



(11) **EP 3 662 160 B1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:  
**26.05.2021 Patentblatt 2021/21**

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

(21) Anmeldenummer: **18742465.0**

(86) Internationale Anmeldenummer:  
**PCT/EP2018/069251**

(22) Anmeldetag: **16.07.2018**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:  
**WO 2019/025174 (07.02.2019 Gazette 2019/06)**

(54) **FELDEMISSIONSANTRIEBSSYSTEM SOWIE VERFAHREN ZUM KALIBRIEREN UND BETREIBEN EINES FELDEMISSIONSANTRIEBSSYSTEMS**

FIELD EMISSION THRUSTER AND METHOD FOR CALIBRATION AND OPERATION OF A FIELD EMISSION THRUSTER

PROPULSEUR À ÉMISSION DE CHAMP ET PROCÉDÉ D'ÉTALONNAGE ET DE FONCTIONNEMENT D'UN PROPULSEUR À EMISSION DE CHAMP

(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**

(56) Entgegenhaltungen:  
**WO-A2-2004/057643 US-A1- 2016 010 631**

(30) Priorität: **31.07.2017 DE 102017117316**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:  
**10.06.2020 Patentblatt 2020/24**

(73) Patentinhaber: **Morpheus Space GmbH  
01127 Dresden (DE)**

(72) Erfinder:  
• **BOCK, Daniel  
01277 Dresden (DE)**  
• **TAJMAR, Martin  
01324 Dresden (DE)**  
• **LAUFER, Philipp  
01099 Dresden (DE)**

- **IVANHOE VASILJEVICH ET AL: "Development of an Indium mN-FEEP Thruster", 44TH AIAA/ASME/SAE/ASEE JOINT PROPULSION CONFERENCE AND EXHIBIT (44TH AIAA/ASME/SAE/ASEE JOINT PROPULSION CONFERENCE AND EXHIBIT 20080721 TO 20080723 HARTFORD, AMERICAN INSTITUTE OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS, USA, Bd. 44th, Nr. AIAA 2008-4534, 1. Januar 2008 (2008-01-01), Seiten 1-9, XP008161960, DOI: 10.2514/6.2008-4534 ISBN: 978-1-56347-943-4**
- **TAJMAR M ET AL: "Development of Electric and Chemical Microthrusters", INTERNATIONAL JOURNAL OF AEROSPACE ENGINEERING,, Bd. 2011, 1. Januar 2011 (2011-01-01), Seiten 361215-1, XP002696717, DOI: 10.1155/2011/361215**
- **L.F.VELASQUEZ-GARCIA ETAL: "A Planar Array of Micro-Fabricated Electrospray Emitters for Thruster Applications", JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS., Bd. 15, Nr. 5, 30. Oktober 2006 (2006-10-30), Seiten 1272-1280, XP055365333, US ISSN: 1057-7157, DOI: 10.1109/JMEMS.2006.879710**

(74) Vertreter: **Banse & Steglich  
Patentanwälte PartmbB  
Patentanwaltskanzlei  
Herzog-Heinrich-Straße 23  
80336 München (DE)**

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).

**EP 3 662 160 B1**

## Beschreibung

Technisches Gebiet

**[0001]** Die Erfindung betrifft Feldemissionsantriebe für Raumfahrzeuge. Weiterhin betrifft die vorliegende Erfindung Verfahren zum Betreiben eines Feldemissionsantriebs.

Technischer Hintergrund

**[0002]** Für Raumfahrzeuge sind eine Reihe verschiedener Antriebstechnologien bekannt, wie z. B. chemische Antriebe, Kaltgasantriebe, Gasionenantriebe, Plasmaantriebe und dergleichen. Diese Antriebstechnologien haben den Nachteil, dass sich diese für kleinere Satelliten aus physikalischen Gründen oder aus Gründen der Effizienz nicht zufriedenstellend miniaturisieren lassen. Der zunehmende Einsatz von Kleinstsatelliten erfordert jedoch die Bereitstellung von geeigneten Antriebstechnologien mit hoher Effizienz. Insbesondere sind Feldemissionsantriebe aufgrund ihres sehr hohen spezifischen Impulses von mehreren 1.000 s besonders geeignet, in Kleinstsatelliten verwendet zu werden.

**[0003]** Beispielsweise ist aus der Druckschrift AMR Propulsions Innovations, "IFM Nano Truster", Datenblatt, 26.7.2017, <http://www.propulsion.at> ein Feldemissionsantrieb bekannt, der eine Flüssigmetall-Ionenquelle mit mehreren Flüssigmetall-Ionenemittern verwendet. Da nur eine gemeinsame Extraktorelektrode für alle Flüssigmetall-Ionenemitter verwendet wird, können die einzelnen Emittter nicht einzeln angesteuert werden.

**[0004]** Auch zünden die einzelnen Emittter aufgrund von Fertigungstoleranzen nicht gleichzeitig und in einer nicht kontrollierten Reihenfolge. Zudem hat jeder der Flüssigmetall-Ionenemitter ein individuelles Emissionsverhalten, sodass sich durch die Feldanordnung der Flüssigmetall-Ionenemitter in der Regel ein nicht vorhersehbarer Schubvektor einstellt.

**[0005]** Weiterhin ist aus Bock, D., Tajmar, M., "Highly Miniaturized FEEP Propulsion System (NanoFEEP) for Attitude and Orbit Control of CubeSats", Proceedings of the 67th International Astronautical Congress (IAC), IAC-16-C4.6.5, 26-30 September 2016 Guadalajara, Mexico, ein Feldemissionsantrieb für einen Kleinstsatelliten bekannt.

**[0006]** Aus der Druckschrift IVANHOE VASILJEVECH et al., "Development of an Indium mN-FEEP Thruster", 44TH AIAA/ASME/SAE/ASEE JOINT PROPULSION CONFERENCE AND EXHIBIT, AMERICAN INSTITUTE OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS, USA, Bd. 44th, Nr. AIAA 20084584, 1. Januar 2008, Seiten 1-9, ISBN: 978-1-56347-943-4 ist ein Feldemissionsantriebssystem für Raumfahrzeuge bekannt, umfassend eine Steuereinheit, eine Triebwerksbaugruppe mit mehreren Feldemissions-Antriebseinheiten, die eine Ionenquelle mit mehreren Ionenemittern und den Ionenemittern zugeordneten in einer Feldanordnung angeord-

neten Extraktorelektroden aufweisen; und mehrere Extraktorelektroden Spannungsquellen, die jeweils den Extraktorelektroden zugeordnet sind.

**[0007]** Es ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Feldemissionsantriebssystem sowie ein Verfahren zu dessen Betrieb zur Verfügung zu stellen, das sich für den Einsatz in Kleinstsatelliten eignet, eine hohe Effizienz erreicht und verlustarm arbeitet. Zudem soll ein variabler Schubbereich um mehrere Größenordnungen erreicht werden. Weiterhin ist es Aufgabe der vorliegenden Erfindung, die Zündreihenfolge zu kontrollieren und einen variierenden Schubvektor zu kompensieren bzw. eine aktive Steuerung des Schubvektors zu ermöglichen, um einen kontrollierten Betrieb des Antriebssystems zu ermöglichen.

Offenbarung der Erfindung

**[0008]** Diese Aufgabe wird durch das Verfahren zum Betreiben eines Feldemissionsantriebssystems gemäß Anspruch 1 sowie durch ein Verfahren zum Kalibrieren eines Feldemissionsantriebssystems und ein Verfahren zum Betreiben eines Feldemissionsantriebssystems gemäß den nebengeordneten Ansprüchen gelöst.

**[0009]** Weitere Ausgestaltungen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

**[0010]** Gemäß einer Ausführungsform ist ein Feldemissionsantriebssystem für Raumfahrzeuge vorgesehen, umfassend:

- eine Steuereinheit;
- eine Triebwerksbaugruppe mit mehreren Feldemissions-Antriebseinheiten, die eine Ionenquelle mit mehreren Ionenemittern und den Ionenemittern jeweils zugeordneten, in einer Feldanordnung angeordneten Extraktorelektroden aufweisen; und
- mehrere Extraktorelektroden Spannungsquellen, die jeweils den Extraktorelektroden zugeordnet sind, um diese gesteuert durch die Steuereinheit mit einer individuellen Extraktorelektroden Spannung anzusteuern.

**[0011]** Das obige Feldemissionsantriebssystem weist eine Feldanordnung von mehreren Ionenemittern auf, denen jeweils eine Extraktorelektrode zugeordnet ist. Der Ionenemitter ist mit einer gemeinsamen Emitterspannung bzw. einem gemeinsamen Emitterspannungspotenzial belegbar, während die Extraktorelektroden voneinander elektrisch isoliert sind und über Extraktorelektroden Spannungsquellen mit individuell einstellbaren Extraktorelektroden Spannungen bzw. mit individuell einstellbaren Extraktorelektroden Spannungspotenzialen angesteuert werden können.

**[0012]** Weiterhin kann die Steuereinheit ausgebildet sein, um eine Feldstärke eines elektrischen Felds zwischen den Ionenemittern und der jeweils zugeordneten Extraktorelektrode auf eine bestimmte, einer vorgegebenen Höhe eines Ionenstroms entsprechende Extraktor-

elektrodenspannung einzustellen. Die bestimmte Extraktorelektrodenspannung für mindestens eine bestimmte Antriebseinheit wird in einem Kalibrierverfahren ermittelt, indem eine Strom-Spannungscharakteristik der betreffenden Antriebseinheit durch Messen eines Emitterstroms durch den Ionenemitter bei gleichzeitig deaktivierten übrigen Antriebseinheiten bei verschiedenen Spannungsdifferenzen zwischen Extraktorelektrode und Ionenemittern gemessen und die Extraktorelektroden-  
spannung bzw. das Extraktorelektrodenspannungspotenzial so eingestellt wird, dass sich ein Emitterstrom einstellt, der der vorgegebenen Höhe des Ionenstroms entspricht.

