

(19)



(11)

**EP 2 103 198 B1**

(12)

**EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:  
**21.10.2015 Patentblatt 2015/43**

(51) Int Cl.:  
**H05H 1/54 (2006.01) F03H 1/00 (2006.01)**

(21) Anmeldenummer: **07846645.5**

(86) Internationale Anmeldenummer:  
**PCT/EP2007/009952**

(22) Anmeldetag: **17.11.2007**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:  
**WO 2008/071287 (19.06.2008 Gazette 2008/25)**

(54) **PLASMABESCHLEUNIGERANORDNUNG**

PLASMA ACCELERATOR ARRANGEMENT

DISPOSITIF ACCELERATEUR DE PLASMA

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MT NL PL PT RO SE SI SK TR**

- **KOCH, Norbert**  
89073 Ulm (DE)
- **KORNFELD, Günter**  
89275 Elchingen (DE)

(30) Priorität: **15.12.2006 DE 102006059264**

(74) Vertreter: **Baur & Weber Patentanwälte**  
**Rosengasse 13**  
**89073 Ulm (DE)**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:  
**23.09.2009 Patentblatt 2009/39**

(73) Patentinhaber: **Thales Electronic Systems GmbH**  
**89077 Ulm (DE)**

(56) Entgegenhaltungen:  
**DE-A1- 10 014 033 DE-A1- 10 014 034**  
**DE-A1- 10 153 723 DE-B3- 10 300 776**  
**US-A- 5 189 446**

(72) Erfinder:  
• **HARMANN, Hans-Peter**  
**89077 Ulm (DE)**

**EP 2 103 198 B1**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft eine Plasmabeschleunigeranordnung zur Erzeugung eines gerichteten Plasmastrahls.

**[0002]** Plasmabeschleunigeranordnungen sind insbesondere von Bedeutung in Antrieben von Raumflugkörpern. Bekannt sind beispielsweise elektrothermische Plasmabeschleuniger, welche durch elektrische Entladungen Gaspulse ausstoßen. Andere gepulste Plasmabeschleuniger erzeugen einen Lichtbogen in einer von einem Magnetfeld durchsetzten Kammer. Gleichfalls gepulst arbeiten Plasmatruster mit magnetischer Beschleunigung eines konzentrierten Plasmarings.

**[0003]** Eine bedeutende Gruppe unter den Plasmabeschleunigern bilden die Ausführungen mit Beschleunigung von Ionen durch ein elektrostatisches Feld, wobei durch Ionisation eines Arbeitsgases in einem als Plasmakammer oder Ionisationskammer bezeichneten, nach einer Austrittsseite offenen Hohlraum Ionen erzeugt und in einem elektrostatischen Feld beschleunigt werden.

**[0004]** Gebräuchlich sind insbesondere sogenannte Hall-Beschleuniger mit ringförmiger Plasmakammer und einem Magnetfeld, welches im wesentlichen radial durch die ringförmige Plasmakammer verläuft, sowie einen elektrostatischem Beschleunigungsfeld zwischen einer Anode in der Plasmakammer und einer außerhalb der Plasmakammer angeordneten Kathode, welche auch als Elektronenquelle dient.

**[0005]** Eine andere Gruppe von Plasmabeschleunigern besitzt im Unterschied zu den ringförmigen Geometrien der Hall-Beschleuniger Kammergeometrien mit einfach zusammenhängender, insbesondere kreisförmiger Querschnittsfläche in einer Schnittebene quer zur Strahlrichtung des Plasmastrahls. Die parallel zur Strahlrichtung in Längsrichtung verlaufende Mittellängsachse der Plasmakammer liegt dabei innerhalb der Querschnittsfläche. Der Plasmastrahl bildet sich in einem Bereich um die Mittellängsachse der Kammer aus. Die Querschnittsfläche ist typischerweise in Längsrichtung im wesentlichen gleichbleibend, weshalb Beschleuniger mit solcher Geometrie auch als zylindrische Beschleuniger bezeichnet sind.

**[0006]** Unter den zylindrischen Beschleunigern weisen die Beschleuniger des Kaufmann-Typs am Ausgang der Plasmakammer in Strahlrichtung beabstandete Gitter auf, zwischen welchen eine elektrische Spannung liegt, welche durch die Gitter tretende Ionen beschleunigt.

**[0007]** Ein davon grundlegend verschiedener zylindrischer Beschleuniger ist aus der US 6 448 721 B2 bekannt. Dort ist u. a. eine Magnetanordnung mit zwei Magnetspulen vorgesehen, welche ein Magnetfeld in der Kammer erzeugen, welches im Anodenbereich von der Mittellängsachse der Plasmakammer ausgehend zu einem die Plasmakammer ringförmig umgebenden Magnetpol führt und im Bereich des Ausgangs der Plasmakammer die Charakteristik des Feldes einer Ringspule

besitzt.

**[0008]** Eine ähnliche Geometrie mit einem ersten zentralen Magnetpol am Fuße einer zylindrischen Plasmakammer und einem zweiten die Wand der Plasmakammer umgebenden Magnetpol ist aus "Plume Measurements and Miniaturization of the Hall Thrusters with Circular Cross-sectional Discharge Chambers" von Shirasaki und Tahara, 29th Int. Electric Propulsion Conf., Princeton, 2005 bekannt. Der ringförmige Magnetpol kann durch Weicheisenmagnetschuhe oder durch radial magnetisierte Permanentmagnetsegmente gebildet sein.

**[0009]** Eine wiederum andere Ausführung eines zylindrischen Thrusters ist in DE 101 30 464 A1 beschrieben und weist eine Magnetanordnung wenigstens zwei in Längsrichtung aufeinander folgenden Polwechseln ringförmig die Plasmakammer umgebenden Magnetringanordnungen und/oder im Bereich des Ausgangs der Plasmakammer einen die Plasmakammer umgebenden Permanentmagnetring mit in Längsrichtung beabstandeten Magnetpolen auf. Plasma-Beschleuniger-Anordnungen mit ähnlicher Magnetanordnung sind in der DE 101 53 723 A1 beschrieben. Der Permanentmagnetring erzeugt eine besondere Form des Magnetfelds. In der DE 103 00 776 B3 ist eine Ionenbeschleuniger-Anordnung mit einer vergleichbaren Magnetanordnung beschrieben. Die Kammerwände sind abschnittsweise durch Wölbung zur Mitte der Kammer hin dem Verlauf des Magnetfelds angepasst.

**[0010]** Die ringförmigen Kammergeometrien bilden zwischen innerer und äußerer Kammerwand einen ringförmigen Kanal, der von einem radialen Magnetfeld durchsetzt ist, durch welchen sich Elektronen als ringförmige Driftströme bewegen. Die zylindrischen Kammergeometrien weisen davon wesentlich verschiedene Magnetfelder und Bewegungsmuster der Elektronen und Ionen auf, so dass typischerweise die Konstruktionsmerkmale zwischen elektrostatischen Thrustern unterschiedlicher Kammergeometrien nicht austauschbar sind. In der DE 100 14 033 A1 und DE 100 14 034 A1 sind Plasma-Beschleuniger-Anordnungen mit ringförmiger Kammergeometrie und mit innerer und äußerer Magnetanordnung mit jeweils in Längsrichtung beabstandeten Magnetpolen bekannt, bei welcher entgegen gesetzt gerichtete Ringdriftströme entstehen. Primärelektronen sind als gebündelter Hohlstrahl von der Seite der Anode in die Plasmakammer eingeleitet oder von einer außen liegenden Kathode zugeführt.

**[0011]** Die Form des Magnetfelds ist typisch für die verschiedenen Funktionsweisen der unterschiedlichen Bauformen. In der US 6 448 721 B2 ist angegeben, dass mittels Zwischenelektroden ein Potentialgefälle zwischen Magnetfeldlinien erzeugt werden kann und ein solches Potentialgefälle nahe an eine ringförmige Ionisationszone bei der Anode gelegt werden kann. Ferner soll die Ringspule um den Ausgang eine Fokussierung des Plasmastrahls unterstützen.

**[0012]** In der US 5 189 446 A ist ein Plasmagenerator

zur Oberflächen-Bearbeitung von Halbleiter-Wafern beschrieben. Eine elektrostatische Beschleunigung von Ionen ist nicht vorgesehen.

**[0013]** Die US 2 956 666 beschreibt einen elektrostatischen Beschleuniger mit einem Beschleunigungsgitter am Ausgang einer Plasmakammer und einem in Strahlrichtung verlaufenden Magnetfeld. In der GB 2 295 485 A ist eine Ionenbeschleunigeranordnung mit einem Beschleunigungsgitter beschrieben, welchem in Strahlrichtung ein Bremsgitter nachgeschaltet ist. Das von einer Mehrzahl langgestreckter Spulen an der Außenseite der Ionisationskammer Magnetfeld verläuft in der Ionisationskammer von einem zentralen Magnetpol bei einer Kathode in Richtung eines die Plasmakammer umgebenden zweiten Magnetpol schräg nach außen.

**[0014]** Die US 5 847 493 zeigt einen Hall-Plasmabeschleuniger mit einer Magnetanordnung, welche zusätzlich zu den Ringspulen für die Erzeugung des im wesentlichen radialen Magnetfelds durch die ringförmige Kammer am Außenumfang der Kammer verteilt mehrere weitere Spulen aufweist, mittels welcher die Drehsymmetrie des Magnetfelds gezielt gestört und die mittlere Strahlrichtung des Plasmastrahls beeinflusst werden kann.

