



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
22.03.2017 Patentblatt 2017/12

(51) Int Cl.:
H05B 6/10 (2006.01) **H01J 27/18 (2006.01)**
H05B 6/36 (2006.01) **F03H 1/00 (2006.01)**

(21) Anmeldenummer: **15185774.5**

(22) Anmeldetag: **18.09.2015**

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

(72) Erfinder:
• **VOLKMAR, Chris**
35460 Staufenberg (DE)
• **RICKLEFS, Ubbo**
35625 35625 Hüttenberg (DE)

(74) Vertreter: **Stumpf, Peter**
c/o TransMIT GmbH
Kerkrader Strasse 3
35394 Gießen (DE)

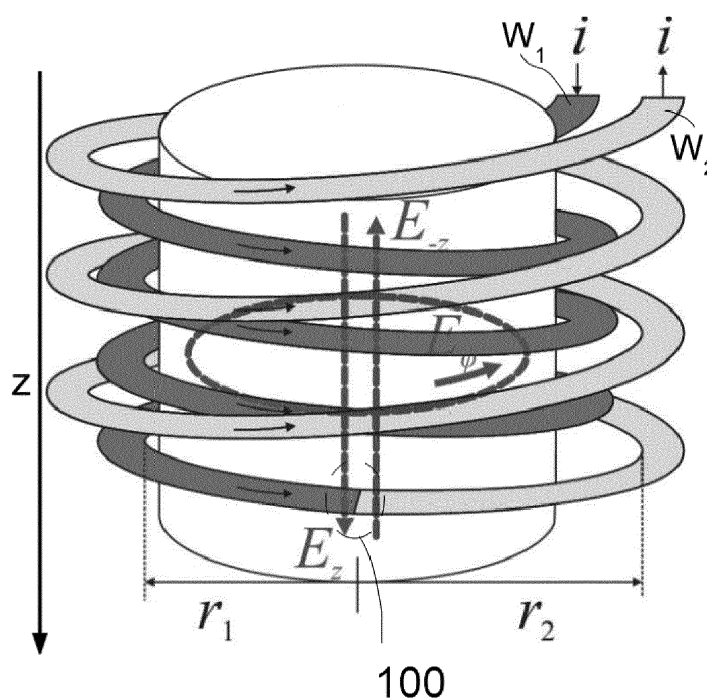
(71) Anmelder: **Technische Hochschule Mittelhessen**
35390 Giessen (DE)

(54) **INDUKTIONSHHEIZSPULE**

(57) Gegenstand der Erfindung ist eine Induktionsheizspule. Diese erfindungsgemäße Induktionsheizspule weist eine erste innere Wicklung W_1 und wenigstens eine weitere äußere Wicklung W_2 auf. Dabei weist die innere Wicklung W_1 einen Radius r_1 und die äußere Wicklung W_2 einen Radius r_2 auf. r_1 ist dabei kleiner als

r_2 . Weiterhin liegt die innere Wicklung W_1 innerhalb der äußeren Wicklung W_2 . Die Wicklungen W_1 und W_2 sind an einer Stelle 100 an einem Ende der Spule verbunden, sodass an dieser Stelle 100 ein Stromfluss i durch die Spule sein Vorzeichen in z -Richtung wechselt.

Fig.3



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine verbesserte Induktionsheizspule, welche insbesondere geeignet zum Heizen von Niedertemperaturplasmen ist.

Stand der Technik

[0002] Elektromagnetische Spulen sind in der Elektrotechnik Wicklungen und Wickelgüter, die geeignet sind, ein Magnetfeld zu erzeugen oder zu detektieren. Sie sind dabei oftmals Teil eines elektrischen Bauelementes oder Gerätes, wie beispielsweise eines Transformators, Relais, Elektromotors oder Lautsprechers. Ein wichtiges Anwendungsfeld von Spulen ist der Bereich des induktiven Heizens von elektrisch leitfähigen Materialien. Spulen umfassen üblicherweise mindestens eine Wicklung eines Stromleiters. Dieser besteht beispielsweise aus Draht, Kupferlackdraht, versilbertem Kupferdraht oder Hochfrequenzlitze. Spulen sind oftmals oft auf einen Spulenkörper (Spulenträger) gewickelt. Der Spulenkörper kann entweder massiv oder hohl sein. Hohle Spulenkörper können einen Kern aus einem anderen Material (z.B. aus einem weichmagnetischen Material) umfassen. Die Windungsanordnung und -form, der Drahtdurchmesser, das Wickel- und das Kernmaterial legen den Wert der Induktivität und weitere (Güte-)Eigenschaften der Spule fest.

