche (5) innerhalb des Prüfobjektes (4) ausbreiten,
- Erfassen von Laufzeiten der sich innerhalb des Prüfobjektes (4) frei ausbreitenden Ultraschallwellen (6), die einem Reflexionsereignis innerhalb des Prüfobjektes (4) unterliegen und an den Ort Ihrer Ausbildung zurückkehren, und
- Analysieren der erfassten Laufzeiten als Grundlage der Materialprüfung.

17. Verfahren nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass die Feldlinien des magnetischen Wechselfeldes B_{ws} mit gleicher oder entgegengesetzter Orientierung zum Tangentialmagnetfeld B_t ausgerichtet werden.

18. Verfahren nach Anspruch 16 oder 17, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens eine mit

Wechselstrom beaufschlagte Wirbelstromspule (2) relativ zur technischen Oberfläche (5) zu Zwecken einer Induzierung von Wirbelströmen in das Prüfobjekt derart angeordnet wird, dass die induzierten Wirbelströme in Überlagerung mit dem Tangentialmagnetfeld B_t Lorentz-Kräfte F_L innerhalb des Prüfobjektes (4) generieren, durch die freie longitudinale Ultraschallwellen (6) mit einer senkrecht zur technischen Oberfläche (5) in das Prüfobjekt (4) orientierte Ausbreitungscharakteristik angeregt werden.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