**[0015]** Bei einer Ionenquelle nach der US 6 060 836 ist eine Plasmakammer kurzer Länge von Permanentmagneten umgeben, deren Pole radial beabstandet sind und die ein cusp-Feld in der Plasmakammer erzeugen. Ionen werden mittels eines dem Ausgang der Plasmakammer überspannenden Elektrode aus der Plasmakammer extrahiert.

**[0016]** Die GB 2 295 485 A zeigt eine zylindrische Plasmakammer, welche eine ringförmige Anode bei der Kammerwand und ein den Kammerausgang überspannendes Beschleunigungsgitter enthält. Ein Magnetfeld verläuft von einem inneren Pol bei der Achse der Kammer schräg nach außen in Richtung der Anode.

**[0017]** In der US 3 735 591 ist eine Anordnung mit einer Spulenordnung um eine zylindrische Anode, welche die Wand einer Plasmakammer bildet beschrieben, wobei ein im wesentlichen axiales Magnetfeld erzeugt wird, in welchem ein innerhalb der Plasmakammer angeordneter zentraler Zylinder einen Polschuh und ein Ring am Ausgang der Plasmakammer einen anderen Polschuh bildet.

**[0018]** In der DE 12 22 589 ist ein Plasmabeschleuniger beschrieben, bei welchem in eine Ionisationskammer ein beschleunigter Elektronenstrahl durch eine Anode hindurch eingeleitet und durch ein axiales Magnetfeld einer Ringspule auf der Achse geführt ist. Ein axiales elektrostatisches Feld beschleunigt erzeugte Ionen in Richtung einer Ausgangsöffnung der Plasmakammer. Eine Anordnung mit einem von Anodenseite zugeführten Elektronenstrahls ist auch aus der DE 198 28 704 A1 bekannt, bei welcher auch eine Erzeugung des strahlführenden Magnetfelds durch eine Folge von Permanentmagnetringen mit abwechselnder Polung vorgesehen ist.

**[0019]** Die US 6 448 721 zeigt einen Plasmabeschleu-

niger mit zylindrischer Kammergeometrie, bei welchem eine Spulenordnung ein von einem inneren Magnetpol bei der Längsachse der Kammer schräg nach außen zu einem ringförmigen zweiten Magnetpol führendes Magnetfeld erzeugt. Eine weitere die Kammer umgebende Ringspule kann zur Verstärkung radialer Magnetfeldkomponenten vorgesehen sein. Eine Beschleunigung von Ionen erfolgt elektrostatisch in einem Feld zwischen einer Anode am Fuß der Kammer und einer seitlich außerhalb der Kammer angeordneten Kathode.

**[0020]** Die DE 101 30 464 A1 beschreibt eine Plasmabeschleuniger-Anordnung, bei welcher eine mehrstufige Magnetanordnung mit in Längsrichtung beabstandeten aufeinanderfolgenden alternierenden Polwechseln vorgesehen ist, welche bevorzugt Permanentmagnetringe mit in Längsrichtung entgegen gesetzt angeordneten Magnetpolen enthält.

**[0021]** Plasmabeschleuniger mit zylindrischer Kammergeometrie sind vorteilhaft von den Querabmessungen der Kammer.

**[0022]** Der vorliegenden Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen solchen Plasmabeschleuniger weiter zu verbessern.

**[0023]** Die Erfindung ist im unabhängigen Anspruch beschrieben. Die abhängigen Ansprüche enthalten vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung.

**[0024]** Für die Beschreibung der Erfindung ist anstelle der zylindrischen Kammergeometrie der Begriff einer Kammergeometrie mit einfach zusammenhängender Querschnittsfläche der Plasmakammer gewählt, da vorteilhafte Ausführungen der Erfindung auch sich in Strahlrichtung erweiternde Kammergeometrien einschließen. Die einfach zusammenhängende Querschnittsfläche ist vorzugsweise eine Kreisfläche. Einfach zusammenhängende ebene Querschnittsflächen besitzen hier eine ununterbrochene Berandungslinie, wogegen die ringförmigen Querschnittsflächen der Hall-Konfigurationen mit zentralem Innenkörper je eine innere und eine äußere ununterbrochene Berandungslinie aufweisen.

**[0025]** Den verschiedenen Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung gemeinsam ist die Form des elektrostatischen Beschleunigungsfeldes, welches zwischen einer in Strahlrichtung bei oder vorzugsweise nach dem Ausgang der Plasmakammer liegenden Kathode und einer dem Ausgang der Plasmakammer entgegen gesetzt am Fuß der Plasmakammer angeordneten Anode innerhalb der Plasmakammer im wesentlichen parallel zur in Längsrichtung verlaufenden Mittelellipsenachse der Plasmakammer verläuft. Allen Ausführungsformen gemeinsam ist auch eine Cusp-Struktur des Magnetfelds bei einer dem Ausgang der Plasmakammer abgewandten Pol einer vor dem Ausgang der Plasmakammer angeordneten Magnetringanordnung mit in Längsrichtung beabstandeten Magnetpolen.

**[0026]** Eine vorteilhafte Feldformung am Ausgang der Plasmakammer ist mit einem neuartigen Verlauf einer nachfolgend als Neutraffläche bezeichneten charakteris-

tischen Fläche eines durch eine Magnetringanordnung, insbesondere einen Permanent-Magnetring mit in Längsrichtung beabstandet entgegen gesetzten Magnetpolen bestimmten Magnetfelds vorgesehen. Es lässt sich zeigen, dass ein solcher Permanent-Magnetring am Ausgang der Plasmakammer, wie er auch bereits in der DE 101 30 464 A1 vorhanden ist, an seinem in Strahlrichtung weisenden Ende ein Magnetfeld erzeugt, welches sowohl innerhalb der Plasmakammer, also radial innerhalb des Magnetrings, geschlossene Magnetfeldlinien als auch auf der Außenseite der Plasmakammer, also radial außerhalb der Plasmakammer und des Magnetrings, geschlossene Magnetfeldlinien und zwischen diesen beiden Gruppen von Magnetfeldlinien eine fiktive Trennfläche besitzt, welche die Ausgangsöffnung der Plasmakammer überspannt und im Sinne der Erfindung als Neutralfläche bezeichnet ist. Diese Neutralfläche trifft entlang einer nachfolgend als Eintrittslinie bezeichneten Linie auf den Magnetpol oder einen an diesem angeordneten Polschuh. Die Eintrittslinie liegt bei rotationssymmetrischer Ausführung der Magnetanordnung in einer senkrecht zur Mittellängsachse der Anordnung verlaufenden Ebene. Bei nicht in einer Ebene liegender Eintrittslinie sei deren mittlere Position in Längsrichtung in entsprechender Weise angenommen. Das Magnetfeld einer einzelnen Ringspule oder das radiale Magnetfeld eines Hall-Thrusters mit ringförmiger Kammergeometrie zeigt keine solche den Kammerausgang überspannende Neutralfläche.

**[0027]** Während bei der aus der DE 101 30 464 A1 bekannten Anordnung eine solche Neutralfläche eine deutliche Aufwölbung gegen die Längsposition der Eintrittslinie in Strahlrichtung des Plasmastrahls zeigt, ist gemäß der vorliegenden Erfindung vorgesehen, das Magnetfeld in diesem Bereich so zu formen, dass eine solche Neutralfläche innerhalb eines Bereichs in Längsrichtung liegt, welcher in Strahlrichtung maximal 10 % des größten Durchmessers der Eintrittslinie gegen die Längsposition der Eintrittslinie in Strahlrichtung versetzt endet, d. h. dass die nach dieser Bemessung maximal zulässige Aufwölbung der Neutralfläche in Strahlrichtung gegenüber der bekannten Anordnung wesentlich verringert ist.

**[0028]** Es zeigt sich überraschend, dass eine solche Magnetfeldformung zu einer deutlich verringerten Strahldivergenz und damit zu einer höheren Effizienz der Anordnung als Antrieb bei Raumflugkörpern führt.

**[0029]** Vorteilhafterweise ist die Aufwölbung der Neutralfläche in Strahlrichtung des Plasmastrahls vollständig aufgehoben. In bevorzugter Ausführungsform ist die Neutralfläche entgegen der Strahlrichtung gegen die Längsposition der Eintrittslinie in die Plasmakammer eingezogen, was nachfolgend auch als konkaver Verlauf der Neutralfläche im Gegensatz zu konvexem Verlauf bei der aus der DE 101 30 464 A1 bekannten Anordnung bezeichnet wird. Maßgebend sei dabei jeweils der Durchtrittsbereich des ausgestoßenen Plasmastrahls durch die Neutralfläche, insbesondere der typischerweise auf der Mittellängsachse des Plasmastrahls liegende Schei-

telpunkt einer Wölbung der Neutralfläche.

**[0030]** Die Magnetfeldformung in der angegebenen Art ist dem Fachmann mit geläufigen Mitteln, insbesondere dem Einsatz von feldformenden Polschuhen, Variationen der magnetischen Flussdichte in Längsrichtung etc. möglich. Vorteilhafte Beispiele sind anhand der Abbildungen noch beschrieben.

**[0031]** Eine andere Ausführungsform sieht vor, die Plasmakammer in dem Längsabschnitt vor der Ausgangsöffnung der Plasmakammer sich quer zur Strahlrichtung erweiternd auszubilden. Die Kammergeometrie kann dann nicht mehr im strengen Sinne als zylindrisch angesehen werden. Überraschenderweise führt die Aufweitung der Plasmakammer im Bereich vor der Ausgangsöffnung der Kammer nicht zu einer Aufweitung, sondern zu einer Verringerung der Divergenz des Plasmastrahls. Die Aufweitung als Durchmesserergrößerung der Plasmakammer in Längsrichtung fortschreitend kann linear oder nicht linear erfolgen. Vorteilhafterweise liegt der Konuswinkel der Aufweitung bei nichtlinearem Verlauf der mittleren Aufweitung, bei wenigstens 5°, vorzugsweise wenigstens 10° und höchstens 30°, vorzugsweise höchstens 20°.