[0003] Das Wirkprinzip von Spulen basiert darauf, dass wenn diese vom elektrischen Wechselstrom durchflossen werden, sich in ihrem Inneren ein magnetisches Feld B aufbaut. Dieses bewirkt ein elektrisches Feld E , welches eine Beschleunigung der Ladungsträger im Spuleninneren bewirkt. Dieses Feld umfasst im Wesentlichen die zwei Komponenten E_ϕ und E_z , wenn es sich bei der Spule um eine Zylinderspule handelt. Die erste Komponente E_ϕ bewirkt, dass die Ladungsträger auf einer Kreisbahn senkrecht zur Spulenhauptachse beschleunigt werden. Die Spulenhauptachse wird auch als z-Achse bezeichnet. Die Ebene dieser senkrecht zur Spulenhauptachse wird dabei auch als in der Azimutalebene bezeichnet. Die zweite Komponente E_z bewirkt eine Beschleunigung der Ladungsträger entlang der Spulenhauptachse.

[0004] Die elektrischen Eigenschaften von Spulen werden stark durch die Art und Weise bestimmt, wie der elektrische Leiter aus dem sie bestehen aufgewickelt ist. Wichtig ist hierbei die dabei entstehende geometrische Struktur aus einer oder mehreren Windungen oder Lagen. Diese Struktur wird auch als Wicklung bezeichnet.

[0005] In langen Spulen (Fig.1), deren Länge l üblicherweise mindestens um einen Faktor 10 größer ist als ihr Durchmesser, verlaufen die Feldlinien des Magnetfeldes der Spule im Wesentlichen parallel. Daraus folgt, dass das aus dem Magnetfeld resultierende elektrische Feld, im Wesentlichen nur eine Komponente E_ϕ umfasst. Die Komponente E_z und damit die Beschleunigung entlang der Spulenhauptachse kann dadurch vernachlässigt

werden. Daraus folgt, dass die Ladungsträger auf einer festen Kreisbahn beschleunigt werden und sich nicht in einer schraubenförmigen Bewegung in Richtung Spulenhauptachse bewegen.

[0006] In vielen Anwendungsfällen gilt diese Idealisierung nicht. In diesen Fällen kann die Komponente E_z des elektrischen Feldes nicht vernachlässigt werden. Dies gilt insbesondere für kurze Spulen, deren Länge nicht wesentlich größer ist als ihr Durchmesser. Diese umfassen oftmals nur wenige Windungen. In diesen Fällen erfahren Ladungsträger im Inneren der Spule auch eine Beschleunigung entlang der z-Achse. (Fig. 3)

[0007] Spulen, die als Induktionsheizspulen dienen, umfassen üblicherweise nur wenige Wicklungen und sind als kurz anzusehen. Das bedeutet, dass Ladungsträger im Spuleninneren üblicherweise eine nicht zu vernachlässigende Beschleunigung in z-Richtung erfahren. Besteht das zu erheizende Material im Spuleninneren aus kondensierter Materie d.h. es liegt als Feststoff oder Flüssigkeit vor ist die Beschleunigung entlang der z-Achse irrelevant, da die Ladungsträger dieser Materialien die Spule nicht verlassen können.

[0008] Dies ist nicht der Fall, wenn Plasmen, insbesondere auch Niedertemperaturplasmen induktiv erzeugt und erhitzt werden. Hier sind die Ladungsträger frei beweglich. Dies ist beispielsweise bei Radiofrequenz-Ionentriebwerken (RIT) der Fall.

[0009] Hier können die Ladungsträger die Induktionsheizspule verlassen und damit dem Heizprozess verloren gehen. Dadurch sinkt der Wirkungsgrad des Heizprozesses. Bislang wird der Einfluss der entlang der Spulenhauptachse entweichenden und damit nicht zur Heizung beitragenden Ladungsträger durch eine Erhöhung der eingespeisten elektromagnetischen Energie gelöst. Diese Lösung ist aber energieaufwändig und senkt die Effizienz der Induktionsheizspule.

Aufgabe

[0010] Hiervon ausgehend liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, eine Induktionsheizspule zum induktiven Heizen bereitzustellen, welche eine verringerte Beschleunigung der in ihr befindlichen Ladungsträger entlang der z-Achse aufweist.

Lösung der Aufgabe

[0011] Gelöst wird diese Aufgabe durch eine Vorrichtung mit den Merkmalen des Anspruchs 1. Vorteilhafte Ausführungsformen und Weiterbildungen der vorliegenden Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen.