**[0013]** Der obige Kalibriervorgang sieht also vor, die Extraktorelektroden der Feldemissions-Antriebseinheiten einzeln mit variierenden Spannungsdifferenzen zwischen der betreffenden Extraktorelektrode und den betreffenden Ionenemittern anzusteuern und gleichzeitig einen Stromfluss aus der Emitterspannungsquelle zu messen, um so eine Charakteristik des entsprechenden Ionenemitters zu messen. Somit kann ein spannungsabhängiger Ionenstrom für jeden Ionenemitter bestimmt werden, so dass eine gewünschte Höhe des Ionenstroms durch Einstellen der betreffenden Extraktorelektroden-  
spannung bzw. des betreffenden Extraktorelektroden-  
spannungspotenzials gezielt eingestellt werden kann. Somit können Ionenemitter in einer Feldanordnung mit derselben Emitterspannung (mit demselben Emitterspannungspotenzial) belegt sein und die den Ionenemittern jeweils zugeordneten Extraktorelektroden individuell angesteuert werden, um den Ionenstrom jedes einzelnen Ionenemitters einzustellen. Da die Ionenemitter auf demselben Spannungspotenzial liegen, können diese mit der gleichen Emitterspannungsquelle bzw. mit einer gemeinsamen Potenzialquelle betrieben werden und dadurch die Verluste bei der Hochspannungserzeugung verringert und der Bauraum und die Masse des Gesamtsystems reduziert werden. Alternativ können die Extraktorelektroden-  
spannungsquellen für jede der Extraktorelektroden mit ihrem positiven Potenzialanschluss miteinander und mit den Ionenemittern verbunden sein. Die separate Ansteuerung der Extraktorelektroden ermöglicht zudem eine präzisere Einstellung des Schubs und der Schubrichtung der Triebwerksbaugruppe.

**[0014]** Weiterhin kann eine Strommesseinheit vorgesehen sein, die ausgebildet ist, um einen elektrischen Strom aus einem der Ionenemitter, aus mehreren der Ionenemitter oder aus allen Ionenemittern und/oder in die Extraktorelektrode zu messen.

**[0015]** Gemäß einer Ausführungsform kann mindestens eine der Extraktorelektroden mit zwei, drei, vier oder mehr als vier voneinander elektrisch isolierten Extraktorelektrodensegmenten ausgebildet sein, die gemeinsam eine insbesondere ringförmige Extraktorelektrode bilden, wobei die Extraktorelektroden-  
spannungsquelle ausgebildet ist, um die Extraktorelektroden-  
segmente mit individuellen Segmentspannungen so zu versehen, dass im Betrieb eine vorbestimmte Richtung des emittierten

Ionenstrahls eingestellt wird, und/oder wobei separate Segmentspannungsquellen für mehrere der Extraktorelektroden-  
segmente vorgesehen sind, um die Extraktorelektroden-  
segmente mit individuellen Segmentspannungen so zu versehen, dass im Betrieb eine vorbestimmte Richtung des Ionenstrahls eingestellt wird.

**[0016]** Es kann vorgesehen sein, dass die Extraktorelektroden jeweils aus mehreren elektrisch voneinander isolierten Extraktorelektroden-  
segmenten aufgebaut sind, die wiederum mit unterschiedlichen Segmentspannungen ansteuerbar sind. Die Höhen der einzelnen Segmentspannungen orientieren sich dabei an einer anzulegenden Extraktorelektroden-  
spannung bzw. einem anzulegenden Extraktorelektroden-  
spannungspotenzial.

**[0017]** Insbesondere können die Segmentspannungen durch separate Segmentspannungsquellen, durch Spannungsteiler, die Segmentspannungen durch Teilung der der betreffenden Extraktorelektrode zugeordneten Extraktorelektroden-  
spannung erzeugen, oder durch einstellbare Vorwiderstände der Extraktorelektroden-  
segmente eingestellt werden.

**[0018]** Dadurch können mögliche Ausrichtungsfehler eines resultierenden Schubstrahls im Betrieb aufgrund von Bauteiltoleranzen oder dergleichen ausgeglichen werden. Durch die Möglichkeit der Wahl verschiedener Segmentspannungen können die Anforderungen an die Bauteiltoleranzen für die Antriebseinheiten stark verringert werden, da Ausrichtungsfehler des resultierenden Schubstrahls bzw. geometrische Anordnungsfehler der Ionenemitter zu den Extraktorelektroden aktiv kompensiert werden können.

**[0019]** Durch die Wiederholung des Kalibrierungsprozesses in regelmäßigen Zeitabständen können unerwünschte Änderungen des Ionenemissionsverhaltens der einzelnen Ionenemitter im Langzeitbetrieb detektiert und gegebenenfalls kompensiert werden.

**[0020]** Es kann weiterhin ein Neutralisator vorgesehen sein, um einen Elektronenstrom steuerbarer Stärke abzugeben.

**[0021]** Gemäß einer Ausführungsform kann die Ionenquelle der Triebwerksbaugruppe einen Treibstofftank für einen flüssigen oder verflüssigbaren elektrisch leitfähigen Treibstoff umfassen, wobei der Treibstoff an den der jeweiligen Extraktorelektrode zugewandten Spitzen der Ionenemitter zur Feldionisation ausstoßbar ist.

**[0022]** Es kann vorgesehen sein, dass die Extraktorelektroden ringförmig mit einer Mittenöffnung ausgebildet sind, die konzentrisch zu einer Erstreckungsrichtung der Ionenemitter angeordnet sind.

**[0023]** Gemäß einer Ausführungsform können die Extraktorelektroden durch eine Extraktorplatte gehalten und voneinander elektrisch isoliert sein, wobei die Extraktorplatte insbesondere aus nichtleitendem Material gebildet ist.

**[0024]** Weiterhin können die Extraktorelektroden-  
spannungsquellen jeweils einen einstellbaren Spannungsteiler aufweisen, um eine einstellbare Extraktorelektroden-  
spannung vorzugeben.

**[0025]** Es kann vorgesehen sein, dass eine, mindestens eine, mehrere oder jede der Extraktorelektroden voll oder teilweise umfänglich einen in Richtung der Ionenemitter hervorstehende elektrisch leitende erste Abschirmungsstruktur aufweist, und/oder eine, mindestens eine oder jede der Extraktorelektroden voll oder teilweise umfänglich eine zu den Ionenemittern abgewandten Richtung hervorstehende elektrisch leitende zweite Abschirmungsstruktur aufweist.

**[0026]** Das obige Verfahren basiert auf einem Feldemissionsantriebssystem mit einer gemeinsamen Emitterelektrode und voneinander getrennten Extraktorelektroden, die separat mit individuellen Extraktorpotenzialen angesteuert werden können.

**[0027]** Gemäß einem weiteren Aspekt ist ein Verfahren zum Kalibrieren des obigen Feldemissionsantriebssystems vorgesehen, wobei eine Feldstärke eines elektrischen Felds zwischen den Ionenemittern und der jeweils zugeordneten Extraktorelektrode für jede der mehreren Feldemissions-Antriebseinheiten auf eine einem vorgegebenen einzustellenden Ionenstrom entsprechende Extraktorelektrodenspannung einstellbar ist, die sich aus einer Strom-Spannungscharakteristik der Feldemissions-Antriebseinheiten und dem vorgegebenen einzustellenden Ionenstrom einer betreffenden der mehreren Antriebseinheiten ergibt, mit folgenden Schritten:

- für jede der Feldemissions-Antriebseinheiten, Messen einer Strom-Spannungscharakteristik durch Messen eines elektrischen Emitterstroms durch den Ionenemitter der betreffenden Feldemissions-Antriebseinheit bei gleichzeitig deaktivierten oder mit konstantem Strom betriebenen übrigen Feldemissions-Antriebseinheiten bei verschiedenen Extraktorelektrodenspannungen
- Einstellen der Extraktorelektrodenspannungen für jede der Feldemissions-Antriebseinheiten jeweils abhängig von der Strom-Spannungscharakteristik und dem vorgegebenen Ionenstrom, so dass sich ein elektrischer Emitterstrom der betreffenden Feldemissions-Antriebseinheiten einstellt, der dem vorgegebenen einzustellenden Ionenstroms entspricht.

**[0028]** Gemäß einem weiteren Aspekt ist ein Verfahren zum Betreiben des obigen Feldemissionsantriebssystems vorgesehen, wobei eine Feldstärke eines elektrischen Felds zwischen den Ionenemittern und der jeweils zugeordneten Extraktorelektrode für jede der mehreren Feldemissions-Antriebseinheiten auf eine einem vorgegebenen einzustellenden Ionenstrom entsprechende Extraktorelektrodenspannung einstellbar ist, die sich aus einer Strom-Spannungscharakteristik der Feldemissions-Antriebseinheiten und dem vorgegebenen einzustellenden Ionenstrom einer betreffenden der mehreren Antriebseinheiten ergibt. Ein vorgegebener Schubvektor des Feldemissionsantriebssystems wird eingestellt, indem jede der Feldemissions-Antriebseinheiten mit einer individuellen Extraktorelektrodenspannung an-

gesteuert wird, so dass sich der vorgegebene Schubvektor als Summe der Ionenströme aus den Feldemissions-Antriebseinheiten resultiert.

#### 5 Kurze Beschreibung der Zeichnungen

**[0029]** Ausführungsformen werden nachfolgend anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

- 10
- Figur 1 eine schematische Darstellung eines Feldemissionsantriebssystems mit mehreren Antriebseinheiten;
- 15
- Figur 2 eine Querschnittsdarstellung von nebeneinander angeordneten Antriebseinheiten;
- 20
- Figur 3 eine detaillierte Querschnittsdarstellung einer Antriebseinheit;
- Figur 4 eine Darstellung einer möglichen Anordnung der Antriebseinheiten des Antriebssystems der Figur 1;
- 25
- Figur 5 ein Flussdiagramm zur Veranschaulichung eines Verfahrens zum Kalibrieren der Antriebseinheiten;
- 30
- Figur 6 eine beispielhafte Strom-Spannungskennlinie einer Antriebseinheit;
- 35
- Figur 7a bis 7c verschiedene perspektivische Ansichten von Varianten einer Segmentierung der Extraktorelektroden.

#### Beschreibung von Ausführungsformen

**[0030]** Figur 1 zeigt schematisch den Aufbau eines Feldemissionsantriebssystems 1 mit einer Triebwerksbaugruppe 2, einem Neutralisator 3 und einer Steuereinheit 4. Figur 2 zeigt eine detaillierte Ansicht eines Ausschnitts aus der Triebwerksbaugruppe 2.

**[0031]** Wie in der Querschnittsansicht der Figur 2 detaillierter dargestellt, umfasst die Triebwerksbaugruppe 2 eine Heizeinheit 21 für eine Ionenquelle 22, die einen Treibstofftank 221 mit Treibstoff 223 und damit elektrisch und fluidisch verbundene Ionenemitter 222 umfasst. Die Heizeinheit 21 dient dazu, den Treibstoff in dem Treibstofftank 221 in einen flüssigen Zustand zu versetzen und flüssig zu halten. Die Heizeinheit 21 wird über eine Heizsteuerung 41 als Teil der Steuereinheit 4 mit Leistung versorgt und kann durch diese temperaturgeregelt werden.