**[0032]** Die Aufweitung erstreckt sich in Längsrichtung vorteilhafterweise nur über einen Teil der Längserstreckung der Plasmakammer. Vorteilhafterweise erstreckt sich die Aufweitung in Längsrichtung wenigstens über den überwiegenden Teil des Abstands der Magnetpole der Magnetringanordnung am Ausgang der Plasmakammer, insbesondere wenigstens über den gesamten Abstand der Magnetpole. Bei in Längsrichtung mehrstufiger Magnetringanordnung um die Plasmakammer kann der Längsbereich der Aufweitung der Plasmakammer sich auch entgegen der Strahlrichtung über die am Ausgang der Plasmakammer angeordnete Magnetringstufe in die in Richtung der Anode nächste Magnetringstufe fortsetzen.

**[0033]** Gemäß einen weiteren vorteilhaften Ausführungen ist vorgesehen, das Magnetfeld in der Plasmakammer in der Weise zu formen, dass in einem Längsbereich zwischen den beiden Magnetpolen der am Ausgang der Plasmakammer angeordneten Magnetringanordnung, in welchem die Längskomponente des Magnetfeld gegenüber der Radialkomponente überwiegt, die über den Kammerquerschnitt gemittelte magnetische Flussdichte asymmetrisch gegen eine mittlere Längsposition in Längsrichtung abnimmt. Das Magnetfeld weitet sich anschaulich in Längsrichtung auf. Es zeigt sich überraschend, dass eine solche Aufweitung des Magnetfelds zu einer geringeren Divergenz des ausgestoßenen Plasmastrahls führt. Vorzugsweise ist der betrachtete mittlere Längsbereich von beiden Magnetpolen der Magnetringanordnung um jeweils 20 % der Länge der Magnetringanordnung von beiden Magnetpolen beabstandet.

**[0034]** Möglichkeiten zu einer derartigen Gestaltung des Magnetfelds sind dem Fachmann an sich bekannt. Einzelbeispiele sind anhand der Abbildungen noch veranschaulicht.

**[0035]** Gemäß einer weiteren Ausführungsform ist vorgesehen, den magnetischen Fluss außerhalb der Plasmakammer innerhalb der Magnetringanordnung in Strahlrichtung abnehmend zu gestalten. Die Magnetringanordnung enthält vorzugsweise einen Permanentmagnetring mit in Längsrichtung entgegen gerichteten Magnetpolen. Möglichkeiten zu einer derartigen Gestaltung des inneren Magnetflusses sind dem Fachmann an sich geläufig und können insbesondere eine inhomogene Magnetisierung eines permanentmagnetischen Materials und/oder eine in Strahlrichtung abnehmende Querschnittsfläche eines Permanentmagnetings als interne Eigenschaften eines Permanentmagnetings, aber auch eine magnetische Abschirmvorrichtung an der Außenseite der Magnetringanordnung und/oder eine magnetische Kurzschlussanordnung an der Außenseite der Magnetanordnung jeweils mit in Längsrichtung variierender Wirkung beinhalten.

**[0036]** Die Erfindung ist nachfolgend anhand bevorzugter Ausführungsbeispiele unter Bezugnahme auf die Abbildungen noch eingehend veranschaulicht. Dabei zeigt:

- Fig. 1 einen Querschnitt durch eine bekannte Anordnung,
- Fig. 2 eine Ausführungsform mit reduzierter Aufwölbung der Neutralfläche des Magnetfelds,
- Fig. 3 einen entgegen der Strahlrichtung eingewölbten Verlauf der Neutralfläche,
- Fig. 4 eine sich erweiternde Kammergeometrie,
- Fig. 5 einen Ringmagnet mit magnetischer Abschirmung,
- Fig. 6 eine Magnetfeldaufweitung in der Plasmakammer,
- Fig. 7 eine weitere Ausführungsform.

**[0037]** In Fig. 1 ist eine aus der DE 101 30 464 A1 bekannte Anordnung als Schnittbild in einer die Mittellängsachse der Plasmakammer enthaltenden Schnittbene schematisch skizziert, wobei wegen der Rotations-symmetrie der Plasmakammer PK mit der Kammerwand KW und der Magnetanordnung um die Mittellängsachse ML der Übersichtlichkeit halber nur eine Hälfte des Schnittbilds in der Abbildung rechts von der Mittellängsachse gezeichnet ist.

**[0038]** Die Mittellängsachse ML fällt mit einer eingezeichneten z-Achse zusammen, welche die Strahlrichtung des ausgestoßenen Plasmastrahls angibt. Der Plasmastrahl ist um die z-Achse räumlich verteilt und nach dem bei zA liegenden Ausgang der Plasmakammer divergent.

**[0039]** Außerhalb der Plasmakammer ist eine ge-

bräuchliche Kathode KA angedeutet, welche als Quelle für Primärelektronen zur Zündung des Plasmas und zur Neutralisierung des ausgestoßenen Plasmastrahls dient. Zwischen der Kathode KA und einer am Fuß der Plasmakammer den Ausgang entgegen gesetzt angeordneten Anode AN besteht ein elektrostatisches Feld, welches innerhalb der Plasmakammer in bekannter Weise im wesentlichen parallel zur z-Achse verläuft.

**[0040]** Die außerhalb der Kammerwand KW angeordnete Magnetanordnung ist dreistufig mit einem ersten Magnetring MR1, einem zweiten Magnetring MR2 und einem dritten Magnetring MR3 aufgebaut, welche die Plasmakammer umgeben und deren Magnetpole jeweils in z-Richtung gegeneinander versetzt sind. Die Polausrichtung der aufeinander folgenden Magnetringe aus permanentmagnetischem Material ist abwechselnd entgegen gesetzt, so dass sich jeweils gleiche Pole N-N, S-S unmittelbar benachbarter Magnetringe gegenüberstehen, wodurch sich in den Bereichen zwischen erstem und zweitem Magnetring und zwischen zweitem und drittem Magnetring jeweils cusp-Strukturen des Magnetfelds in der Kammer ausbilden. Vorteilhafterweise können zwischen aufeinander folgende Magnetringe Polschuhe P12 bzw. P23 eingefügt sein. Die Magnetringe können in gleichen oder verschiedenen Stärken magnetisiert sein.

**[0041]** Die Magnetringe MR1, MR2, MR3 sind in Längsrichtung im wesentlichen gleich lang. Die Länge LS1 der ersten Magnetstufe der Magnetanordnung sei von dem in Strahlrichtung weisenden Pol N des ersten Magnetings MR1 bei ZE bis zum Schwerpunkt des Eintritts der Magnetfeldlinien in dem Polschuh P12, die Länge LS2 der zweiten Magnetstufe von Polschuh P12 zum Polschuh P23 und die Länge LS3 der dritten Magnetstufe vom Polschuh P23 bis zur Anode AN gemessen. Die Magnetstufen M1, M2, M3 seien den Längsbereichen von LS1, LS2, LS3 entsprechend zugeordnet. Die mit N und S bezeichneten Magnetpole können auch vertauscht sein. Die Plasmakammer ist kreiszylindrisch um die Mittellängsachse mit einer Länge  $LS1+LS2+LS3$ , die größer ist als der Durchmesser 2RK der Kammer.

**[0042]** Das mit einer derartigen Magnetanordnung erzeugte Magnetfeld zeigt gegenüber Magnetfeldern gebräuchlicher Magnetanordnungen, z. B. mit Ringspulen um die Plasmakammer und/oder mit einem zentralen Pol in der Kammer und einem ringförmigen Pol um die Kammer und/oder mit ringförmiger Kammergeometrie und im wesentlichen radialem Magnetfeld einige Besonderheiten, welche nachfolgend insbesondere bezüglich der ersten Magnetstufe beim Ausgang der Plasmakammer wesentlich sind.

**[0043]** Das Magnetfeld der ersten Magnetstufe verläuft innerhalb der Plasmakammer im Bereich der cusp-Struktur bei dem Polschuh P12 mit hoher Dichte der Magnetfeldlinien überwiegend quer zur Längsrichtung z. In einem mittleren Längsbereich LM zwischen den entgegen gesetzten Polen der ersten Magnetstufe verläuft deren Magnetfeld überwiegend parallel zur Längsrichtung z,

insbesondere in einem mittleren Längsbereich, welcher von beiden Enden der ersten Magnetstufe um ca. 20 % der Länge LS1 der ersten Magnetstufe beabstandet ist. In diesem Bereich nimmt die magnetische Flußdichte typischerweise in radialer Richtung zur Kammerwand hin zu. Die eingezeichneten Feldlinien sind nicht quantitativ zu verstehen.