[0012] Die erfindungsgemäße Induktionsheizspule, weist eine erste innere Wicklung W_1 und wenigstens eine weitere äußere Wicklung W_2 auf. Dabei weist die innere Wicklung W_1 einen Radius r_1 und die äußere Wicklung W_2 , einen Radius r_2 auf (Fig. 3). r_1 ist dabei kleiner als r_2 . Weiterhin liegt innere Wicklung W_1 innerhalb der äußeren Wicklung W_2 . Die Wicklungen W_1 und W_2 sind an

einer Stelle 100 an einem Ende der Spule verbunden, sodass an dieser Stelle 100 ein Stromfluss i durch die Spule seine axiale Richtung in z -Richtung wechselt.

[0013] Das bewirkt, dass sich die Komponenten E_z und E_z des resultierenden elektrischen Feldes entlang der z -Achse aufheben. Durch die Überlagerung der Ströme an jeder Stelle, wird zudem eine größere Feldstärke E_ϕ bewirkt. Das heißt zum einen, dass weniger Ladungsträger beim induktiven Heizen die Spule entlang der z -Achse verlassen und zum anderen, dass mit derselben Stromstärke eine höhere Heizleistung erreicht wird.

[0014] Die Radien r_1 und r_2 der Wicklungen W_1 und W_2 liegen bei bevorzugt 10 mm bis 100 mm.

[0015] Die Länge der Induktionsheizspule beträgt bevorzugt zwischen 10 mm und 100 mm.

[0016] Die Windungszahl N der Wicklungen W_1 und W_2 der Induktionsheizspule liegt vorzugsweise bei 3 bis 20, besonders bevorzugt bei 5 bis 10. Spulen mit kleineren Windungszahlen weisen eine größere z -Komponente des resultierenden elektrischen Feldes auf. Bei größeren Windungszahlen sinkt durch den größeren elektrischen Widerstand der Wirkungsgrad der Induktionsheizspule.

[0017] In besonders vorteilhaften Ausführungsarten der Induktionsheizspule weist diese eine rechteckige, runde oder ellipsoide Form auf. Das erlaubt eine Anpassung der Spule an den Spulenkörper. Des Weiteren führt so eine regelmäßige Form der Spule zu einem homogenen Feld im Spuleninneren.

[0018] Eine Verwendung der erfindungsgemäßen Induktionsheizspule liegt in induktiv oder induktiv-kapazitiv angeregten Ionen- oder Elektronenquellen. Hier dient sie der Einkopplung von elektromagnetischer Energie.

[0019] Bei diesen Quellen befindet sich ein Gas (z.B. Xenon) und hochfrequent anzuregende Elektronen innerhalb eines isolierten Gefäßes, des Entladungsgefäßes. Um das Entladungsgefäß ist eine Induktionsheizspule zur Einspeisung einer zur Plasma-Anregung notwendigen Hochfrequenz-Energie gewickelt. Aus dem Stromfluss in der Spule resultiert ein Magnetfeld, welches Elektronen im Spuleninneren beschleunigt. Diese Elektronen stoßen nun auf die im Entladungsgefäß befindlichen Gasatome oder Gasmoleküle und ionisieren diese.

[0020] Durch die Dämpfung der elektrischen Feldkomponente, die parallel zur z -Achse wirkt, wird das induktivgekoppelte Plasma effizienter geheizt, da verhältnismäßig mehr Feldenergie in die azimuthale Ebene induziert wird und nicht durch die Beschleunigung entlang der z -Achse verloren geht. Dies führt dazu, dass die durch die elektrischen Felder beschleunigten Elektronen auf Spiralbahnen gezwungen werden, deren axiale Steigung immer geringer wird. Letzteres bewirkt, dass ein größerer Anteil der beschleunigten Elektronen innerhalb der Spule bleibt und bei der Heizung des Plasmas mitwirkt.

[0021] In einer weiteren Ausführungsform umfasst ein Radiofrequenz-Ionentriebwerk (RIT) die erfindungsgemäße Induktionsheizspule. Bei einem Radiofrequenz-Io-

nen-Triebwerk befindet sich ein hochfrequent anzuregendes Plasma innerhalb eines isolierten Gefäßes, des sog. Entladungsgefäßes. Um das Entladungsgefäß ist eine oft auch als Koppelspule bezeichnete Induktionsheizspule zur Einspeisung einer zur Plasma-Anregung notwendigen Energie gewickelt. Das Plasma befindet sich damit innerhalb der Spule. Wenn ein Ionentriebwerk die erfindungsgemäße Induktionsspule umfasst, ist sie effizienter, da nahezu alle Elektronen in der Plasmaentladung zur Erhaltung dieser beitragen, da sie gehindert werden, die geheizten Bereiche zu verlassen.