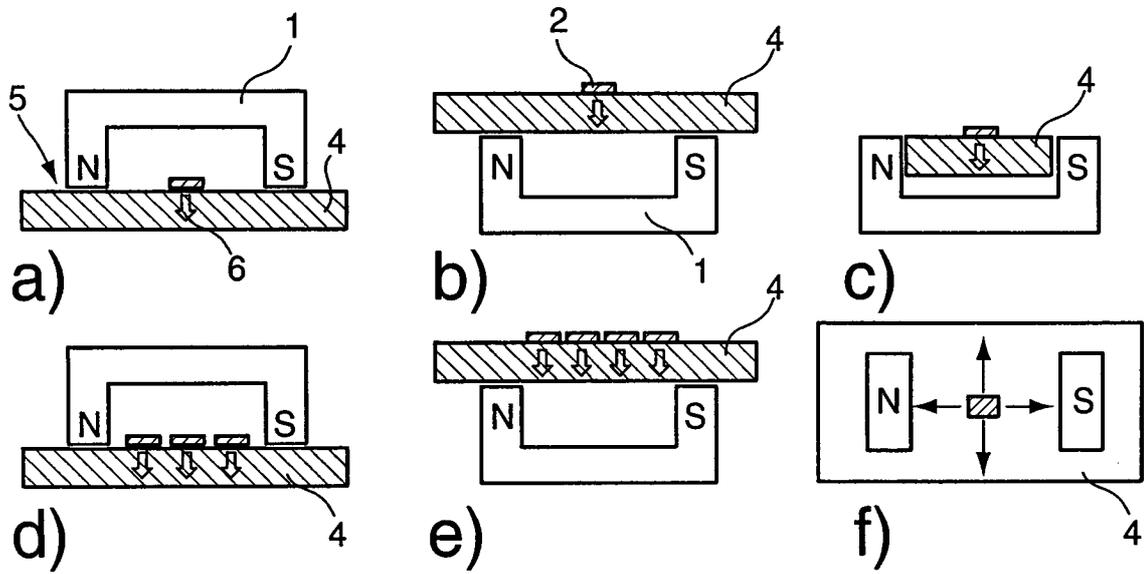


Fig. 1

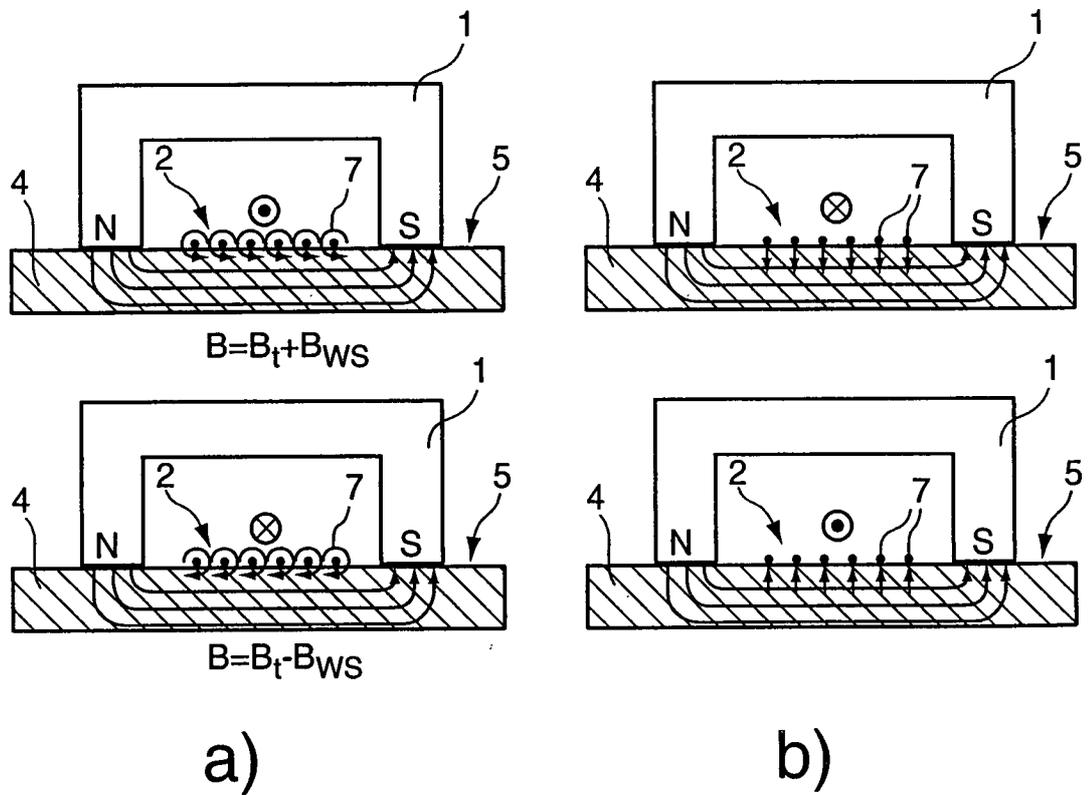


Fig. 2

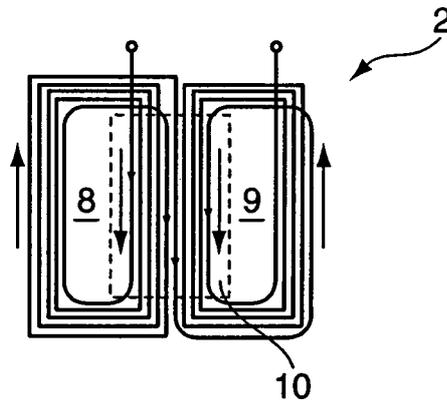


Fig. 3

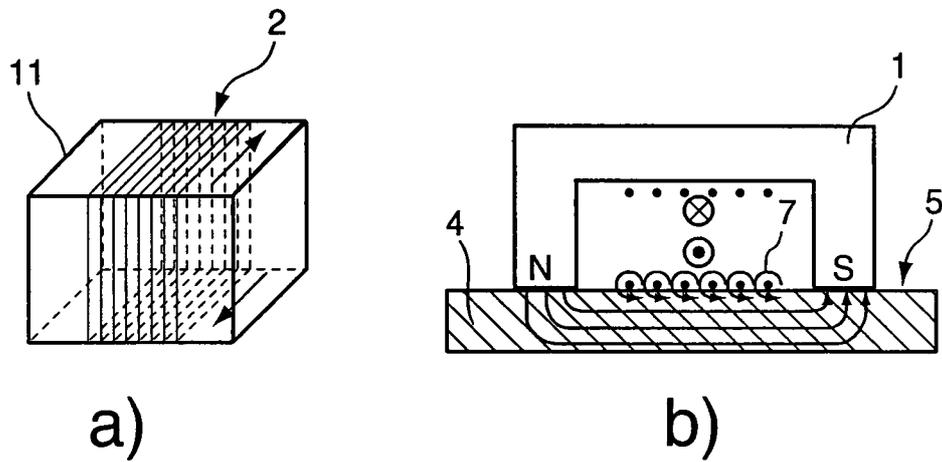


Fig. 4