**[0032]** Der Treibstofftank 221 ist aus einem elektrisch leitfähigen Material ausgebildet, wie beispielsweise Tantal, Rhenium, Wolfram, Graphit oder Titan. Wie in der detaillierteren Querschnittsansicht der Antriebseinheiten

23 in Figuren 2 und 3 gezeigt, sind die Ionenemitter 222 mit einer Spitze, insbesondere nadelförmig, kegel- oder pyramidenförmig hervorstehend, ausgebildet und weisen eine Einrichtung oder Ausgestaltung auf, um den flüssigen elektrisch leitenden Treibstoff 223 aus dem Treibstofftank 221 zur Feldionisation aus dem Ionenemitter 222 zu fördern. Insbesondere kann eine im Inneren zur Spitze verlaufende Fluidleitung 224 vorgesehen sein, die den flüssigen elektrisch leitenden Treibstoff aus dem Treibstofftank 221 zur Feldionisation aus dem Ionenemitter 222 z.B. gefördert durch den Kapillareffekt ausstößt. Alternativ können die Ionenemitter 222 auch porös mit einer Vielzahl von Leitungen ausgebildet sein, wobei durch die offene Porosität der Treibstoff 223 zur Spitze des Ionenemitters 222 gefördert werden kann. Die Ionenemitter 222 können beispielsweise aus Tantal, Wolfram, Rhenium, Titan oder anderen hochschmelzenden Metallen ausgebildet sein.

**[0033]** Der Treibstoff wird dabei mithilfe eines Kapillareffekts durch die Fluidleitungen 224 der Ionenemitter 222 geführt. Als Material für den Treibstoff kommt eine elektrisch leitfähige Flüssigkeit oder ein niedrigschmelzendes Metall in Betracht, wie z. B. Gallium, Indium, Bismut, Blei, Gold oder dergleichen.

**[0034]** Über der Spitze jedes der Ionenemitter 222 ist eine jeweilige Extraktorelektrode 24 angeordnet, die eine Mittenöffnung 241 aufweist, die im Wesentlichen koaxial über der Spitze des Ionenemitters 222 liegt. Die Extraktorelektroden 24 sind vorzugsweise durch eine Extraktorplatte 25 gehalten und voneinander elektrisch isoliert, z. B. durch eine Extraktorplatte 25 aus nichtleitendem Material.

**[0035]** Der Treibstofftank 221 ist elektrisch mit den Ionenemittern 222 verbunden und erhält ein Hochspannungspotenzial von einer Emitterspannungs-Versorgungsquelle 42. Die Emitterspannungs-Versorgungsquelle 42 kann einstellbar sein und legt die Emitterspannung bzw. das Emitterspannungspotenzial auf einen festgelegten Wert fest.

**[0036]** Die Extraktorelektroden 24 sind jeweils mit einer steuerbaren Extraktorelektrodenspannungsquelle 43 individuell verbunden, die Teil der Steuereinheit 4 darstellt. Die Extraktorelektrodenspannungsquellen 43 sind individuell variabel einstellbar, um für jede der Antriebseinheiten 23 eine individuelle Extraktorelektrodenspannung und somit eine individuelle elektrische Feldstärke zwischen dem Ionenemitter 222 und der Extraktorelektrode 24 einstellen zu können. Alternativ zu separaten Extraktorelektrodenspannungsquellen 43 für jede der Extraktorelektroden 24 kann eine gemeinsame Extraktorelektrodenspannungsquelle 43 vorgesehen sein, wobei die unterschiedlichen Spannungen für die Extraktorelektroden 24 durch jeweils zugeordnete Spannungsteiler eingestellt werden können. Auch andere Möglichkeiten, individuell Extraktorelektrodenspannungen für die Extraktorelektroden 24 einstellen zu können, sind denkbar.

**[0037]** Die Steuereinheit 4 ist insbesondere ausgebil-

det, die Extraktorelektrodenspannung bzw. das Extraktorelektrodenpotenzial der Extraktorelektroden 24 individuell zu steuern, so dass die Zeitpunkte des Zündens und die Höhen der Ionenemission aus den einzelnen entsprechend zugeordneten Ionenemittern 222 gesteuert werden können. So können einzelne Ionenemitter 222 ein- oder ausgeschaltet werden sowie unterschiedlich hohe Emissionsströme für jeden einzelnen der Ionenemitter 222 gesteuert werden. Die Potenzialdifferenz zwischen dem Emitterspannungspotenzial und dem Extraktorspannungspotenzial beträgt üblicherweise mehrere +1000 Volt.

**[0038]** Da durch den Emittierionenstrom aus positiv geladenen Treibstoffionen, der im Betrieb aus den Antriebseinheiten 23 emittiert wird, das Antriebssystem 1 negativ aufgeladen wird, wird üblicherweise mithilfe des Neutralisators 3 ein Elektronstrom erzeugt und abgegeben. Der Neutralisator 3 kann beispielsweise als Feldemissions-Elektronenquelle oder thermische Elektronenquelle in an sich bekannter Weise ausgebildet sein. Die Steuereinheit 4 weist dazu eine Neutralisator-Steuereinrichtung 45 auf, die die Ansteuerung und Leistungsversorgung des Neutralisators 3 in an sich bekannter Weise vornehmen kann, z.B. um die Ladung des gesamten Antriebssystem 1 möglichst neutral zu halten.

**[0039]** In Figur 4 ist eine Anordnung von Extraktorelektroden 24 in einer Draufsicht dargestellt. Die Extraktorelektroden 24 sind beispielsweise rund und konzentrisch zu dem Ionenemitter 222 angeordnet. Mittig der Extraktorelektroden 24 befinden sich etwa runde Öffnungen 241, die konzentrisch zu den Ionenemittern 222 angeordnet sind, um den Ionenstrahl von dem Ionenemitter 222 auszulassen. Die Anordnung der Extraktorelektroden 24 kann als Feldanordnung vorgesehen sein, wobei die Extraktorelektroden 24 in Reihen angeordnet sind und zueinander versetzt sind, um eine möglichst hohe Anordnungsdichte zu erreichen.

**[0040]** Die Extraktorelektroden 24 sind auf der Extraktorplatte 25 miteinander verbunden, welche die Extraktorelektroden 24 in Position halten. Die Extraktorplatte 25 kann aus elektrisch nichtleitendem Material ausgebildet oder die Extraktorelektroden 24 isoliert auf der Extraktorplatte 25 angebracht sein. Eine, mindestens eine oder jede der Extraktorelektroden 24 weist umfänglich eine in Richtung der Ionenemitter 222 hervorstehende elektrisch leitende erste Abschirmungsstruktur 242 auf, der die durchgehende Beschichtung einer der den Ionenemittern zugewandten Seite der Extraktorplatte 25 mit sich anlagerndem Treibstoffmaterial durch das Prinzip der Abschattung verhindert. Dadurch wird verhindert, dass sich während des Betriebs ein elektrisch leitfähiger Pfad zwischen den einzelnen Extraktorelektroden 24 untereinander und zwischen diesen und dem Treibstofftank 221 ausbilden kann und dadurch ein elektrischer Kurzschluss entsteht.

**[0041]** Alternativ oder zusätzlich kann eine, mindestens eine, mehrere oder jede der Extraktorelektroden 24 eine umfänglich in Richtung des zu emittierenden Ionen-

strahls die Extraktorplatte 25 hervorstehende elektrisch leitende zweite Abschirmungsstruktur 245 aufweisen, der die durchgehende Beschichtung einer der den Ionenemittern 222 abgewandten Seite der Extraktorplatte 25 mit sich anlagerndem Treibstoffmaterial durch das Prinzip der Abschattung verhindert. Die zweite Abschirmungsstruktur 245 kann wulstartig ausgebildet sein. Dadurch wird verhindert, dass sich während des Betriebs ein elektrisch leitfähiger Pfad zwischen den einzelnen Extraktorelektroden 24 untereinander und zwischen diesen und dem Treibstofftank 221 ausbilden kann und dadurch ein elektrischer Kurzschluss entsteht.

**[0042]** Weiterhin kann die Extraktorplatte 25 zwischen den Extraktorelektroden 24 labyrinthartige bzw. mäanderförmige d.h. senkrecht zur Flächenrichtung der Extraktorplatte 25 herausragende Strukturen und/oder Vertiefungsstrukturen aufweisen, die sich entlang der Flächenrichtung der Extraktorplatte 25 erstrecken und dadurch eine durchgehende leitende Beschichtung im Langzeitbetrieb durch Ablagerung des Treibstoffmaterials durch das Prinzip der Abschattung verhindern. Beispielsweise kann eine Halterung zwischen der Heizeinheit 21 und Extraktorplatte 25 eine entsprechende labyrinthartige bzw. mäanderförmige Form oder Absätze aufweisen, die auch eine durchgehende Beschichtung durch Abschattung verhindern.

**[0043]** Zudem kann optional eine elektrisch leitfähige Deckelplatte 27 parallel zur Extraktorplatte 25 auf der den Ionenemittern abgewandten Seite der Extraktorplatte 25 angebracht sein. Die Deckelplatte 27 weist insbesondere kreisförmige Öffnungen 271 auf, die in Anordnungsrichtung der Ionenemitter 222 und der Extraktorelektroden 25 über den Extraktorelektroden 24 liegen und insbesondere gleiche oder größere Abmessungen (z.B. Radien) als die Extraktorelektroden 25 in Flächenrichtung der Extraktorplatte 25 aufweisen. Die Deckelplatte 27 kann elektrisch isoliert zu den Extraktorelektroden 24 sein. Die elektrische Isolierung zwischen der Deckelplatte 27 und den Extraktorelektroden 24 kann mit einem elektrisch isolierenden Abstandshalter 28 gewährleistet sein, der labyrinthartige bzw. mäanderförmige Strukturen aufweist, um auch diese im Langzeitbetrieb gegen eine durchgehende leitende Beschichtung durch Ablagerung von Treibstoff zu schützen. Das Vorsehen einer Deckelplatte 27 ist vorteilhaft, da durch Beaufschlagung mit einem Spannungspotenzial verhindert werden kann, dass sich in der Umgebung befindliche Teilchen zu den Ionenemittern 222 gelangen können. Zudem kann eine Ablagerung von Sputterteilchen oder reflektierten Treibstoff auf der Oberseite der Extraktorplatte 25 bei längerem Betrieb verhindert werden.

**[0044]** Im Raumfahrtbetrieb kann die Deckelplatte 27 den Einfluss eines lokalen Umgebungsplasmas auf die Antriebseinheiten 23 unterbinden. So wird eine Anziehung von z.B. freien/thermischen Elektronen aus dem Umgebungsplasma zu den Ionenemittern 222 unterbunden, die diese beschädigen könnten. Außerdem wird durch das Spannungspotenzial der Deckelplatte 27 das

Messen eines inkorrekten Emitterstroms durch einen solchen Sekundärelektronenstrom verhindert.