[0022] Die erfindungsgemäße Induktionsheizspule führt dazu, dass sich die axial induzierten Felder in z -Richtung aufgrund der Symmetrie nahezu aufheben, da derselbe Strom sowohl in positiver als auch in negativer z -Richtung fließt. Das heißt, dass die Komponente E_z des resultierenden elektrischen Feldes gedämpft wird. Da der Strom durch beide Wicklungen der Induktionsheizspule parallel fließt, überlagern sich gleichzeitig die resultierenden Feldkomponenten E_ϕ und werden damit verstärkt. Zusätzlich wird bedingt durch die steigende Spuleninduktivität L , eine geringere Stromstärke I zur Bereitstellung des magnetischen Feldes benötigt. Dies begünstigt das thermische Verhalten der Spule, da kleinere Ströme zu weniger Ohm'scher Verlustleistung führen. Dies ist trotz nahezu doppelter Länge des stromdurchflossenen Leiters der Spule der Fall, da sich die Verlustleistung zu $P = I^2 R$, linear zum Widerstand R und somit zur Länge des stromdurchflossenen Leiters wächst, aber gleichzeitig quadratisch mit der kleineren benötigten Stromstärke I sinkt.

[0023] Der Radius der äußeren Wicklung W_2 ist größer als der Radius der inneren Wicklung W_1 , dadurch ist das durch W_2 induzierte Feld betragsmäßig etwas kleiner als das durch W_1 induzierte. Dennoch ist die Komponente E_z des resultierenden elektrischen Feldes vernachlässigbar klein.

Ausführungsbeispiel:

[0024] Ein Ausführungsbeispiel ist ein Ionentriebwerk umfassend die erfindungsgemäße Spule als Induktionsheizspule.

[0025] Hierzu wurden Vergleichsmessungen an einem ersten unmodifizierten Ionentriebwerk RIM-4 mit einer Induktionsspule mit konventioneller Wicklung und einem weiteren modifizierten Ionentriebwerk RIM-4 mod. mit erfindungsgemäßer Induktionsheizspule jeweils bei einem Ionenstrom $I_b = 10$ mA bei einem Volumenstrom des verwendeten Gases von 0,2 sccm vorgenommen. Die Vergleichswerte der elektrischen Parameter sowie der Leistungsdaten sind hierbei Fig. 5 zu entnehmen. Der Unterschied zwischen unmodifiziertem und modifiziertem Triebwerk hinsichtlich der benötigten Spulenleistung P_s beträgt 1.5 W bei einer Gesamtleistung P_g von 15,23 W. Damit ist das Triebwerk, welches die erfindungsgemäße Induktionsheizspule umfasst, ca. 10 % effizienter.

[0026] Es wird weniger Leistung für das Heizen des

Plasmas benötigt, da weniger Elektronen verloren gehen. Ebenfalls von hoher Bedeutung ist, dass mit etwa der halben Stromamplitude I_c gearbeitet werden kann, was auch zu einer besseren elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) führt. So werden die anderen Triebwerkskomponenten weniger durch die Induktionsheizspule beeinflusst.

Kurze Beschreibung der **Abbildungen**

[0027]

Fig. 1 zeigt eine lange Spule. Die Feldlinien des inneren Magnetfeldes sind hier über einen weiten Bereich der Länge l parallel. Dies bewirkt, dass auf die Ladungsträger im Inneren nur in den Randbereichen der Spule eine Beschleunigung entlang der z-Achse erfolgt.

Fig. 2 zeigt eine typische kurze Spule mit wenigen Windungen. In dieser Art von Spulen erfahren die Ladungsträger eine Beschleunigung entlang der z-Achse. Im Fall eines induktiv geheizten Plasmas innerhalb der Spule würden diese Ladungsträger die Spule verlassen.

Fig. 3 zeigt die erfindungsgemäße Induktionsheizspule. In dieser Spule heben sich durch die gegenläufige Wicklung die auf die Ladungsträger wirkenden Kräfte entlang der z-Achse auf. Dadurch bleiben auch frei bewegliche Ladungsträger in der Spule. Aufgrund leicht unterschiedlicher Radien der beiden Spulen heben sich die Felder nicht vollständig auf. In guter Näherung kann allerdings davon ausgegangen werden, dass die Ladungsträger nahezu keine Beschleunigung in z-Richtung erfahren und die Elektronen auf der Achse verschwinden.

Fig. 4 zeigt in Teilabbildung 4a die axial in z-Richtung induzierte elektrische Feldstärkenkomponente E_z einer konventionellen einfach gewickelten Induktionsheizspule in einem Ionentriebwerk und in Teilabbildung 4b die axial in z-Richtung induzierte elektrische Feldstärkenkomponente einer erfindungsgemäßen Spule.