**[0044]** Das von dem in Strahlrichtung weisenden Magnetpol N des ersten Magnettrings MR1 ausgehende Magnetfeld ist teilweise über mit MI bezeichnete Feldlinien durch die Plasmakammer radial innerhalb des ersten Magnettrings und teilweise über mit ME bezeichnete Magnetfeldlinien außerhalb der Plasmakammer radial außerhalb des ersten Magnettrings geschlossen. Die außerhalb geschlossenen Magnetfeldlinien sind nur in ihrem Ansatz eingezeichnet. Die Raumbereiche der Magnetfeldlinien MI und der Magnetfeldlinien ME sind durch eine fiktive Trennfläche NF gegeneinander abgeteilt, welche nachfolgend als Neutralfläche bezeichnet ist. Diese Neutralfläche überspannt die Ausgangsöffnung der Plasmakammer und trifft entlang einer als Eintrittslinie EL bezeichneten Linie auf den Magnetring. Durch die Rotationssymmetrie der Anordnung ist die Neutralfläche NF gleichfalls rotationssymmetrisch und die Eintrittslinie bildet eine Kreislinie in der Ebene des Magnetpols bei zE. Die Neutralfläche NF ist gegen die senkrecht zur z-Achse bei zE liegende Ebene, in der die Eintrittslinie EL liegt, um ein mit WS bezeichnetes Maß in Strahlrichtung aufgewölbt und schneidet die Mittellängsachse ML bei zS,  $WS = zS - zE$ . Der Radius der Eintrittslinie EL um die z-Achse ist mit RE bezeichnet. Das Verhältnis  $WS/RE$  liegt bei der bekannten Anordnung typischerweise zwischen 0,5 und 1. Das Magnetfeld einer im Stand der Technik häufig eingesetzten Ringspule zeigt keine solche den Kammerausgang überspannende Neutralfläche.

**[0045]** Die vorstehend anhand der Ausführung aus dem Stand der Technik vorgenommenen Erläuterungen und Definitionen sind bei den nachfolgenden Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung übernommen, soweit nicht anderes, abweichendes ausgeführt ist.

**[0046]** In Fig. 2 ist eine erste Ausführungsform der Erfindung skizziert, bei welcher die mit WS bezeichnete Aufwölbung der Neutralfläche NF in Strahlrichtung z gegenüber der Ebene der Eintrittslinie EL dieser Neutralfläche in die Magnetanordnung gegenüber dem in Fig. 1 skizzierten Feld erheblich verringert ist. Es zeigt sich, dass mit einer solchen verringerten Aufwölbung, welche weitergehend auch zu einer im wesentlichen ebenen Neutralfläche oder gar zu einer entgegen der Strahlrichtung konkav gewölbten Neutralfläche weiter geführt werden kann, in Verbindung mit dem Magnetfeld in der beim Ausgang liegenden Magnetstufe eine deutlich verringerte Divergenz des ausgestoßenen Plasmastrahls bewirkt, ohne die Vorteile der aus dem Stand der Technik nach Fig. 1 bekannten Magnetfeldanordnung aufzugeben. Das Magnetfeld in der Magnetstufe vor dem Ausgang ist insbesondere gekennzeichnet durch zwei die Plasmakammer PK ringförmig umgebende und zueinander in

Längsrichtung z beabstandete Magnetpole N und S, welche vorzugsweise durch einen in Längsrichtung z magnetisierten Ringmagnetkörper MR1 gebildet sind. Das Magnetfeld innerhalb der Kammer verläuft in einem mittleren Bereich überwiegend parallel zur Längsrichtung und verläuft im Bereich zwischen der ersten und der zweiten Magnetstufe M1, M2 im Bereich des Polschuhs P12 im wesentlichen radial. Insbesondere bildet das Magnetfeld zwischen der ersten Magnetstufe mit Magnetringanordnung MR1 und der zweiten Magnetstufe mit Magnetringanordnung MR2 eine Cusp-Struktur CS, wie an sich aus dem Stand der Technik bekannt. Im Bereich des in Strahlrichtung weisenden Magnetpols N der Magnetringanordnung MR1 sind die Feldlinien von den vorwiegend zur Längsrichtung parallelen Verlauf von der Mittellängsachse ML weg umgelenkt nach außen und verlaufen in der skizzierten Ausführung mit dem Polschuh auf diesen zu im wesentlichen radial. Das Verhältnis der Größe WS in z-Richtung zum Durchmesser 2RE der Eintrittslinie EL beträgt vorteilhafterweise maximal 0,1. Bei konkaver Einwölbung der Neutralfläche NF entgegen der Strahlrichtung sei der Wert für WS als negativ betrachtet, so dass unabhängig vom Betrag der konkaven Einwölbung die vorgenannte Relation  $WS/2RE < 0,1$  immer gilt. Für die Erzeugung eines Magnetfeldes mit der beschriebenen verringerten Aufwölbung WS sind dem Fachmann an sich verschiedene Maßnahmen aus Theorie und Praxis der Magnetfeldformung bekannt. Im skizzierten Beispiel ist als vorteilhafte Maßnahme der Einsatz eines weichmagnetischen Polschuhs PSA an dem in Strahlrichtung weisenden Magnetpol N der Magnetringanordnung MR1 vorgesehen.

**[0047]** Ein weiterer Beitrag zur Verringerung der Aufwölbung WS der Neutralfläche NF kann durch eine Dimensionierung der Magnetstufe am Ausgang der Plasmakammer in der Weise erfolgen, dass der Abstand der Magnetpole bzw. bei Verwendung von Polschuhen der Abstand der entsprechenden Längspositionen an den Polschuhen als Länge LS1 der Magnetstufe M1 abweichend vom Stand der Technik nach Fig. 1 größer als der Durchmesser der Plasmakammer, vorzugsweise größer als das 1,5-fache des Durchmessers der Plasmakammer gewählt wird.

**[0048]** In Fig. 3 ist ein Ausschnitt einer Ausgestaltung des Magnetfelds im Bereich des Ausgangs der Plasmakammer skizziert, bei welcher die beschriebene Neutralfläche NF im Bereich der Mittellängsachse ML entgegen der Strahlrichtung auf  $z = zS$  gegen die Ebene der Eintrittslinie der Neutralebene bei  $z = zE$  zurückgesetzt ist. Die Neutralfläche ist dabei entgegen der Strahlrichtung gekrümmt konkav eingewölbt.

**[0049]** Fig. 4 zeigt eine weitere Maßnahme zur vorteilhaften Formung des Magnetfelds insbesondere in einem mittleren Längsbereich LD zwischen Längspositionen Z1 und Z2. In Übereinstimmung mit der Ausführungsform nach Fig. 2 ist in Fig. 4 an dem in Strahlrichtung weisenden Pol N der Magnetringanordnung MT1 ein Polschuh PSA angeordnet.

**[0050]** In dem Längsbereich LD sind zwei in Längsrichtung beabstandete Feldpositionen F1 und F2 betrachtet. Gemäss einer vorteilhaften Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist das Magnetfeld zwischen den in Längsrichtung beabstandeten entgegen gesetzten Magnetpolen der Magnetringanordnung am Ausgang der Plasmakammer in dem mittleren Längsbereich LD, für welchen vorzugsweise ein Längsbereich im Abstand von ca. 20 % der Länge der Magnetstufe von beiden Magnetpolen betrachtet wird, sich in Längsrichtung von Z2 in Richtung Z1 im Mittel aufweitend in dem Sinne, dass die korrespondierenden Feldlinien im Feldbereich F1 gegenüber dem bezüglich der Mitte der Magnetstufe M1 in Längsrichtung symmetrisch zu F1 liegenden Feldbereich F2 radial weiter nach außen rücken und somit die magnetische Flußdichte und der gesamte magnetische Fluß zumindest in einem überwiegenden radialen Bereich des Durchmessers der Plasmakammer um die Mittellängsachse ML in Strahlrichtung abnehmen. Es zeigt sich, dass eine solche Divergenz der Magnetfeldlinien in einem solchen mittleren Längsbereich überraschenderweise zu einer verringerten Divergenz des ausgestoßenen Plasmastrahls führt.

**[0051]** Für die Formung eines solchen Magnetfeldverlaufs sind dem Fachmann an sich wiederum verschiedene Maßnahmen bekannt. In der skizzierten Ausführungsform ist vorgesehen, eine solche Feldformung dadurch zu erreichen, dass in einem Permanentmagnetischenring MT1 als Magnetringanordnung der Magnetstufe am Ausgang der Plasmakammer in Längsrichtung eine Verminderung des magnetischen Flusses innerhalb des Ringkörpers des Permanentmagneten erfolgt. Dies kann vorteilhafterweise wie skizziert dadurch geschehen, dass die radiale Dicke des Magnetrings MT1 in Längsrichtung von dem Pol S in Richtung des Pols N abnimmt, wobei eine räumlich homogene Magnetisierung des Permanentrings MT1 angenommen sei.

**[0052]** In Fig. 5 ist eine Anordnung skizziert, welche in einem mittleren Längsbereich LD einen zu Fig. 4 vergleichbaren Feldverlauf aufweist. Zur Erzielung des Feldverlaufs ist in diesem Beispiel an der Außenseite eines Magnetrings MR1 mit konstanter radialer Dicke eine magnetische Abschirmung AM z. B. in Form eines weichmagnetischen Materials angebracht, deren Abschirmwirkung, z. B. durch zunehmende radiale Dicke, in Strahlrichtung z zunimmt. Die in Längsrichtung variierende Abschirmung zeigt einen ähnlichen Effekt wie die abnehmende radiale Dicke des Magnetrings MT1 nach Fig. 4. Die Geometrie des Permanentmagnetrings nach Fig. 3 und die magnetische Abschirmung nach Fig. 5 können besonders vorteilhaft gemeinsam realisiert sein.

**[0053]** Fig. 6 zeigt eine Anordnung mit sich aufweitender Geometrie der Plasmakammer. Die Kammerwand KW sei in einem der Anode zuweisenden Abschnitt wie in Fig. 1 als zylindrisch angenommen. In der Magnetstufe am Ausgang der Plasmakammer weitet sich die Kammerwand KW radial auf von einem anfänglichen Radius RC zu einem Radius RM am Ausgang der Plasmakam-

mer. Die radiale Aufweitung RM - RC liegt vorteilhafterweise im Bereich zwischen 5 % und 75 % von RM. Es zeigt sich, dass die Aufweitung der Plasmakammer über einen beim Ausgang der Plasmakammer, insbesondere bei der am Ausgang der Plasmakammer liegenden Magnetstufe M1, zur Verringerung der Divergenz des ausgestoßenen Plasmastrahls beiträgt. Die Aufweitung der Plasmakammer erstreckt sich nicht notwendigerweise über die volle Länge der Magnetstufe M1 am Ausgang der Plasmakammer, kann sich aber auch noch in Richtung der Anode in die Magnetstufe M2 fortsetzen. Vorzugsweise ist zumindest im Längsbereich der Magnetanordnung bei der Anode, nach Fig. 1 LS3 der Magnetstufe M3, die Plasmakammer im wesentlichen zylindrisch ausgeführt.