**[0045]** Die Steuereinheit 4 weist weiterhin eine Strommesseinheit 44 auf, um einen Stromfluss in die Extraktorelektroden spannungsquellen oder aus dem Neutralisator 3 zu messen.

**[0046]** Zum Betreiben des Antriebssystems 1 ist es wünschenswert, gleiche bzw. definierte Schubvektoren des Ionenstrahls aus den Ionenemittern 222 einzustellen. Aufgrund von Bauteil- und Aufbautoleranzen treten bei Anlegen gleicher Extraktorelektroden spannungen unterschiedliche Schubvektoren auf.

**[0047]** Es wird daher ein Verfahren vorgeschlagen, um die Stärke des Ionenstrahls definiert einzustellen. Dies erfolgt über die definierte individuelle Einstellung der Feldstärke des elektrischen Felds zwischen den Ionenemittern 222 und der jeweils zugeordneten Extraktorelektrode 24 durch Variation der Extraktorelektroden spannung bzw. der dem Extraktorelektroden spannungspotenzial bzw. der Spannungsdifferenz zwischen den Extraktorelektroden 24 und den zugehörigen Ionenemittern 222. Zur Einstellung der Extraktorelektroden spannung wird ein Verfahren ausgeführt, wie es in dem Flussdiagramm der Figur 5 dargestellt ist.

**[0048]** In Schritt S1 wird eine der Antriebseinheiten 23 ausgewählt. In Schritt S2 wird für die ausgewählte Antriebseinheit 23 eine Strom-Spannungskennlinie vermessen. Die Strom-Spannungskennlinie gibt eine Charakteristik eines Stromflusses über einer Spannungsdifferenz zwischen dem Extraktorelektroden spannungspotenzial und dem Emitterspannungspotenzial der betreffenden Antriebseinheit 23 an, der sich bei einem durch die Extraktorelektroden spannung einstellenden Feldstärke in der betreffenden Antriebseinheit 23 einstellt. Das Vermessen erfolgt bei deaktivierten oder mit konstantem (bekanntem) Strom betriebenen (d.h. aktivierten) übrigen Antriebseinheiten 23 und mithilfe der Strommesseinheit 44, die in diesem Fall die Höhe des Ionenstroms aller aktivierten Antriebseinheiten 23 misst. Das Messen der Höhe des Ionenstroms erfolgt durch Messen des elektrischen Stroms aus der Emitterspannungs-Versorgungsquelle 42 bzw. des elektrischen Stroms, der in die Ionenquelle fließt. Der Ionenstrom der zu vermessenden Antriebseinheit 23 entspricht im Wesentlichen dem gemessenen in die Ionenquelle fließenden elektrischen Strom abzüglich der bekannten Ionenströme der übrigen Antriebseinheiten 23 (d.h. bei aktivierten übrigen Antriebseinheiten 23). Werden mit anderen Worten die übrigen Antriebseinheiten 23 mit einem bekannten Strom betrieben, so lässt sich der Ionenstrom der betreffenden Antriebseinheit 23 durch Subtraktion der Ströme der übrigen Antriebseinheiten 23 von dem erfassten Strom ermitteln. Wenn für jede Vermessung lediglich die zu vermessende Antriebseinheit 23 aktiv ist, entspricht der erfasste elektrische Strom dem Ionenstrom bei der angelegten Feldstärke bzw. bei der angelegten Spannungsdifferenz zwischen dem Emitterspannungspotenzial und dem Extraktorelektroden spannungspotenzial. Somit

kann eine Strom-Spannungs-Charakteristik für jede der Antriebseinheiten 23 bestimmt werden. In Figur 6 ist eine solche Strom-Spannungskennlinie beispielhaft dargestellt.

**[0049]** In Schritt S3 wird überprüft, ob alle Antriebseinheiten 23 vermessen worden sind. Ist dies der Fall (Alternative: Ja), so wird das Verfahren mit Schritt S4 fortgesetzt, andernfalls wird zu Schritt S1 zurückgesprungen und eine nächste noch nicht vermessene Antriebseinheit 23 vermessen. Auf diese Weise wird für jede der Antriebseinheiten 23 eine Strom-Spannungscharakteristik aufgezeichnet.

**[0050]** In Schritt S4 werden die Extraktorelektroden-spannungen so eingestellt, um für jedes der Antriebseinheiten 23 eine Feldstärke einzustellen, die einer gewünschten Stärke des Ionenstroms entspricht.

**[0051]** Wie weiterhin mit Bezug zu Figur 4 und in Verbindung mit den jeweils verschiedenen Ansichten der Figuren 7a - 7c gezeigt, können die Extraktorelektroden 24 segmentiert ausgebildet sein, wobei Extraktorelektroden-segmente 243 z.B. durch Beabstandung voneinander elektrisch voneinander isoliert sind und in zusammengesetztem Zustand die kreisförmige Extraktorelektrode 24 ausbilden. Es bestehen Möglichkeiten der Anordnung der Extraktorelektroden-segmente 243 entsprechend den Ausführungsformen der Fig. 7a bis 7c, wobei die Extraktorelektroden 24 in vier gleiche Extraktorelektroden-segmente 243 (Figur 7a), in zwei gleiche Extraktorelektroden-segmente 243 (Figur 7b) und in drei Extraktorelektroden-segmente 243 (Figur 7c) segmentiert sind. Durch Variation der Segmentspannungen an den einzelnen Extraktorelektroden-segmenten 243 einer Extraktorelektrode 24 lässt sich eine Asymmetrie des Ionenstrahls, der von dem Ionenemitter 222 emittiert wird, d. h. eine Neigung des Verlaufs des Ionenstrahls bezüglich der Ausrichtung zwischen Ionenemitter 222 und Extraktorelektrode 24 kompensieren. Eine solche Asymmetrie ergibt sich durch Bauteiltoleranzen und Fertigungstoleranzen der Antriebseinheiten 23.

**[0052]** Sind die Extraktorelektroden segmentiert ausgebildet, so kann das obige Kalibrierungsverfahren zunächst durch Anlegen der für die Vermessung benötigten Extraktorelektroden-spannungen an jedes der Extraktorelektroden-segmente durchgeführt werden.

**[0053]** Eine Asymmetrie kann beispielsweise während des Kalibrierverfahrens oder in einem separaten Verfahren festgestellt werden. Dazu kann jedes der Extraktorelektroden-segmente 243 mit einer separaten Möglichkeit einer Strommessung versehen werden. Während jede der Antriebseinheiten 23 nacheinander zur Ermittlung der Strom-Spannungscharakteristik vermessen werden, so dass sich ein Ionenstrahl ausbildet, wird bei einer oder mehreren bestimmten Extraktorelektroden-spannungen ein parasitärer Strom durch jedes der Extraktorelektroden-segmente 243 gemessen. Dasjenige Extraktorelektroden-segment 243, durch das der höchste Stromfluss gemessen wird, entspricht beispielsweise dem Extraktorelektroden-segment 243, der den Ionenstrahl am

stärksten in seine Richtung ablenkt und der entsprechend am nächsten an dem Ionenstrahl angeordnet ist. Ausgehend von der gewünschten Extraktorelektroden-spannung (bzw. von der gewünschten Feldstärke) können nun die einzelnen Segment-spannungen angepasst werden.

**[0054]** Durch eine Variation einer an einem Teil der einzelnen Extraktorelektroden-segmente 243 der Antriebseinheit 23 anliegenden Segment-spannungen kann zusätzlich zum Anlegen der Extraktorelektroden-spannung an die übrigen Extraktorelektroden-segmente 243 noch die Richtung des Ionenstrahls variiert werden. Beispielsweise kann durch iterative Anpassung der Segment-spannungen an dem Teil der Extraktorelektroden-segmente 243 die Richtung des Ionenstrahls an eine gewünschte Richtung, insbesondere die Richtung parallel zur Anordnungsrichtung zwischen Ionenemitter 222 und Extraktorelektrode 24 ausgerichtet werden. Durch die iterative Anpassung eines Teils der Segment-spannungen ausgehend von der zuvor bestimmten und eingestellten Extraktorelektroden-spannung können sowohl die Stärke des Ionenstrahls genau angepasst werden als auch die Bauteil- und Fertigungstoleranzen der Antriebseinheit 23 ausgeglichen werden.

**[0055]** Alternativ können alle Segment-spannungen so um die einzustellende Extraktorelektroden-spannung variiert werden, so dass der Mittelwert der einzelnen Segment-spannungen etwa der Extraktorelektroden-spannung entspricht.

**[0056]** Beispielsweise kann die Anpassung der einzelnen Segment-spannungen bzw. der Richtung des Ionenstrahls insbesondere mithilfe von Spannungsteilern durchgeführt werden, wobei die betreffende Segment-spannung aus der Extraktorelektroden-spannung generiert wird. Somit können Segment-spannungen durch Spannungsteiler, auch einstellbare Spannungsteiler, durch die Extraktorelektroden-spannungsquelle erzeugt werden. Es ist auch eine separate Ansteuerung mit einzelnen Spannungsquellen für jedes Extraktorelektroden-segment möglich.

**[0057]** Wird beispielsweise in der Ausführungsform der Fig. 7a ein im Vergleich zu den Strömen in die übrigen Extraktorelektroden-segmente 243 hoher Stromfluss durch eines der Extraktorelektroden-segmente 243a gemessen, so kann durch Anpassen eines einstellbaren elektrischen Vorwiderstandes bzw. durch Anpassen eines einstellbaren Spannungsteilers die entsprechende Segment-spannung aus der Extraktorelektroden-spannung reduziert werden, um so eine höhere Anziehung der Treibstoffionen des Ionenstrahls durch die übrigen Extraktorelektroden-segmente 243 zu erreichen. Dadurch wird der Ionenstrahl von dem betreffenden Extraktorelektroden-segment 243a weggelenkt, da dieser mehr von den übrigen Extraktorelektroden-segmenten 243 angezogen wird. Durch entsprechendes Kalibrieren der den Extraktorelektroden-segmenten 243 zugeordneten, veränderbaren Vorwiderstände bzw. der den Extraktorelektroden-segmenten 243 zugeordneten Spannungstei-

ler kann so eine Kalibrierung der betreffenden Antriebseinheit 23 vorgenommen werden. Auf diese Weise lassen sich Bauteiltoleranzen der Extraktorelektrode 24 und Ausrichtungsfehler ausgleichen, und die Präzision bei der Fertigung und Montage der Extraktorelektrodensegmente 243 und der Ionenemitter 222 kann reduziert werden.