Fig. 5 zeigt die Betriebsparameter des Ionentriebwerkes RIM-4 und des modifizierten Ionentriebwerkes RIM-4 mod. η_m bezeichnet hier den Massenwirkungsgrad, η_{el} den elektrischen Wirkungsgrad, R_s den elektrischen Widerstand der Induktionsspule, H_s die magnetische Feldstärke der Spule, ζ den Kopplfaktor und t die Übertragungseffizienz.

dass diese eine erste innere Wicklung W_1 und wenigstens eine weitere äußere Wicklung W_2 aufweist, wobei die innere Wicklung W_1 einen Radius r_1 aufweist und die äußere Wicklung W_2 einen Radius r_2 aufweist, wobei r_1 kleiner als r_2 ist, wobei die innere Wicklung W_1 innerhalb der äußeren Wicklung W_2 liegt und die Wicklungen W_1 und W_2 an einem Ende der Spule an einer Stelle (100) verbunden sind, so dass an dieser Stelle (100) ein Stromfluss i durch die Spule seine Flussrichtung bezogen auf die z-Achse der Induktionsheizspule wechselt.

2. Induktionsheizspule gemäß Anspruch 1 **dadurch gekennzeichnet, dass** die Radien r_1 und r_2 zwischen 10 mm und 100 mm betragen.
3. Induktionsheizspule gemäß Anspruch 1 oder 2 **dadurch gekennzeichnet, dass** die Länge der Induktionsheizspule zwischen 10 mm und 100 mm beträgt.
4. Induktionsheizspule gemäß einem der Ansprüche 1 bis 3 **dadurch gekennzeichnet, dass** diese eine rechteckige, runde oder ellipsoide Form aufweist.
5. Induktionsheizspule gemäß einem der Ansprüche 1 bis 4 **dadurch gekennzeichnet, dass** die Windungszahl der Wicklungen W_1 und W_2 zwischen 3 bis 20 liegt.
6. Radiofrequenz-Ionentriebwerk (RIT) **dadurch gekennzeichnet, dass** es eine Induktionsheizspule gemäß einem der vorigen Ansprüche umfasst.
7. Verwendung einer Induktionsheizspule gemäß einem der Ansprüche 1 bis 5 zur Einkopplung von elektromagnetischer Energie in einer induktiv oder induktiv-kapazitiv angeregte Ionen- oder Elektronenquelle.