**[0054]** Eine Magnetringanordnung MS1 in der Magnetstufe am Ausgang der Plasmakammer ist in dem in Fig. 6 skizzierten Beispiel als eine Folge von Magnetringen mit in Längsrichtung fortschreitendem Innendurchmesser ausgeführt. Eine solche Magnetanordnung kann vorteilhafterweise zu dem anhand der Fig. 4 beschriebenen Effekt des sich aufweitenden Felds zwischen den in Längsrichtung beabstandeten Endpolen der Magnetringanordnung MS1 zwischen Bereichen F2 und F1 vorteilhaft beitragen. Bei der Anordnung nach Fig. 6 ist auch wiederum ein Polschuh PSA an dem in Strahlrichtung weisenden endständigen Pol der Magnetringanordnung MS1 vorgesehen.

**[0055]** In Fig. 7 ist eine vorteilhafte Ausführung skizziert, bei welcher in Verbindung mit einer Aufweitung der Kammerwand eine Magnetanordnung MV1 vorgesehen ist, welche in der am Ausgang der Plasmakammer liegenden Magnetstufe eine Abnahme des magnetischen Flusses innerhalb der Magnetanordnung in Längsrichtung z aufweist. Dies wird im skizzierten Beispiel dadurch erzielt, dass ähnlich der Fig. 6 mehrere Magnetringe in z-Richtung aufeinanderfolgend angeordnet sind, welche aber unterschiedliche, in z-Richtung stufenweise abnehmende radiale Wandstärken besitzen. Der Effekt der radialen Aufweitung des Magnetfelds in dem zu Fig. 5 geschilderten mittleren Längsbereich ist hier weiter verstärkt und die Neutralfläche NF zeigt die zu Fig. 2 beschriebene konkave Einwölbung entgegen der Strahlrichtung. Anstelle des gestuften Verlaufs der Magnetringanordnung MS1 in Fig. 6 oder MV1 in Fig. 7 kann auch ein geglätteter oder kontinuierlicher Verlauf der inneren und/oder äußeren Wandflächen dieser Magnetringanordnungen vorgesehen sein.

## Patentansprüche

1. Plasmabeschleunigeranordnung zur Erzeugung eines gerichteten Plasmastrahls mit einer Plasmakammer, die eine einfach zusammenhängende Querschnittsfläche besitzt und eine in Längsrichtung (z) verlaufende Mittellängsachse (ML) des Plasmastrahls einschließt, mit einem zumindest überwie-

- gend zur Mittellängsachse parallelen elektrostatischen Beschleunigungsfeld und mit einer Magneta-nordnung (M1, M2, M3), welche wenigstens im Aus-gangsbereich eine die Plasmakammer umgebende Magnetringanordnung (MR1) mit in Längsrichtung beabstandeten Magnetpolen (N, S) aufweist und ein Magnetfeld (ME, MI) im Bereich des Ausgangs der Plasmakammer erzeugt, welches eine den Ausgang der Plasmakammer überspannende Neutralfläche (NF) aufweist, welche einen Bereich von innerhalb der Plasmakammer geschlossenen Magnetfeldlinien (MI) und einen Bereich von außerhalb der Plas-makammer geschlossenen Magnetfeldlinien (ME) der Magnetringanordnung (MR1) trennt und in einer Eintrittslinie (EL) auf die Oberfläche der Magnetringanordnung trifft, **dadurch gekennzeichnet, dass** wenigstens an dem in Strahlrichtung weisenden Magnetpol (N) der Magnetringanordnung ein weichma-gnetischen Polschuh angeordnet ist und radial über die Magneta-nordnung in die Plasmakammer ragt, so dass der Schnittpunkt der Neutralfläche (NF) mit der Mittellängsachse (ML) in Längsrichtung (z) inner-halb eines Bereichs liegt, der maximal 10 % des größten Durchmessers der Eintrittslinie (EL) gegen die Längsposition der Eintrittslinie in Strahlrichtung versetzt endet.
2. Anordnung nach Anspruch 1, **dadurch gekenn-zeichnet, dass** die Neutralfläche (NF) im Bereich des Durchtritts des Plasmastrahls in Strahlrichtung (z) nicht gegen die Eintrittslinie (EL) in Strahlrichtung versetzt liegt.
  3. Anordnung nach Anspruch 2, **dadurch gekenn-zeichnet, dass** die Neutralfläche (NF) im Bereich des Durchtritts des Plasmastrahls gegen die Ein-trittslinie (EL) entgegen der Strahlrichtung versetzt liegt.
  4. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Magnetringan-ordnung (MR1) einen permanentmagnetischen Ring enthält.
  5. Anordnung nach Anspruch 1, **dadurch gekenn-zeichnet, dass** die Magnetringanordnung einen permanentmagnetischen Ring (MT1, MS1) am Aus-gang der Plasmakammer enthält, dessen radialen Dicke in der Längsrichtung von dem Pol S in Rich-tung des Pols N abnimmt, so dass in einem in Längs-richtung zwischen den beiden beabstandeten Polen (N, S) der Magnetringanordnung liegenden mittleren Längsbereich (LD) mit überwiegend zur Längsrich-tung paralleler Komponente der innerhalb der Plas-makammer geschlossenen Feldlinien (MI) des Ma-gnetfelds bei Vergleich von bezüglich der Mitte der Magnetstufe symmetrisch liegenden Feldbereichen (F1, F2) die magnetische Flußdichte in Längsrich-tung abnimmt.
  6. Anordnung nach Anspruch 5, **dadurch gekenn-zeichnet, dass** an den in Längsrichtung entgegen gesetzten Magnetpolen (N,S) weichmagnetische Polschuhe (PSA, P12) vorgesehen sind.
  7. Anordnung nach einem der Ansprüche 5 oder 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** der mittlere Längs-bereich (LD) jeweils 20 % der Länge der Magnetring-anordnung (MT1, MS1) von beiden Magnetpolen (N, S) beabstandet ist.
  8. Anordnung nach einem der Ansprüche 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Länge der Mag-netanordnung wenigstens gleich dem Durchmesser der Plasmakammer ist.
  9. Anordnung nach Anspruch 1, **dadurch gekenn-zeichnet, dass** in einem in Längsrichtung zwischen den beabstandeten Magnetpolen der im Ausgangs-bereich der Plasmakammer angeordneten Mag-netringanordnung (MS1, MV1) liegenden Bereich die Plasmakammer sich in Längsrichtung (z) aufwei-tend verläuft.
  10. Anordnung nach Anspruch 9, **dadurch gekenn-zeichnet, dass** die Aufweitung (RM-RC) zwischen 5 % und 75 % des größten Durchmessers (RM) der Plasmakammer beträgt.
  11. Anordnung nach Anspruch 9 oder 10, **dadurch ge-kenntzeichnet, dass** die Magneta-nordnung (MR1) in Längsrichtung mehrstufig (MS1) mit alternieren-der Polausrichtung ist und die Aufweitung der Plas-makammer sich nicht über alle Stufen erstreckt.
  12. Anordnung nach Anspruch 1 und 5 oder 9 oder 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** in einem in Längs-richtung zwischen den beabstandeten Magnetpolen (N, S) liegenden und von beiden Magnetpolen be-abstandeten mittleren Längsbereich der magneti-sche Fluss innerhalb der Magnetringanordnung (MT1, MS1, MV1) in Längsrichtung (z) abnimmt.
  13. Anordnung nach Anspruch 12, **dadurch gekenn-zeichnet, dass** die Ringmagneta-nordnung einen permanentmagnetischen Ringmagneten enthält.
  14. Anordnung nach Anspruch 13, **dadurch gekenn-zeichnet, dass** der Magnetring (MT1) zumindest in einem Teilabschnitt in Längsrichtung bei homogener Magnetisierung eine abnehmende Wandstärke auf-weist.
  15. Anordnung nach einem der Ansprüche 12 bis 14, **dadurch gekennzeichnet, dass** an der Außenseite der Magnetringanordnung (MR1) eine magnetische

Abschirmvorrichtung (AM) mit in Längsrichtung (z) variierender Abschirmwirkung angeordnet ist.

16. Anordnung nach einem der Ansprüche 12 bis 15, **dadurch gekennzeichnet, dass** an der Außenseite der Magnetringanordnung eine magnetische Kurzschlussanordnung zwischen in Längsrichtung beabstandeten Magnetpolen angeordnet ist.