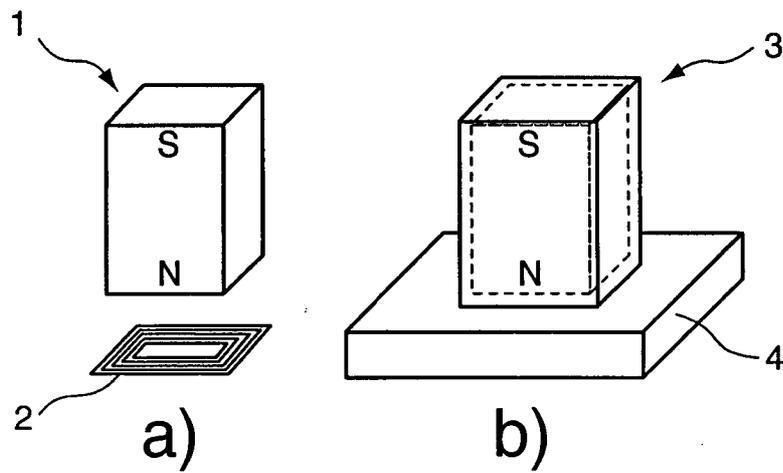


Fig. 5

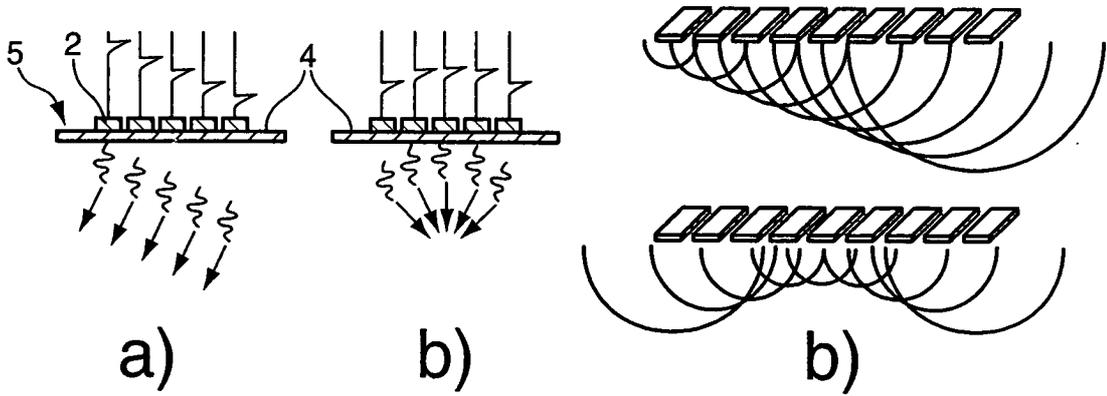


Fig. 6

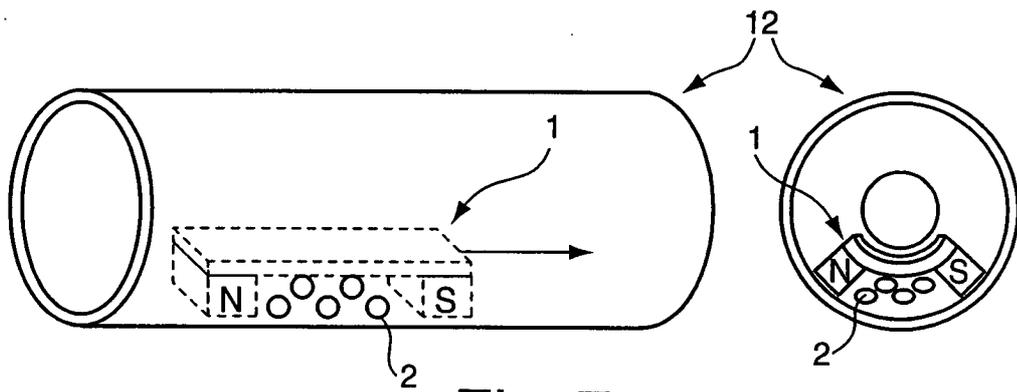


Fig. 7

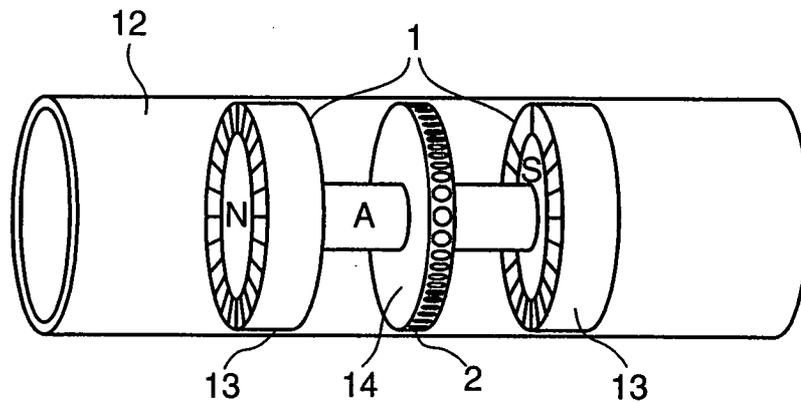


Fig. 8