Patentansprüche

1. Induktionsheizspule **dadurch gekennzeichnet,**

Fig. 1

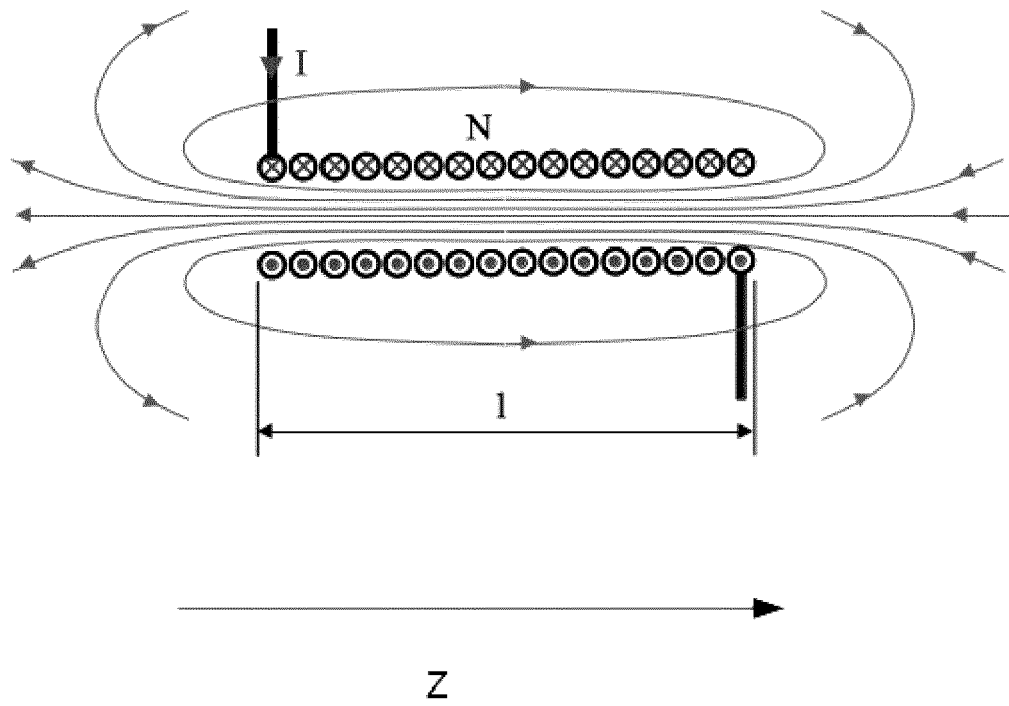


Fig. 2

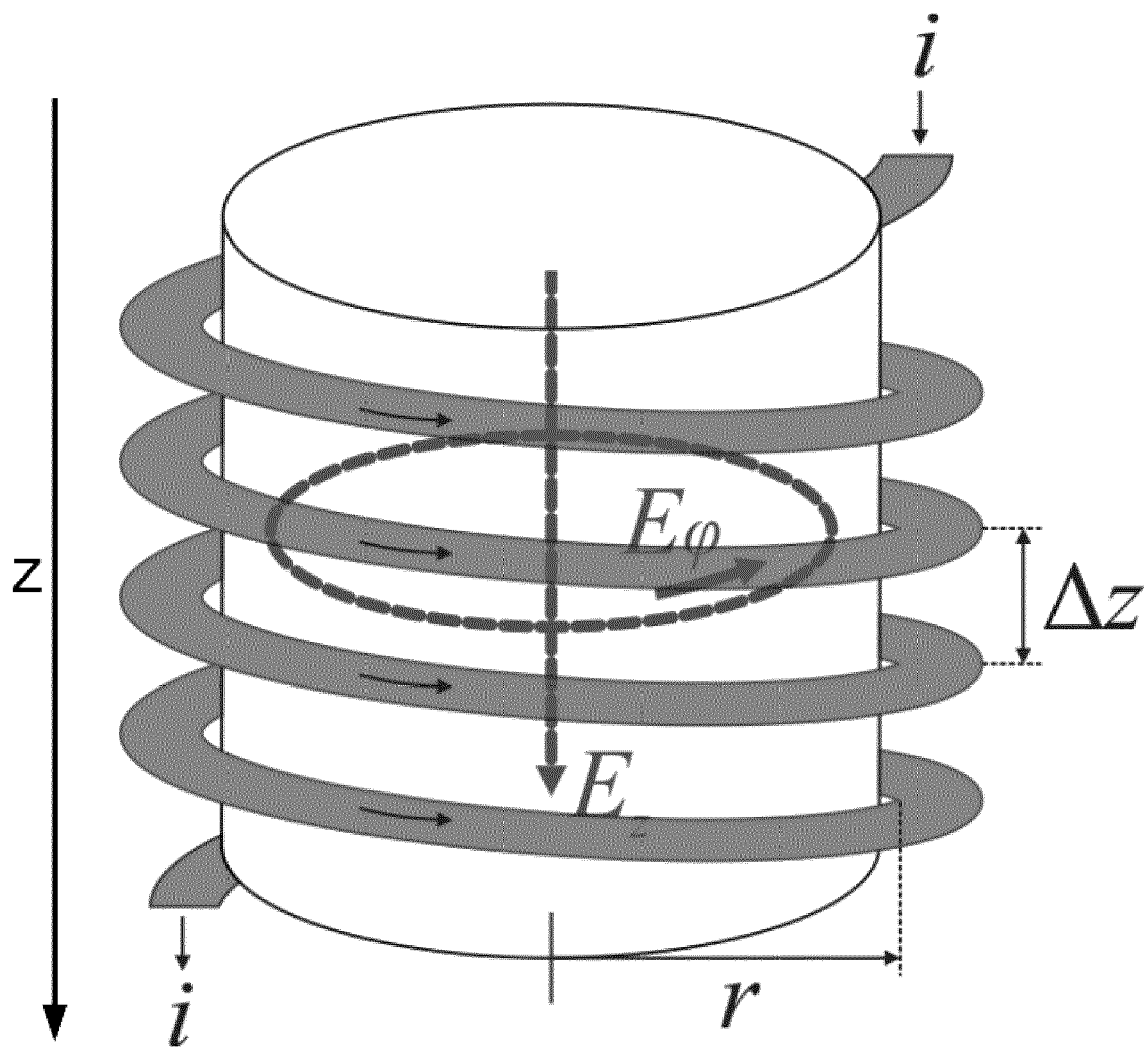