### Claims

1. Plasma accelerator arrangement for generating a directed plasma beam having a plasma chamber which has a simply continuous cross-sectional area and includes a centre longitudinal axis (ML), which runs in the longitudinal direction (z), of the plasma beam, having an electrostatic acceleration field which is at least predominantly parallel to the centre longitudinal axis, and having a magnet arrangement (M1, M2, M3), which magnet arrangement has, at least in the output region, a magnet ring arrangement (MR1) which surrounds the plasma chamber and has magnetic poles (N, S) which are spaced apart in the longitudinal direction, and which magnet arrangement generates a magnetic field (ME, MI) in the region of the output of the plasma chamber, the said magnetic field having a neutral area (NF) which spans the output of the plasma chamber and which separates a region of magnetic field lines (MI) which are closed within the plasma chamber and a region of magnetic field lines (ME) of the magnet ring arrangement (MR1) which are closed outside the plasma chamber and, in an inlet line (EL), meets the surface of the magnet ring arrangement, **characterized in that** a soft-magnetic pole shoe is arranged at least on that magnetic pole (N) of the magnet ring arrangement which faces in the beam direction and projects radially over the magnet arrangement into the plasma chamber, so that the point at which the neutral area (NF) intersects the centre longitudinal axis (ML) in the longitudinal direction (z) lies within a region which ends with an offset of at most 10% of the largest diameter of the inlet line (EL) in relation to the longitudinal position of the inlet line in the beam direction.
2. Arrangement according to Claim 1, **characterized in that** the neutral area (NF) is not offset in relation to the inlet line (EL) in the beam direction in the region of the passage of the plasma beam in the beam direction (z).
3. Arrangement according to Claim 2, **characterized in that** the neutral area (NF) is offset in relation to the inlet line (EL) against the beam direction in the region of the passage of the plasma beam.
4. Arrangement according to one of Claims 1 to 3, **characterized in that** the magnet ring arrangement (MR1) contains a permanent-magnet ring.
5. Arrangement according to Claim 1, **characterized in that** the magnet ring arrangement contains a permanent-magnet ring (MT1, MS1) at the output of the plasma chamber and the radial thickness in the longitudinal direction decreases from the pole S in the direction of the pole N, so that the magnetic flux density decreases in the longitudinal direction in a central longitudinal region (LD) which is situated between the two spaced-apart poles (N, S) of the magnet ring arrangement in the longitudinal direction and which has components, which are predominantly parallel to the longitudinal direction, of the field lines (MI) of the magnetic field which are closed within the plasma chamber in the event of comparison of field regions (F1, F2) which are symmetrical with respect to the centre of the magnetic stage.
6. Arrangement according to Claim 5, **characterized in that** soft-magnetic pole shoes (PSA, P12) are provided on the magnet poles (N, S) which are opposite in the longitudinal direction.
7. Arrangement according to either of Claims 5 and 6, **characterized in that** the central longitudinal region (LD) is spaced apart from the two magnet poles (N, S) in each case by 20% of the length of the magnet ring arrangement (MT1, MS1).
8. Arrangement according to either of Claims 6 and 7, **characterized in that** the length of the magnet arrangement is at least equal to the diameter of the plasma chamber.
9. Arrangement according to Claim 1, **characterized in that** the plasma chamber runs such that it widens in the longitudinal direction (z) in a region which is situated in the longitudinal direction between the spaced-apart magnet poles of the magnet ring arrangement (MS1, MV1) which is arranged in the output region of the plasma chamber.
10. Arrangement according to Claim 9, **characterized in that** the widening (RM-RC) amounts to between 5% and 75% of the largest diameter (RM) of the plasma chamber.
11. Arrangement according to Claim 9 or 10, **characterized in that** the magnet arrangement (MR1) has several stages (MS1) with an alternating pole orientation in the longitudinal direction, and the widening of the plasma chamber does not extend over all of the stages.
12. Arrangement according to Claims 1 and 5 or 9 or 11,

**characterized in that** the magnetic flux within the magnet ring arrangement (MT1, MS1, MV1) decreases in the longitudinal direction (z) in a central longitudinal region which is situated in the longitudinal direction between the spaced-apart magnet poles (N, S) and is spaced apart from the two magnet poles.

13. Arrangement according to Claim 12, **characterized in that** the ring magnet arrangement contains a permanent-magnet ring magnet.
14. Arrangement according to Claim 13, **characterized in that** the magnet ring (MT1) has a decreasing wall thickness at least in a partial section in the longitudinal direction with homogeneous magnetization.
15. Arrangement according to one of Claims 12 to 14, **characterized in that** a magnetic shielding apparatus (AM) with a shielding action which varies in the longitudinal direction (z) is arranged on the outside of the magnet ring arrangement (MR1).
16. Arrangement according to one of Claims 12 to 15, **characterized in that** a magnetic short-circuit arrangement between magnetic poles which are spaced apart in the longitudinal direction is arranged on the outside of the magnet ring arrangement.

## Revendications

1. Dispositif accélérateur de plasma pour la production d'un jet de plasma orienté avec une chambre à plasma possédant une aire de section solidarisée simplement et comprenant un axe médian longitudinal (ML) s'étendant dans le sens longitudinal (z) du jet de plasma, avec un champ d'accélération électrostatique au moins essentiellement parallèle à l'axe médian longitudinal, et avec un ensemble d'aimants (M1, M2, M3) comportant un ensemble d'anneau magnétique (MR1) entourant la chambre à plasma, au moins dans la région de sortie, avec des pôles magnétiques (N, S) espacés dans le sens longitudinal, et produisant un champ magnétique (ME, MI) dans la région de la sortie de la chambre à plasma, lequel présente une surface neutre (NF) chevauchant la sortie de la chambre à plasma, laquelle sépare une région de lignes de champ magnétique fermée (MI) à l'intérieur de la chambre à plasma d'avec une région de lignes de champ magnétique fermée (ME) à l'extérieur de la chambre à plasma de l'ensemble d'anneau magnétique (MR1), et rencontre une surface supérieure de l'ensemble d'anneau magnétique en une ligne d'entrée (EL), **caractérisé en ce qu'**une corne polaire magnétique douce est agencée au moins sur le pôle magnétique (N) de l'ensemble d'anneau magnétique qui est orienté

dans la direction du jet, et fait saillie radialement par-dessus l'ensemble d'anneau magnétique dans la chambre à plasma, de telle façon que l'intersection entre la surface neutre (NF) et l'axe médian longitudinal (ML) se trouve dans une région finissant en décalage, dans le sens longitudinal (z), de 10 % maximum du diamètre maximal de la ligne d'entrée (EL) dans la direction du jet par rapport à la position longitudinale de la ligne d'entrée.

2. Dispositif selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** dans la région du passage du jet de plasma dans la direction du jet (z), la surface neutre (NF) ne s'étend pas de façon décalée dans la direction du jet par rapport à la ligne d'entrée (EL).
3. Dispositif selon la revendication 2, **caractérisé en ce que** dans la région du passage du jet de plasma, la surface neutre (NF) s'étend de façon décalée contre la direction du jet par rapport à la ligne d'entrée (EL).
4. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 3, **caractérisé en ce que** l'ensemble d'anneau magnétique (MR1) contient un aimant permanent annulaire.
5. Dispositif selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** l'ensemble d'anneau magnétique contient un aimant permanent annulaire (MT1, MS1) à la sortie de la chambre à plasma et l'épaisseur radiale dans le sens longitudinal diminue dans la direction du pôle S vers le pôle N, de telle façon que dans une région médiane longitudinale (LD) s'étendant entre les deux pôles (N, S) espacés dans le sens longitudinal de l'ensemble d'anneau magnétique, la densité de flux magnétique diminue dans le sens longitudinal, avec une composante essentiellement parallèle au sens longitudinal de la ligne de champ fermée (MI) à l'intérieur de la chambre à plasma du champ magnétique, en comparant des régions de champ (F1, F2) s'étendant symétriquement par rapport au centre du niveau magnétique.
6. Dispositif selon la revendication 5, **caractérisé en ce que** des cornes polaires (PSA, P12) magnétiques douces sont prévues sur les pôles magnétiques (N, S) opposés dans le sens longitudinal.
7. Dispositif selon l'une des revendications 5 ou 6, **caractérisé en ce que** la région médiane longitudinale (LD) est respectivement espacée de 20 % de la longueur de l'ensemble d'anneau magnétique (MT1, MS1) par rapport aux deux pôles magnétiques (N, S).
8. Dispositif selon l'une des revendications 6 ou 7, **caractérisé en ce que** la longueur de l'ensemble d'aimants est au moins égale au diamètre de la

chambre à plasma.

9. Dispositif selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** la chambre à plasma s'étend en s'élargissant dans le sens longitudinal (z) dans une région s'étendant dans le sens longitudinal entre les pôles magnétiques espacés de l'ensemble d'anneau magnétique (MS1, MV1) agencé dans la région de sortie de la chambre à plasma. 5  
10
10. Dispositif selon la revendication 9, **caractérisé en ce que** l'élargissement (RM-RC) mesure entre 5 % et 75% du diamètre maximal (RM) de la chambre à plasma. 15
11. Dispositif selon la revendication 9 ou 10, **caractérisé en ce que** dans le sens longitudinal, l'ensemble magnétique (MR1) est conçu avec plusieurs niveaux (MS1) présentant une orientation polaire alternée, et l'élargissement de la chambre à plasma ne s'étend pas à tous les niveaux. 20
12. Dispositif selon les revendications 1 et 5 ou 9 ou 11, **caractérisé en ce que** dans une région médiane longitudinale s'étendant entre les pôles magnétiques (N, S) espacés dans le sens longitudinal et espacée des deux pôles magnétiques, le flux magnétique à l'intérieur de l'ensemble d'anneau magnétique (MT1, MS1, MV1) diminue dans le sens longitudinal (z). 25  
30
13. Dispositif selon la revendication 2, **caractérisé en ce que** l'ensemble d'anneau magnétique contient un aimant permanent annulaire. 35
14. Dispositif selon la revendication 3, **caractérisé en ce que** l'anneau magnétique (MT1) présente une épaisseur de paroi décroissante au moins dans une section partielle dans le sens longitudinal avec une magnétisation homogène. 40
15. Dispositif selon l'une des revendications 2 à 4, **caractérisé en ce qu'**un dispositif de blindage magnétique (AM) est agencé du côté extérieur de l'ensemble d'anneau magnétique (MR1), avec un effet de blindage variable dans le sens longitudinal (z). 45
16. Dispositif selon l'une des revendications 2 à 5, **caractérisé en ce qu'**un dispositif de coupure magnétique est agencé du côté extérieur de l'ensemble d'anneau magnétique entre les pôles magnétiques espacés dans le sens longitudinal. 50