**[0058]** Das obige Feldemissionsantriebssystem kann durch separate Ansteuerung der Antriebseinheiten 23 betrieben werden. Dabei werden die Ionenströme der einzelnen Antriebseinheiten 23 gemäß einer Schubvektorsteuerung durch Vorgabe eines Schubvektors bestimmt. Die einzelnen Ionenströme werden durch Vorgabe einer entsprechenden sich aus der Strom-/Spannungscharakteristik ergebenden Extraktorelektrodenspannung jeweils eingestellt, so dass neben einer sich aus der Summe der Ionenstrahlen ergebenden Gesamt Schubstärke auch ein vorgegebenes Moment auf das Feldemissionsantriebssystem ausgeübt wird, das sich aus der Anordnung der einzelnen Antriebseinheiten und den jeweiligen durch die betreffenden Ionenstrahlen ergebenden Schubstärken resultiert.

#### Patentansprüche

1. Feldemissionsantriebssystem (1) für Raumfahrzeuge, umfassend:

- eine Steuereinheit (4);
- eine Triebwerksbaugruppe (2) mit mehreren Feldemissions-Antriebseinheiten (23), die eine Ionenquelle mit mehreren Ionenemittern (222) und den Ionenemittern (222) zugeordneten in einer Feldanordnung angeordneten Extraktorelektroden (24) aufweisen;
- mehrere Extraktorelektrodenspannungsquellen (43), die jeweils den Extraktorelektroden (24) zugeordnet sind, um diese gesteuert durch die Steuereinheit (4) mit einer individuellen Extraktorelektrodenspannung anzusteuern.

2. Feldemissionsantriebssystem (1) nach Anspruch 1, mit einer Strommesseinheit (44), die ausgebildet ist, um einen elektrischen Strom aus den Ionenemittern (222) und/oder in die Extraktorelektroden (24) zu messen.

3. Feldemissionsantriebssystem (1) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Steuereinheit (4) ausgebildet ist, um eine Feldstärke eines elektrischen Felds zwischen den Ionenemittern (222) und der jeweils zugeordneten Extraktorelektrode (24) auf eine bestimmte, einer vorgegebenen Höhe eines Ionenstroms entsprechende Extraktorelektrodenspannung einzustellen, wobei die bestimmte Extraktorelektrodenspannung für eine bestimmte Feldemissions-Antriebseinheit (23) ermittelt wird, indem

eine Strom-Spannungscharakteristik der betreffenden Feldemissions-Antriebseinheit (23) durch Messen eines Emitterstroms durch den Ionenemitter (222) bei gleichzeitig deaktivierten oder mit konstantem Strom betriebenen übrigen Feldemissions-Antriebseinheiten (23) bei verschiedenen Spannungen gemessen wird und die Extraktorelektrodenspannung so eingestellt wird, dass sich ein Emitterstrom der bestimmten Feldemissions-Antriebseinheit (23) einstellt, der der vorgegebenen Höhe des Ionenstroms entspricht.

4. Feldemissionsantriebssystem (1) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei mindestens eine der Extraktorelektroden (24) mit zwei, drei, vier oder mehr als vier voneinander elektrisch isolierten Extraktorelektrodensegmenten (243) ausgebildet ist, die gemeinsam eine insbesondere ringförmige Extraktorelektrode (24) bilden, wobei die Extraktorelektrodenspannungsquelle (43) ausgebildet ist, um die Extraktorelektrodensegmente (243) mit individuellen Segmentspannungen so zu versehen, dass im Betrieb eine vorbestimmte Richtung des Ionenstrahls eingestellt wird, und/oder wobei separate Segmentspannungsquellen für mehrere der Extraktorelektrodensegmente (243) vorgesehen sind, um die Extraktorelektrodensegmente (243) mit individuellen Segmentspannungen so zu versehen, dass im Betrieb eine vorbestimmte Richtung des Ionenstrahls eingestellt wird.

5. Feldemissionsantriebssystem (1) nach Anspruch 4, wobei einem Teil der Extraktorelektrodensegmente (243) oder allen Extraktorelektrodensegmenten (243) jeweils ein einstellbarer Vorwiderstand oder jeweils ein einstellbarer Spannungsteiler zugeordnet sind, um aus der der betreffenden Extraktorelektrode (24) zugeordneten Extraktorelektrodenspannung oder einer sonstigen vorgegebenen Spannung die individuellen Segmentspannungen zu erzeugen.

6. Feldemissionsantriebssystem (1) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei ein Neutralisator (3) vorgesehen ist, um einen Elektronenstrom steuerbarer Stärke abzugeben.

7. Feldemissionsantriebssystem (1) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Triebwerksbaugruppe (2) eine Ionenquelle mit einem Treibstofftank (221) für einen flüssigen oder verflüssigbaren elektrisch leitfähigen Treibstoff (223) umfasst, wobei der Treibstoff (223) an der jeweiligen Extraktorelektrode (24) zugewandten Spitze der Ionenemitter (222) zur Feldionisation ausstoßbar ist.

8. Feldemissionsantriebssystem (1) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Extraktorelektroden (24) insbesondere ringförmig mit einer Mit-

tenöffnung ausgebildet sind, die konzentrisch zu einer Erstreckungsrichtung der Ionenemitter (222) angeordnet sind.

9. Feldemissionsantriebssystem (1) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Extraktorelektroden (24) durch eine Extraktorplatte (25) gehalten und voneinander elektrisch isoliert sind, wobei die Extraktorplatte (25) insbesondere aus nichtleitendem Material gebildet ist.
10. Feldemissionsantriebssystem (1) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Extraktorelektroden (24) jeweils einen einstellbaren Spannungsteiler aufweisen, um eine einstellbare Extraktorelektroden-Spannung vorzugeben.
11. Feldemissionsantriebssystem (1) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei eine, mindestens eine oder jede der Extraktorelektroden (24) voll oder teilweise umfänglich einen in Richtung der Ionenemitter (222) hervorstehende elektrisch leitende erste Abschirmungsstruktur (242) aufweist, und/oder wobei eine, mindestens eine oder jede der Extraktorelektroden (24) voll oder teilweise umfänglich eine zu den Ionenemittern (222) abgewandten Richtung hervorstehende elektrisch leitende zweite Abschirmungsstruktur (245) aufweist.
12. Verfahren zum Kalibrieren des Feldemissionsantriebssystems (1) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei eine Feldstärke eines elektrischen Felds zwischen den Ionenemittern (222) und der jeweils zugeordneten Extraktorelektrode (24) für jede der mehreren Feldemissions-Antriebseinheiten (23) auf eine einem vorgegebenen einzustellenden Ionenstrom entsprechende Extraktorelektroden-Spannung einstellbar ist, die sich aus einer Strom-Spannungscharakteristik und dem vorgegebenen einzustellenden Ionenstrom einer betreffenden der mehreren Feldemissions-Antriebseinheiten (23) ergibt, mit folgenden Schritten:
- für jede der Feldemissions-Antriebseinheiten (23), Messen einer Strom-Spannungscharakteristik durch Messen eines Emitterstroms durch den Ionenemitter (222) der betreffenden Feldemissions-Antriebseinheit (23) bei gleichzeitig deaktivierten oder mit konstantem Strom betriebenen übrigen Feldemissions-Antriebseinheiten (23) bei verschiedenen Extraktorelektroden-Spannungen
  - Einstellen der Extraktorelektroden-Spannungen für jede der Feldemissions-Antriebseinheiten (23) jeweils abhängig von der Strom-Spannungscharakteristik und dem vorgegebenen Ionenstrom, so dass sich ein Emitterstrom der be-

treffenden Feldemissions-Antriebseinheiten (23) einstellt, der dem vorgegebenen einzustellenden Ionenstrom entspricht.

13. Verfahren zum Betreiben eines Feldemissionsantriebssystems (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 11, wobei eine Feldstärke eines elektrischen Felds zwischen den Ionenemittern (222) und der jeweils zugeordneten Extraktorelektrode (24) für jede der mehreren Feldemissions-Antriebseinheiten (23) auf eine einem vorgegebenen einzustellenden Ionenstrom entsprechende Extraktorelektroden-Spannung einstellbar ist, die sich aus einer Strom-Spannungscharakteristik und dem vorgegebenen einzustellenden Ionenstrom einer betreffenden der mehreren der Feldemissions-Antriebseinheiten (23) ergibt, wobei ein vorgegebener Schubvektor des Feldemissionsantriebssystems (1) eingestellt wird, indem jede der Feldemissions-Antriebseinheiten (23) mit einer individuellen Extraktorelektroden-Spannung angesteuert wird, so dass sich der vorgegebene Schubvektor als Summe der Ionenströme aus den Feldemissions-Antriebseinheiten (23) resultiert.

## Claims

1. Field emission propulsion system (1) for a spacecraft, comprising:
- a control unit (4);
  - a propulsion assembly (2) having a plurality of field emission propulsion units (23) comprising an ion source having a plurality of ion emitters (222) and extractor electrodes (24) associated with the ion emitters (222) and arranged in a field arrangement;
  - a plurality of extractor electrode voltage sources (43), which are each assigned to the extractor electrodes (24), in order to control them by the control unit (4) with an individual extractor electrode voltage.
2. Field emission propulsion system (1) according to claim 1, having a current measuring unit (44) which is configured to measure an electric current flowing from the ion emitters (222) and/or into the extractor electrodes (24).
3. Field emission propulsion system (1) according to one of the preceding claims, wherein the control unit (4) is configured to control a field strength of an electric field between the ion emitters (222) and the respective associated extractor electrode (24) to a determined extractor electrode voltage corresponding to a predetermined level of an ion current, wherein the determined extractor electrode voltage is determined for a determined field emission propulsion unit