Fig.3

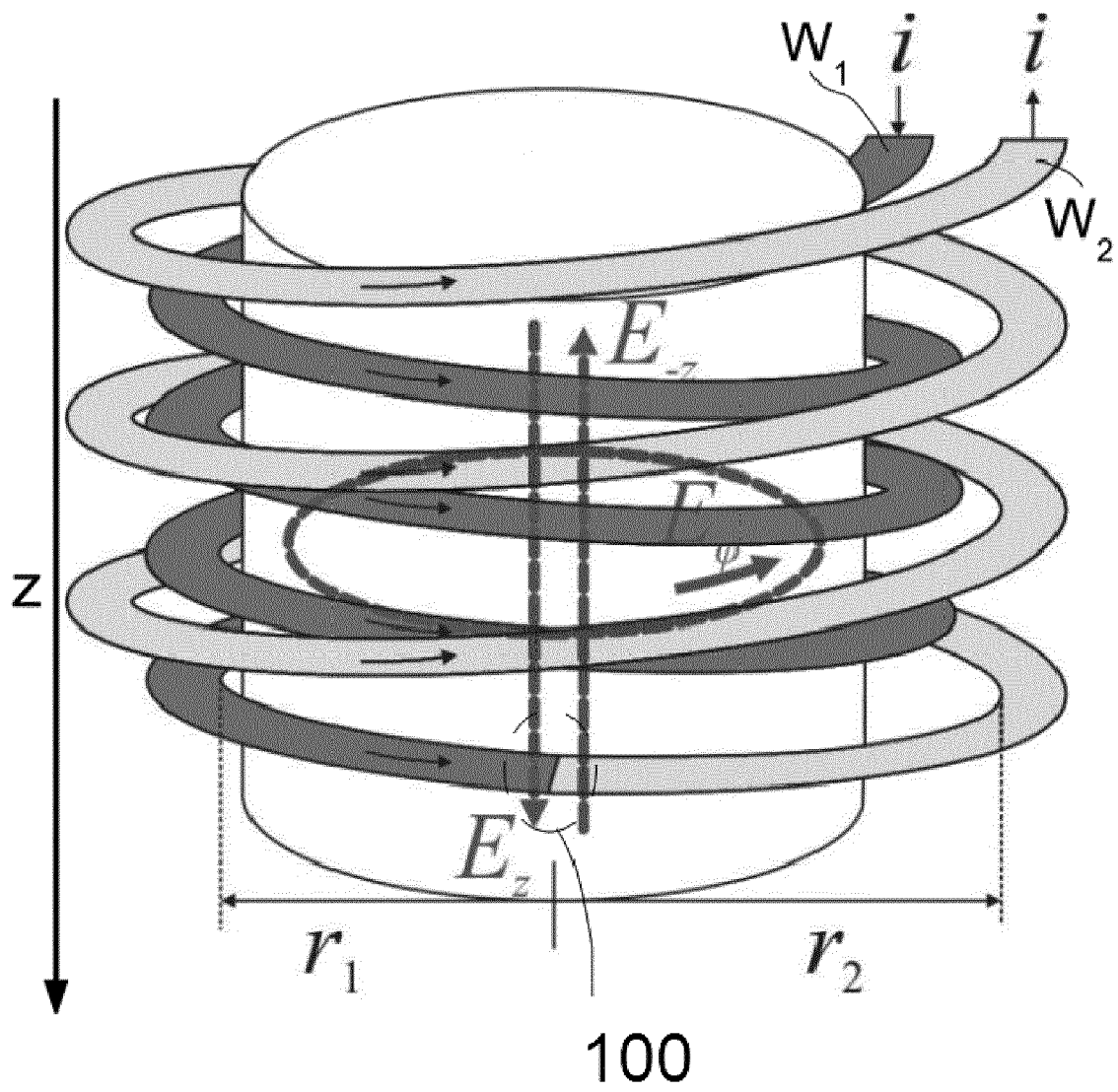
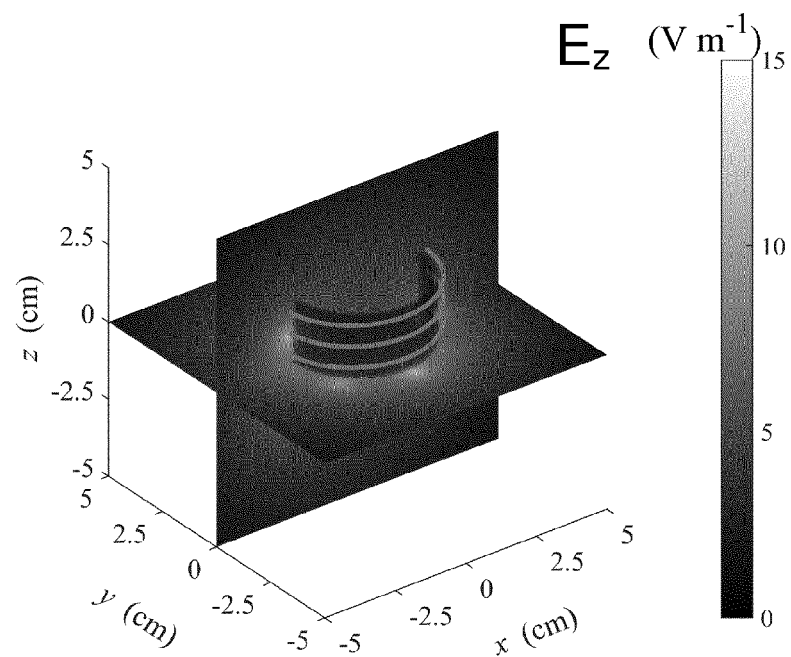
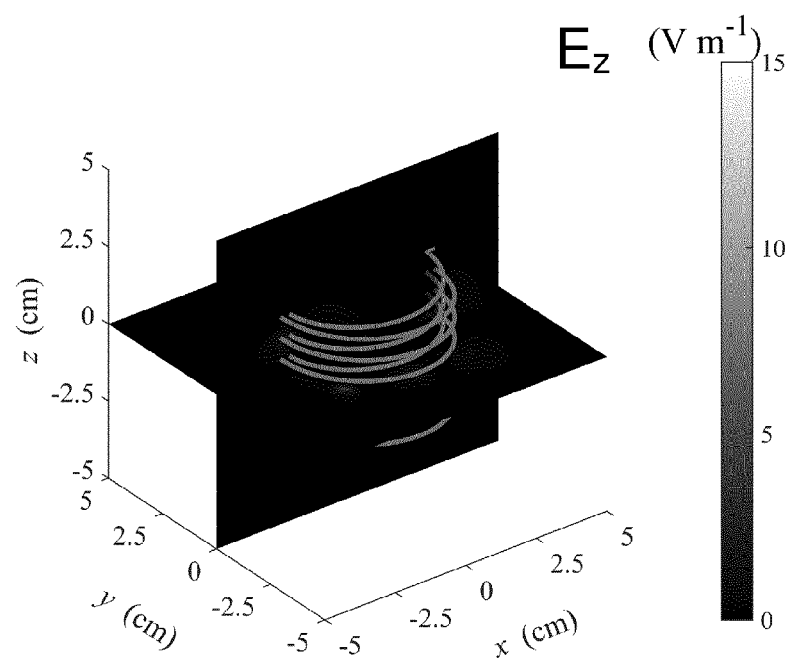