55

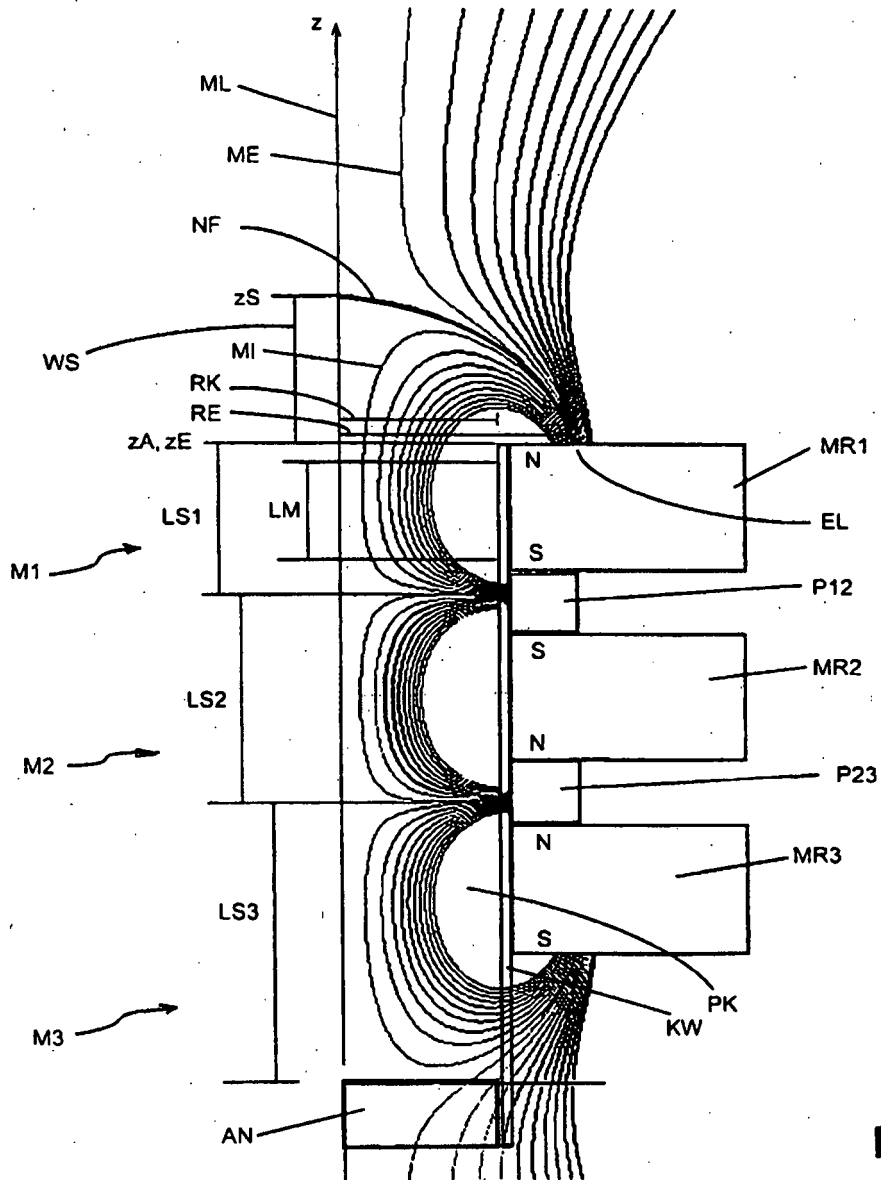


Fig. 1

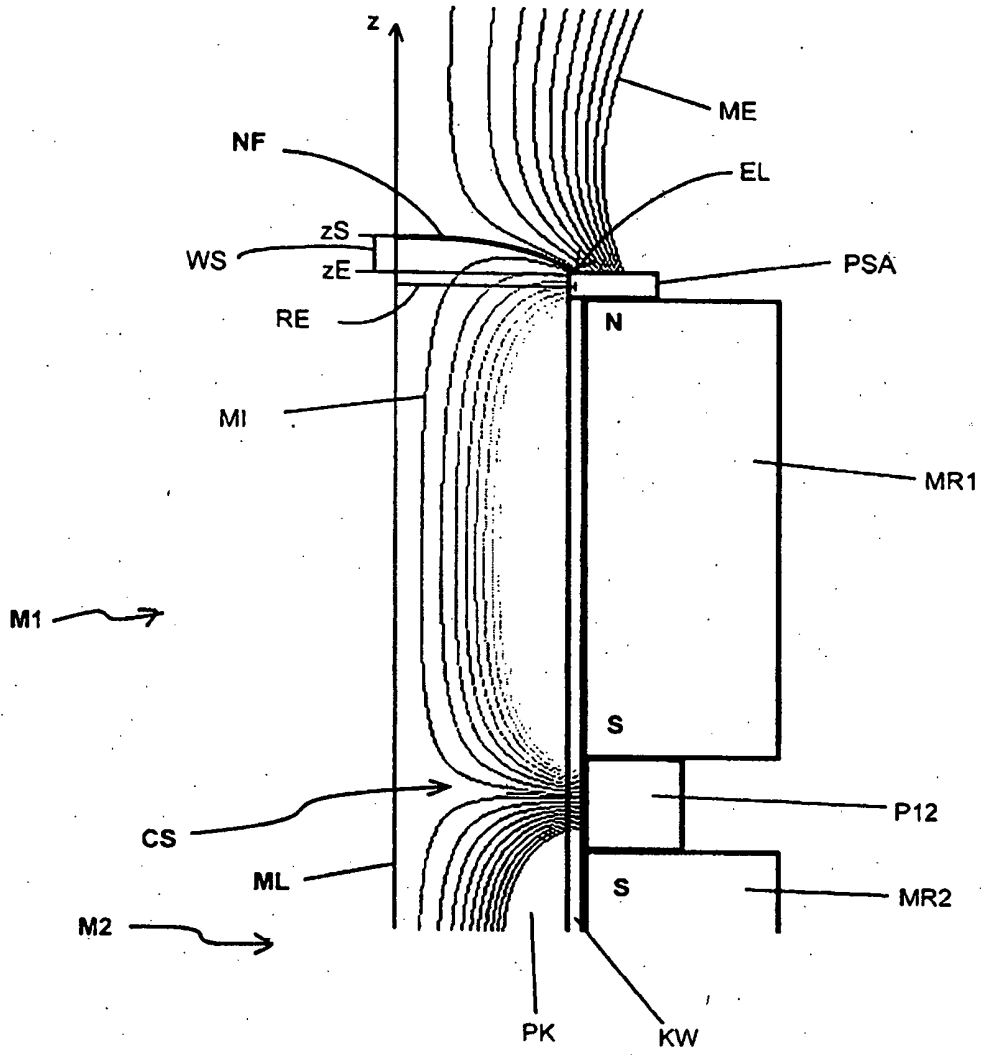


Fig. 2

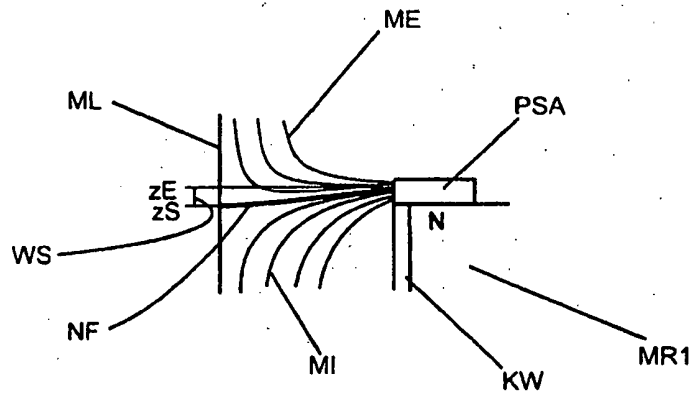


Fig. 3



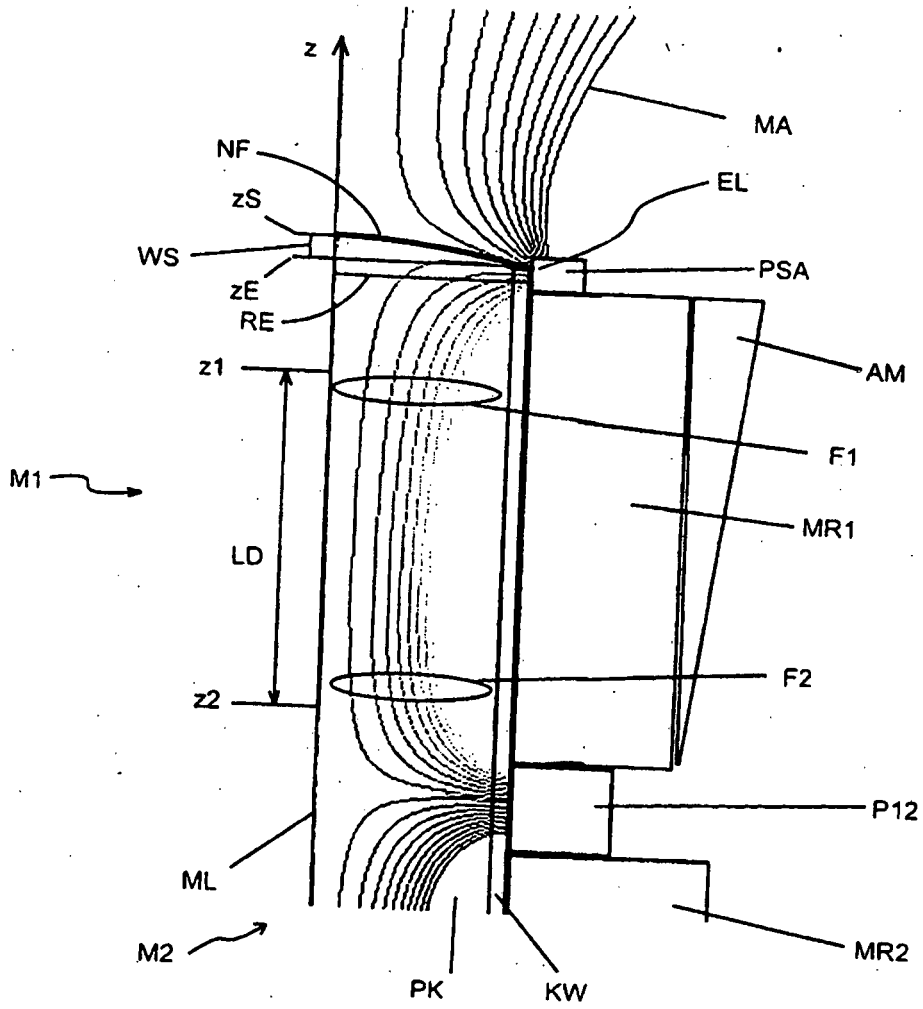


Fig. 5

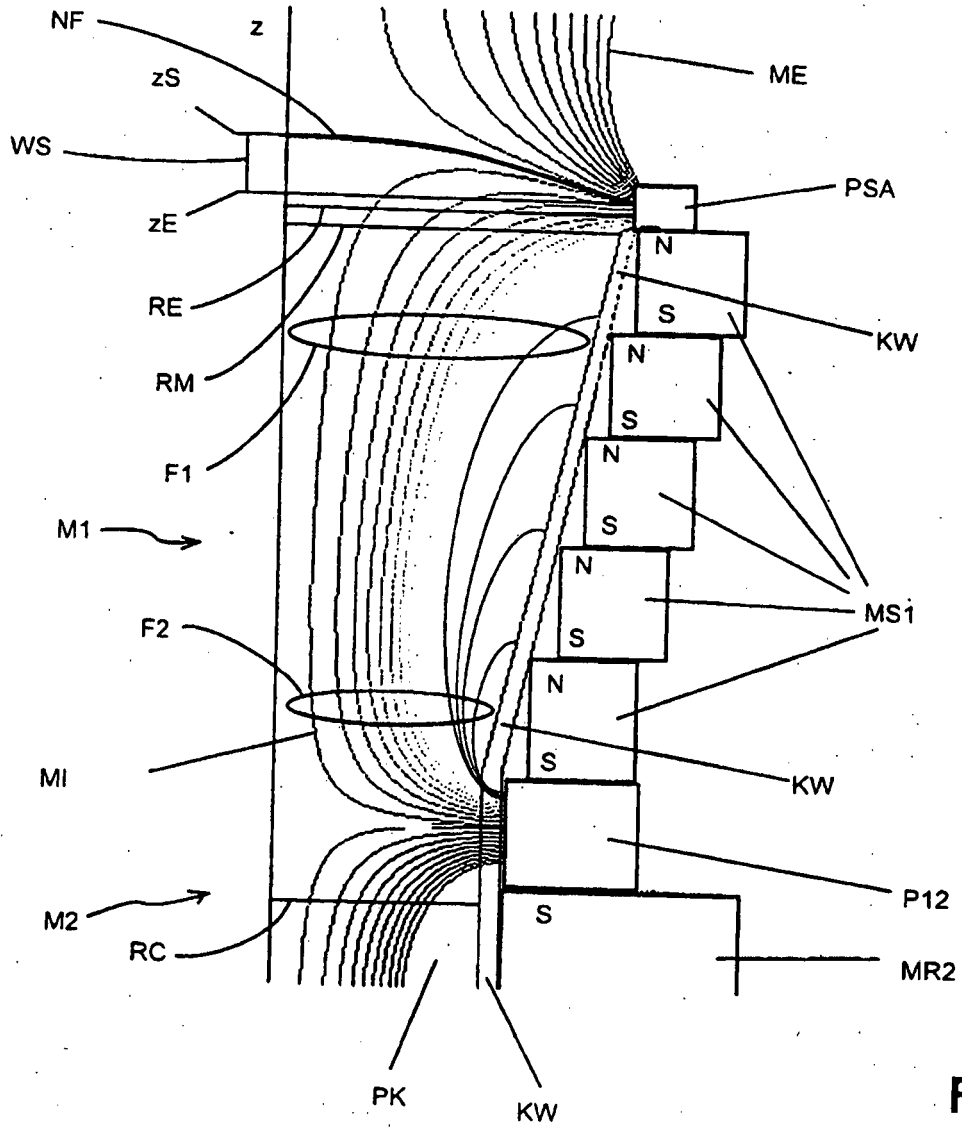


Fig. 6

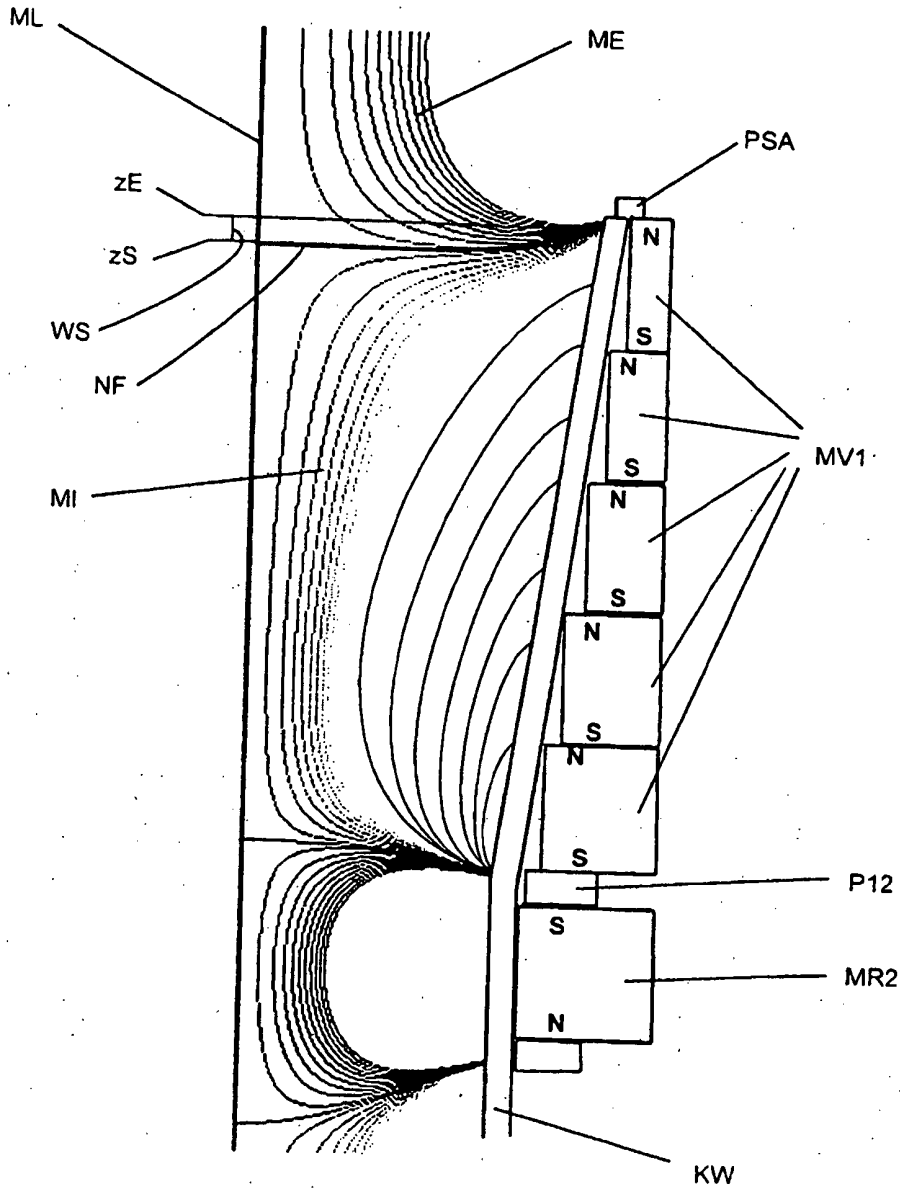


Fig. 7

**IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE**

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

**In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente**

- US 6448721 B2 [0007] [0011]
- DE 10130464 A1 [0009] [0020] [0026] [0027] [0029] [0037]
- DE 10153723 A1 [0009]
- DE 10300776 B3 [0009]
- DE 10014033 A1 [0010]
- DE 10014034 A1 [0010]
- US 5189446 A [0012]
- US 2956666 A [0013]
- GB 2295485 A [0013] [0016]
- US 5847493 A [0014]
- US 6060836 A [0015]
- US 3735591 A [0017]
- DE 1222589 [0018]
- DE 19828704 A1 [0018]
- US 6448721 B [0019]

**In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur**

- **SHIRASAKI ; TAHARA.** Plume Measurements and Miniaturization of the Hall Thrusters with Circular Cross-sectional Discharge Chambers. *29th Int. Electric Propulsion Conf.*, 2005 [0008]