- (23), by measuring a current-voltage characteristic of the respective field emission propulsion unit (23) by measuring an emitter current through the ion emitter (222), with other field emission propulsion units (23) simultaneously being deactivated or operated at constant current at different voltages, and wherein the extractor electrode voltage is set in such a way that an emitter current of the particular field emission propulsion unit (23) sets itself to correspond to the predetermined level of the ion current.
4. Field emission propulsion system (1) according to one of the preceding claims, wherein at least one of the extractor electrodes (24) is formed with two, three, four or more than four extractor electrode segments (243) electrically insulated from each other, which together form a particularly annular shaped extractor electrode (24), wherein the extractor electrode voltage source (43) is formed in order to provide the extractor electrode segments (243) with individual segment voltages such that, in use, a predetermined direction of the ion beam is controlled, and/or wherein separate segment voltage sources are provided for a plurality of the extractor electrode segments (243) in order to provide the extractor electrode segments (243) with individual segment voltages such that, in use, a predetermined direction of the ion beam is adjusted.
  5. Field emission propulsion system (1) according to claim 4, wherein an adjustable series resistor or an adjustable voltage divider is assigned to each part of the extractor electrode segments (243) or to each of the extractor electrode segments (243) in order to generate the individual segment voltages from the extractor electrode voltage assigned to the respective extractor electrode (24) or another predetermined voltage.
  6. Field emission propulsion system (1) according to one of the preceding claims, wherein a neutralizer (3) is provided to output an electron current of controllable magnitude.
  7. Field emission propulsion system (1) according to one of the preceding claims, wherein the propulsion assembly (2) comprises an ion source having a fuel tank (221) for a liquid or liquefiable electrically conductive fuel (223), wherein the fuel (223) can be ejected for field ionization at the tip of the ion emitter (222) facing the respective extractor electrode (24).
  8. Field emission propulsion system (1) according to one of the preceding claims, wherein the extractor electrodes (24) are in particular of annular shape with a central opening which are arranged concentrically to an extension direction of the ion emitters (222).
  9. Field emission propulsion system (1) according to one of the preceding claims, wherein the extractor electrodes (24) are supported by an extraction plate (25) and are electrically insulated from one another, wherein the extraction plate (25) is formed in particular from non-conductive material.
  10. Field emission propulsion system (1) according to one of the preceding claims, wherein the extractor electrode voltage sources (43) each comprise an adjustable voltage divider to provide an adjustable extractor electrode voltage.
  11. Field emission propulsion system (1) according to one of the preceding claims, wherein one, at least one or each of the extractor electrodes (24) comprises, along a full or partial circumference, an electrically conductive first shielding structure (242) projecting in the direction of the ion emitters (222), and/or wherein one, at least one or each of the extractor electrodes (24) comprises, along a full or partial circumference, an electrically conductive second shielding structure (245) projecting in the direction facing away from the ion emitters (222).
  12. Method for calibrating the field emission propulsion system (1) according to one of the preceding claims, wherein a field strength of an electric field between the ion emitters (222) and the respectively associated extractor electrode (24) is adjustable for each of the plurality of field emission propulsion units (23) to an extractor electrode voltage corresponding to a predetermined ion current to be adjusted, wherein the extractor electrode voltage result from a current-voltage characteristic and the predetermined ion current to be adjusted of a respective one of the plurality of field emission propulsion units (23), comprising the following steps:
    - for each of the field emission propulsion units (23), measuring a current-voltage characteristic by measuring an emitter current through the ion emitter (222) of the field emission propulsion unit (23), with remaining field emission propulsion units (23) simultaneously deactivated or operated with constant current at different extractor electrode voltages;
    - controlling the extractor electrode voltages for each of the field emission propulsion units (23) depending respectively on the current-voltage characteristic and the predetermined ion current so as to produce an emitter current of the respective field emission propulsion units (23) corresponding to the predetermined ion current to be adjusted.
  13. Method of operating a field emission propulsion system (1) according to any one of claims 1 to 11, where-

in a field strength of an electric field between the ion emitters (222) and the respective associated extractor electrode (24) is adjustable for each of the plurality of field emission propulsion units (23) to an extractor electrode voltage corresponding to a predetermined ion current to be adjusted resulting from a current-voltage characteristic and the predetermined ion current to be adjusted of a respective one of the plurality of field emission propulsion units (23), wherein a predetermined thrust vector of the field emission propulsion system (1) is adjusted by driving each of the field emission propulsion units (23) with an individual extractor electrode voltage such that the predetermined thrust vector results as the sum of the ion currents from the field emission propulsion units (23).

### Revendications

1. Un système de propulsion à émission par effet de champ (1) pour les engins spatiaux comprenant :
  - une unité de commande (4) ;
  - un ensemble propulseur (2) comportant une pluralité d'unités de propulsion à émission par effet de champ (23) comprenant une source d'ions comportant une pluralité d'émetteurs d'ions (222) et des électrodes d'extraction (24) associées aux émetteurs d'ions (222) disposés dans un réseau de champ ;
  - une pluralité de sources de tension d'électrode d'extraction (43) associées auxdites électrodes d'extraction (24), respectivement, pour commander lesdites électrodes d'extraction (24) avec une tension d'électrode d'extraction individuelle sous le contrôle de ladite unité de commande (4).
2. Système de propulsion à émission par effet de champ (1) selon la revendication 1, comprenant une unité de mesure de courant (44) adaptée pour mesurer un courant électrique sortant des émetteurs d'ions (222) et/ou entrant dans les électrodes d'extraction (24).
3. Système de propulsion à émission par effet de champ (1) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'unité de commande (4) est adaptée pour ajuster une intensité de champ d'un champ électrique entre les émetteurs d'ions (222) et l'électrode d'extraction associée respective (24) à une tension d'électrode d'extraction spécifique correspondant à un niveau prédéterminé d'un courant ionique, dans lequel la tension d'électrode d'extraction spécifique est déterminée pour une unité de propulsion à émission de champ spécifique (23), en mesurant une caractéristique courant-tension de l'unité de propulsion à émission de champ particulière (23) en mesurant un courant d'émetteur à travers l'émetteur d'ions (222), les autres unités de propulsion à émission par effet de champ (23) étant simultanément désactivées ou fonctionnant à un courant constant à des tensions différentes, et en ajustant la tension de l'électrode d'extraction pour régler un courant d'émetteur de l'unité de propulsion à émission de champ particulière (23) correspondant au niveau prédéterminé du courant ionique.
4. Système de propulsion à émission par effet de champ (1) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel au moins l'une des électrodes d'extraction (24) est formée de deux, trois, quatre ou plus de quatre segments d'électrode d'extraction (243) isolés électriquement les uns des autres, qui forment ensemble une électrode d'extraction (24) particulièrement annulaire, la source de tension de l'électrode d'extraction (43) étant formée, pour fournir aux segments d'électrode d'extraction (243) des tensions de segment individuelles de telle sorte que, en fonctionnement, une direction prédéterminée du faisceau d'ions est réglée, et/ou dans lequel des sources de tension de segment séparées sont prévues pour une pluralité de segments d'électrode d'extraction (243) pour fournir aux segments d'électrode d'extraction (243) des tensions de segment individuelles de telle sorte que, en fonctionnement, une direction prédéterminée du faisceau d'ions est réglée.
5. Système de propulsion à émission par effet de champ (1) selon la revendication 4, dans lequel une résistance série réglable ou un diviseur de tension réglable sont respectivement associés à une partie des segments d'électrode d'extraction (243), pour générer les tensions de segment individuelles à partir de la tension d'électrode d'extraction associée à l'électrode d'extraction (24) concernée ou à partir d'une autre tension prédéterminée.
6. Système de propulsion à émission par effet de champ (1) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel un neutralisateur (3) est prévu pour délivrer un courant d'électrons d'intensité contrôlable.
7. Système de propulsion à émission par effet de champ (1) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'ensemble de propulsion (2) comprend une source d'ions avec un réservoir de propulseur (221) pour un propulseur liquide ou liquéfiable électriquement conducteur (223), dans lequel le propulseur (223) peut être éjecté pour l'ionisation de champ à la pointe des émetteurs d'ions (222) faisant face à l'électrode d'extraction respective (24).
8. Système de propulsion à émission par effet de

- champ (1) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel les électrodes d'extraction (24) sont formées en particulier de manière annulaire avec une ouverture centrale, qui sont disposées de manière concentrique à une direction d'extension des émetteurs d'ions (222). 5
9. Système de propulsion à émission par effet de champ (1) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel les électrodes d'extraction (24) sont maintenues par une plaque d'extraction (25) et sont isolées électriquement les unes des autres, la plaque d'extraction (25) étant en particulier formée d'un matériau non conducteur. 10
10. Système de propulsion à émission par effet de champ (1) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel les sources de tension d'électrode d'extraction (43) comprennent chacune un diviseur de tension réglable pour fournir une tension d'électrode d'extraction réglable. 20
11. Système de propulsion à émission par effet de champ (1) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel une, au moins une ou chacune des électrodes d'extraction (24) comprend, entièrement ou partiellement sur sa circonférence, une première structure de blindage électriquement conductrice (242) faisant saillie vers les émetteurs d'ions (222), et/ou dans lequel une, au moins une ou chacune des électrodes d'extraction (24) comprend, entièrement ou partiellement sur sa circonférence, une seconde structure de blindage électriquement conductrice (245) faisant saillie vers la direction s'éloignant des émetteurs d'ions (222). 25  
30  
35
12. Un procédé d'étalonnage du système de propulsion à émission par effet de champ (1) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel une intensité de champ d'un champ électrique entre les émetteurs d'ions (222) et l'électrode d'extraction associée respective (24) est réglable pour chacune de la pluralité d'unités de propulsion à émission de champ (23) à une tension d'électrode d'extraction correspondant à un courant ionique prédéterminé à régler, qui résulte d'une caractéristique courant-tension et du courant ionique prédéterminé à régler d'une unité respective de la pluralité d'unités de propulsion à émission de champ (23), comprenant les étapes comprenant à : 40  
45  
50
- pour chacune des unités de propulsion à émission de champ (23), mesurer une caractéristique courant-tension en mesurant un courant d'émetteur à travers l'émetteur d'ions (222) de l'unité de propulsion à émission de champ respective (23) tandis que les autres unités de propulsion à émission de champ (23) sont simultanément désactivées ou fonctionnent à un courant constant, à différentes tensions d'électrode d'extraction ;
  - ajuster les tensions des électrodes d'extraction pour chacune des unités de propulsion à émission de champ (23) en fonction de la caractéristique courant-tension et du courant ionique prédéterminé, respectivement, de sorte qu'un courant émetteur des unités de propulsion à émission de champ respectives (23) soit ajusté qui correspond au courant ionique prédéterminé à ajuster.
13. Procédé d'opérer d'un système de propulsion à émission de champ (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, dans lequel une intensité de champ d'un champ électrique entre les émetteurs d'ions (222) et l'électrode d'extraction (24) respectivement associée pour chacune de la pluralité d'unités de propulsion à émission de champ (23) est réglable à une tension d'électrode d'extraction correspondant à un courant ionique prédéterminé à régler, résultant d'une caractéristique courant-tension et du courant ionique prédéterminé à régler de l'une respective de la pluralité d'unités de propulsion à émission de champ (23), dans lequel un vecteur de poussée prédéterminé dudit système de propulsion à émission de champ (1) est contrôlé en commandant chacune desdites unités de propulsion à émission de champ (23) avec une tension d'électrode d'extracteur individuelle de sorte que ledit vecteur de poussée prédéterminé résulte comme une somme de courants ioniques provenant desdites unités de propulsion à émission de champ (23).