Fig. 4



(a)



(b)

Fig. 5

Triebwerk	η_m	η_{el}	R_s (Ω)	L_s (μH)	$\tilde{I}_c$ (A)	P_s (W)	ζ	ι
RIM-4	0.70	0.46	0.92	1.16	5.77	15.23	0.43	0.95
RIM-4 mod.	0.70	0.48	3.20	4.72	2.94	13.82	0.43	0.97



EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

 Nummer der Anmeldung
EP 15 18 5774

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	EP 1 662 848 A2 (SAMSUNG ELECTRONICS CO LTD [KR]) 31. Mai 2006 (2006-05-31) * Zusammenfassung * * Absätze [0002] - [0009], [0039] - [0052] * * Abbildungen 1-4 *	1-7	INV. H05B6/10 H01J27/18 H05B6/36 F03H1/00
X	WO 2015/025022 A1 (CONTINENTAL AUTOMOTIVE GMBH [DE]) 26. Februar 2015 (2015-02-26) * Zusammenfassung * * Seite 8, Zeile 27 - Seite 9, Zeile 16 * * Abbildungen 5,6,8 *	1-5	
A	EP 0 261 338 A2 (LEYBOLD HERAEUS GMBH & CO KG [DE]) 30. März 1988 (1988-03-30) * Zusammenfassung * * Spalte 7, Zeile 22 - Spalte 8, Zeile 4 * * Abbildungen 1-4 *	1-7	
A	DE 20 53 929 A1 (MESSERSCHMITT BOELKOW BLOHM) 22. Juni 1972 (1972-06-22) * Seite 1, Zeilen 1-7 * * Abbildung 1 * * Seite 7, Zeilen 10-24 *	1-7	RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC) H05B H01J F03H
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort München		Abschlußdatum der Recherche 4. März 2016	Prüfer de la Tassa Laforgue
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1503 03.92 (P04C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
 ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 15 18 5774

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.
 Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

04-03-2016

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
EP 1662848 A2	31-05-2006	EP 1662848 A2	31-05-2006
		JP 2006156394 A	15-06-2006
		KR 20060059405 A	02-06-2006
		US 2006113928 A1	01-06-2006
WO 2015025022 A1	26-02-2015	DE 102013216668 A1	26-02-2015
		WO 2015025022 A1	26-02-2015
EP 0261338 A2	30-03-1988	DE 3632340 A1	31-03-1988
		EP 0261338 A2	30-03-1988
		JP S63184233 A	29-07-1988
		US 4849675 A	18-07-1989
DE 2053929 A1	22-06-1972	DE 2053929 A1	22-06-1972
		US 3757518 A	11-09-1973

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82