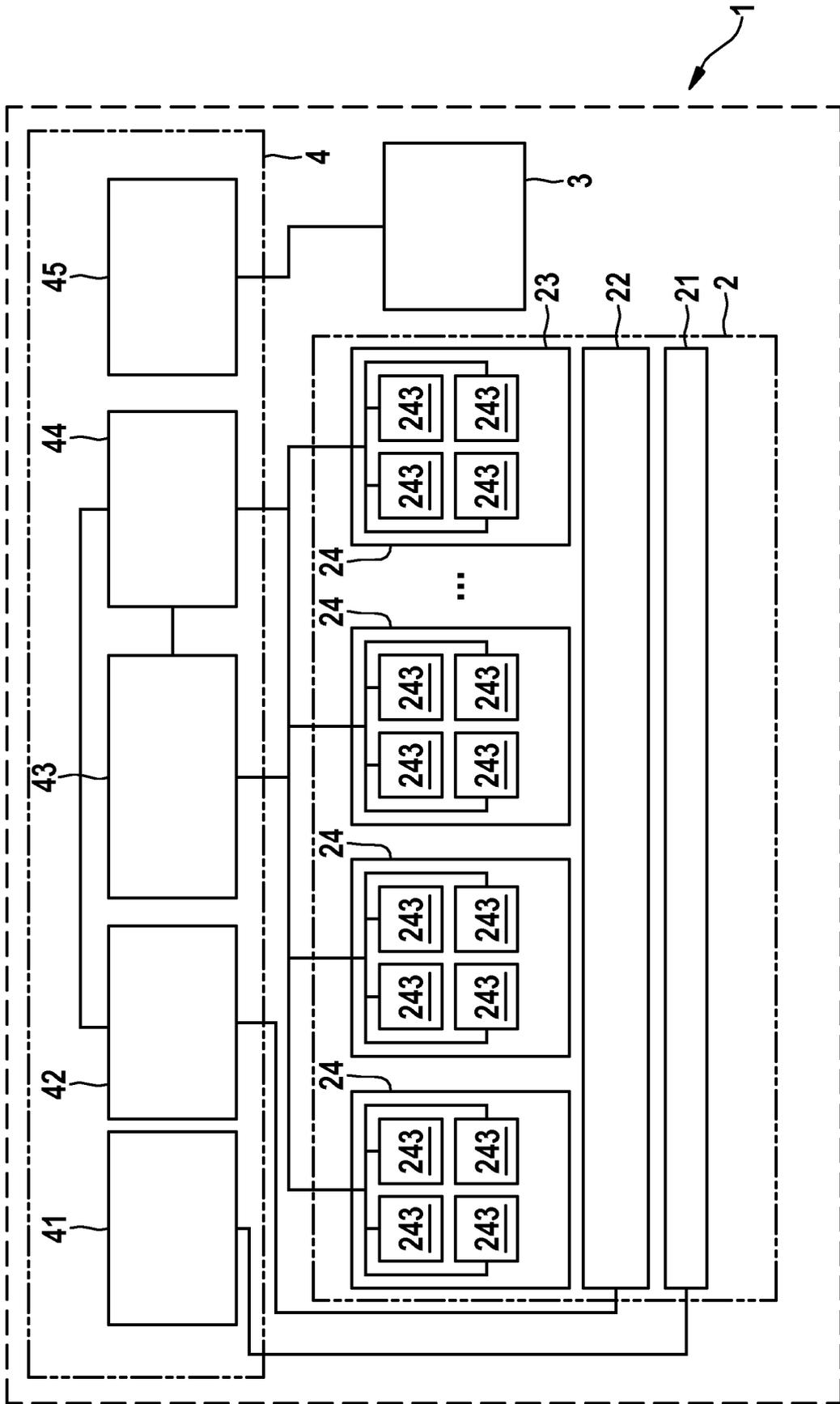


Fig. 1

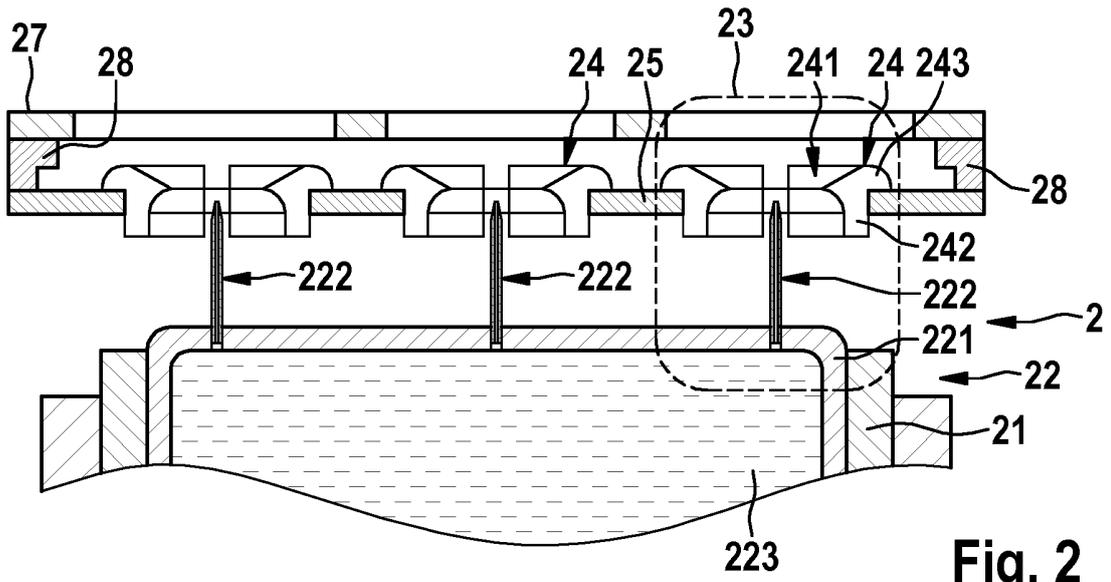


Fig. 2

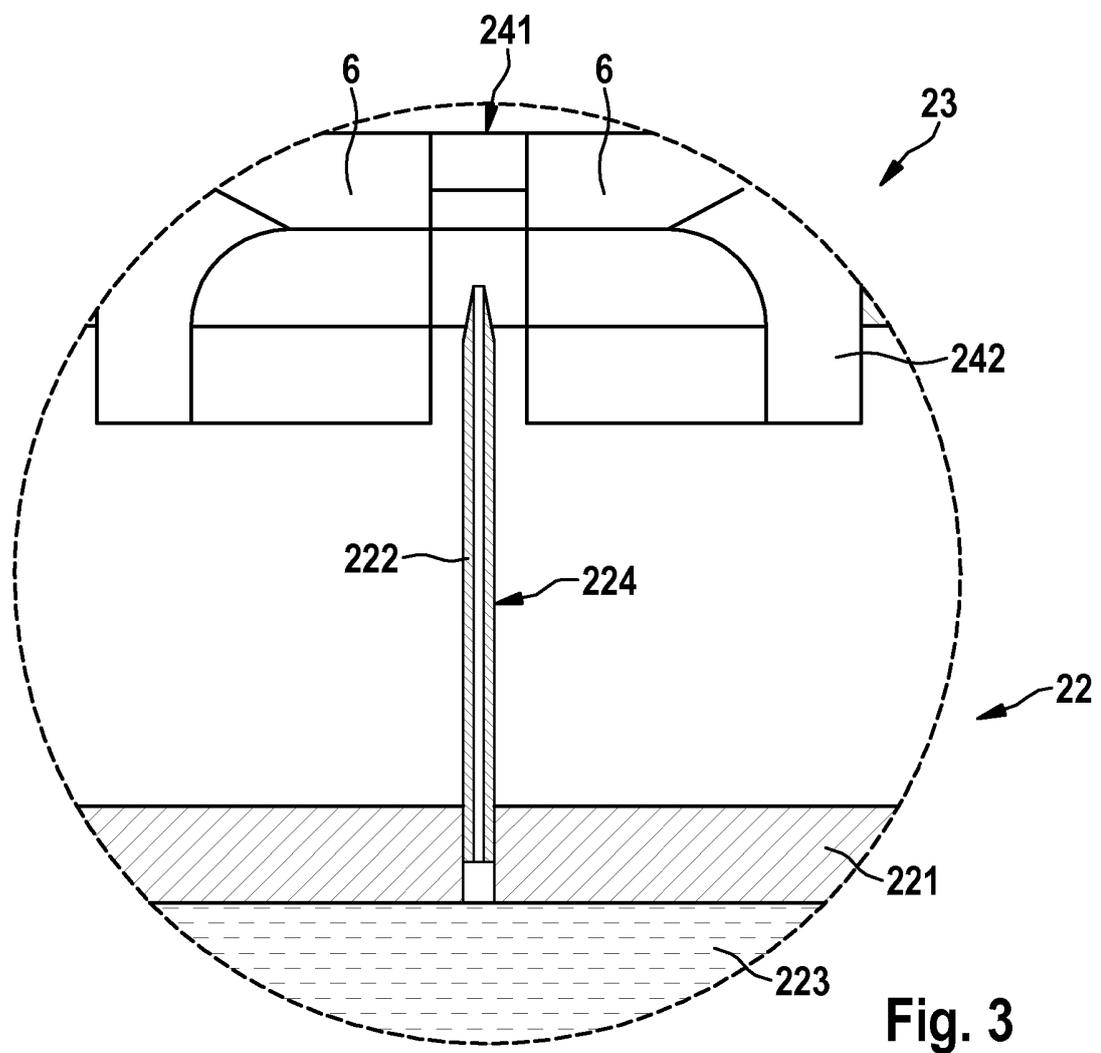
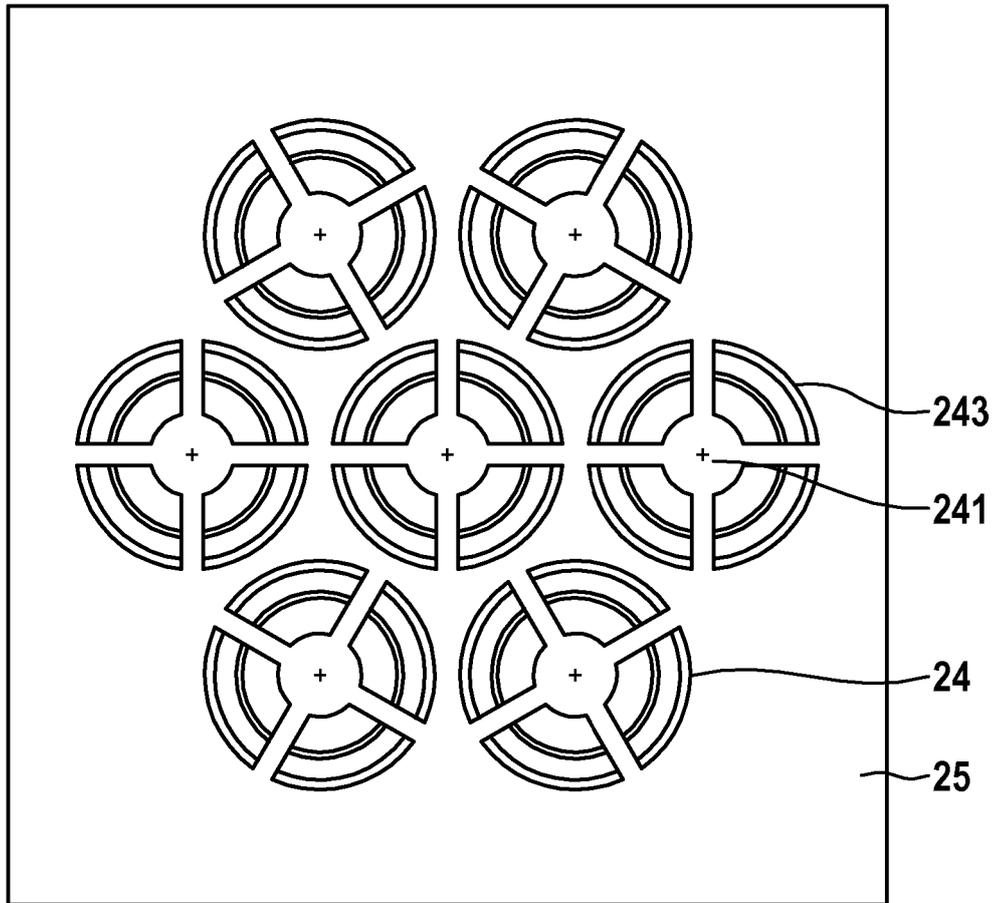


Fig. 3



**Fig. 4**

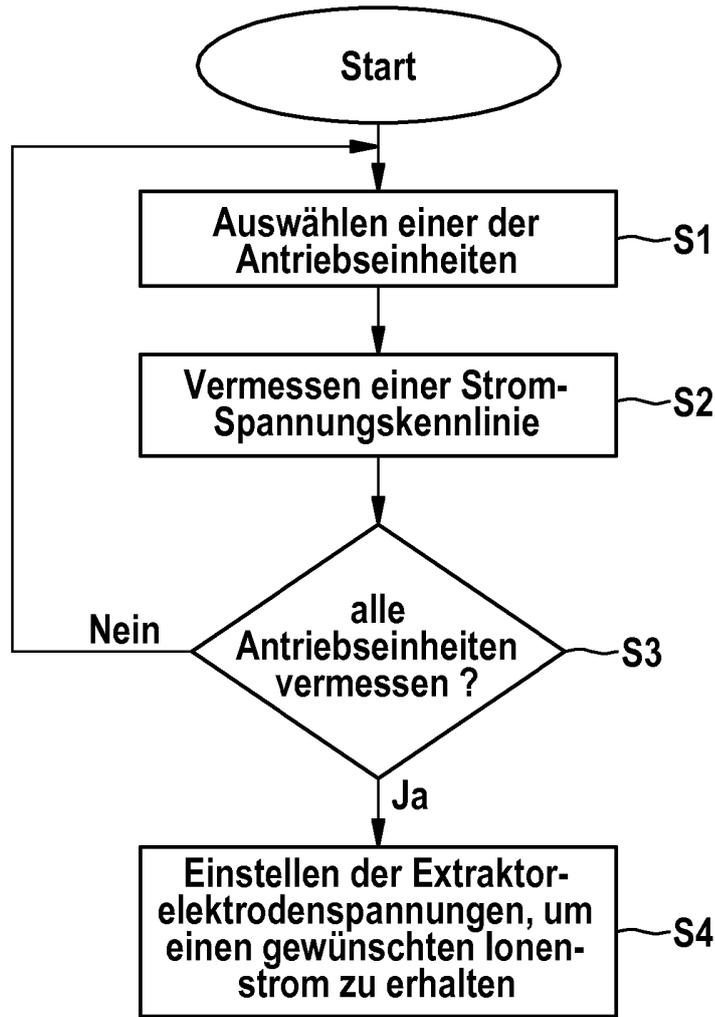


Fig. 5

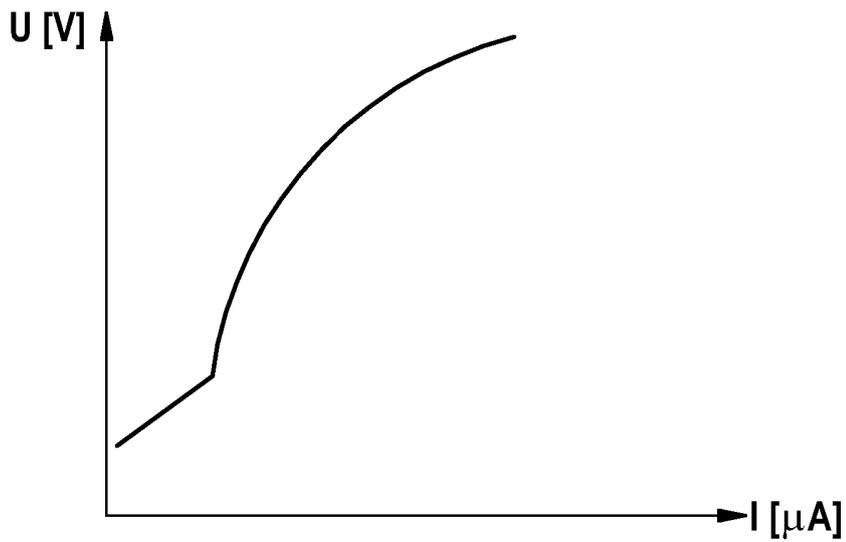


Fig. 6

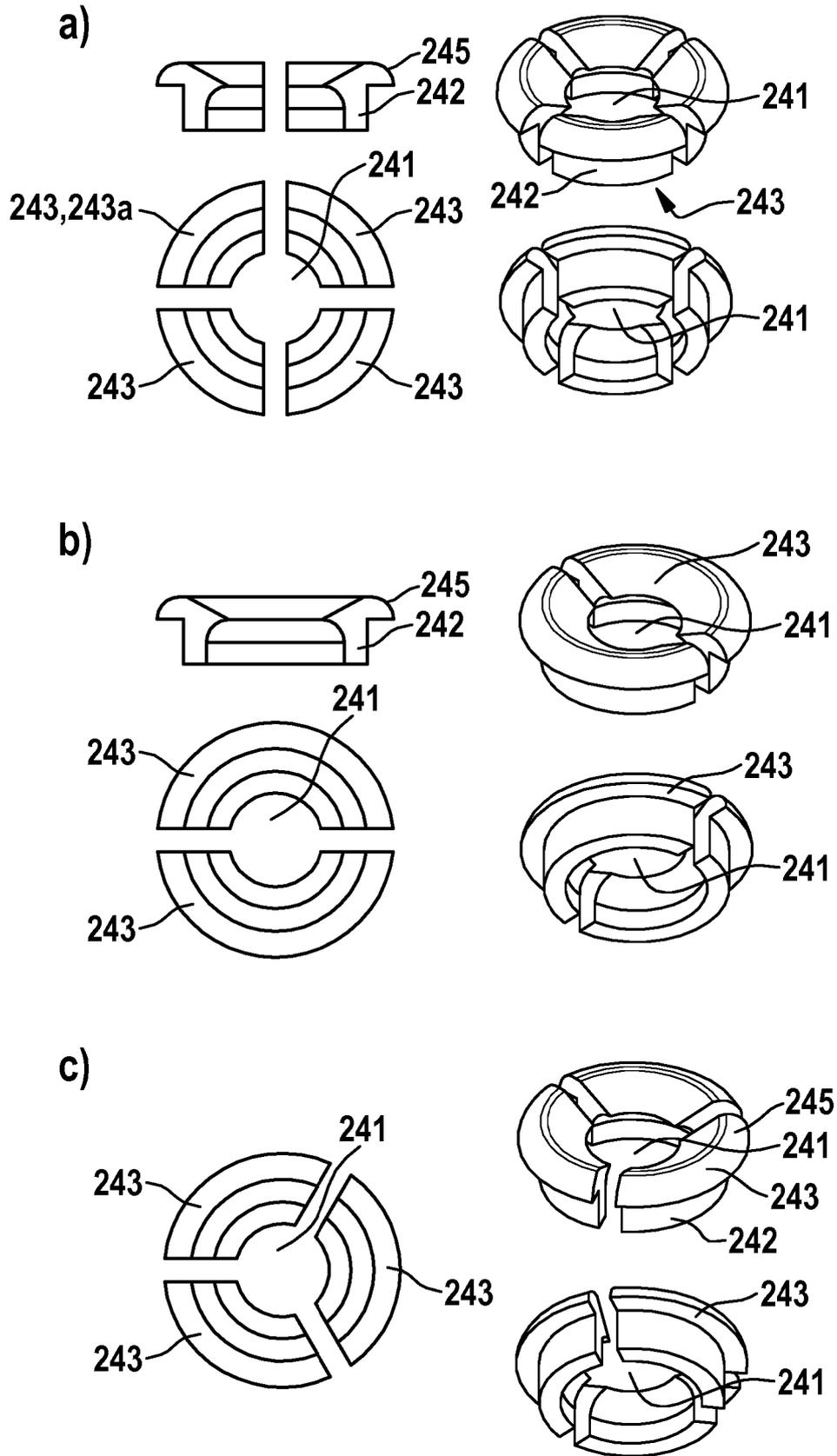


Fig. 7

## 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 Nicht-Patentliteratur

- IFM Nano Truster. *AMR Propulsions Innovations*, 26. Juli 2017, <http://www.propulsion.at> [0003]
- **BOCK, D. ; TAJMAR, M.** Highly Miniaturized FEEP Propulsion System (NanoFEEP) for Attitude and Orbit Control of CubeSats. *Proceedings of the 67th International Astronautical Congress (IAC)*, 26. September 2016 [0005]
- Development of an Indium mN-FEEP Thruster. **IVANHOE VASILJEVECH et al.** 44TH AIAA/ASME/SAE/ASEE JOINT PROPULSION CONFERENCE AND EXHIBIT. AMERICAN INSTITUTE OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS, 01. Januar 2008, vol. 44, 1-9 [0006]