(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) **EP 3 587 615 A1**

(12) EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:
01.01.2020 Patentblatt 2020/01

(21) Anmeldenummer: **18000567.0**

(22) Anmeldetag: **29.06.2018**

(51) Int Cl.:
C23C 4/137 *(2016.01)* ***C23C 24/08*** *(2006.01)*
C23C 24/04 *(2006.01)* ***C23C 4/01*** *(2016.01)*

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

(71) Anmelder: **Airbus Defence and Space GmbH**
82024 Taufkirchen (DE)

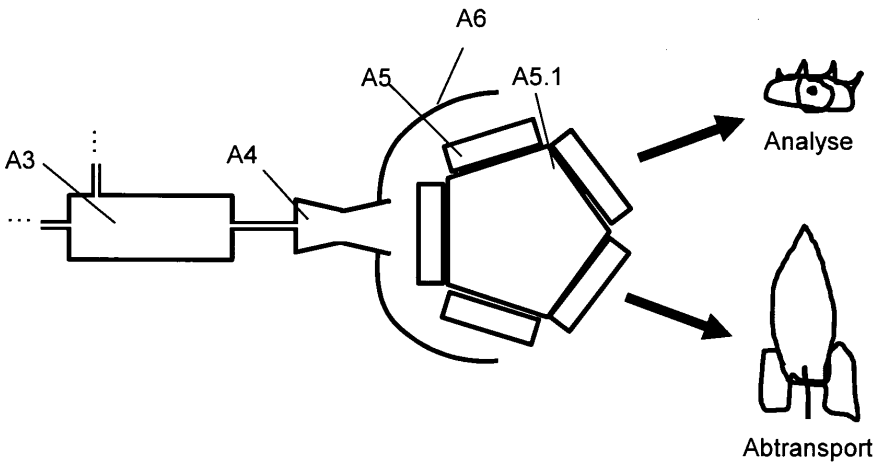
(72) Erfinder:
- **Häming, Marc**
  88048 Friedrichshafen (DE)
- **Moos, Ralf**
  95447 Bayreuth (DE)
- **Kita, Jaroslaw**
  95482 Gefrees (DE)
- **Nieke, Philipp**
  95447 Bayreuth (DE)

(74) Vertreter: **Meel, Thomas**
Airbus Defence and Space GmbH
Patentabteilung
88039 Friedrichshafen (DE)

(54) VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR HERSTELLUNG VON SCHICHTEN ODER KÖRPERN IM WELTRAUM

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung von Schichten oder Korpern an einem Ort, der gegenüber den Verhältnissen auf der Erde einen geringeren natürlichen Umgebungsdruck aufweist, wobei aus einem Trägergas und einem Pulver ein Pulver-Aerosol erzeugt wird, welches unter dem Einfluss einer Druckdifferenz auf ein Substrat (A5) gelenkt wird und dort schichtweise abgelagert wird, wobei am Ort der Ablagerung der Umgebungsdruck des Ortes herrscht. Eine Vorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist ebenfalls Gegenstand der Patentanmeldung.

Fig. 13



EP 3 587 615 A1

Beschreibung

Technisches Gebiet

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren sowie eine Vorrichtung zur Herstellung von Schichten oder Körpern im Weltraum, insbesondere auf dem Erdmond, einem anderen nicht-irdischen Himmelskörper (Planeten, Meteoriten) oder einem künstlichen Satelliten (z.B. einer Raumstation in einem Orbit im Weltraum).

Technischer Hintergrund

[0002] Gewöhnlich ist für die Herstellung von keramischen Schichten oder Körpern eine Sintertemperatur oberhalb von 1000 °C notwendig. In Folge dessen ist eine Integration bzw. Kombination von Keramiken mit niedrigschmelzenden Kunststoffen, Gläsern oder Metallen kaum oder gar nicht möglich [1]. Eine weitere Schwierigkeit stellen zudem Keramiken mit einem hohen kovalenten Bindungsanteil dar. Hierbei kann eine Zersetzung der Keramik vor einer Verdichtung auftreten, wodurch eine Herstellung dichter Bauteile bzw. Schichten nicht oder nur unter erheblichem Aufwand möglich ist [2].

[0003] Unter Bedingungen im Weltraum (insbesondere auf dem Erdmond, einem anderen nicht-irdischen Himmelskörper, z.B. Planeten, Meteoriten oder einem künstlichen Satelliten, z.B. einer Raumstation in einem Orbit im Weltraum) ergeben sich nicht nur zusätzliche umgebungsbedingte Probleme sondern man wird auch naturgemäß auf solche Ausgangsmaterialien angewiesen sein, die man vor Ort vorfindet. Es werden also Verfahren benötigt, die möglichst mit derartigen Materialien kompatibel sind, so dass aufwändige Prozesse zur Vorbehandlung oder Umwandlung der vorgefundenen Materialien entbehrlich sind.

[0004] Darüber hinaus sind solche Verfahren anzustreben, die hinsichtlich Masse der zur Durchführung benötigten Apparaturen sowie hinsichtlich des Energieverbrauchs optimiert sind.

[0005] Ausschließlich für terrestrische Anwendungen bekannt ist das Verfahren einer aerosol- und vakuumbasierten Schichtdeposition [3]. Das Verfahren wird in jüngster Zeit im Deutschen auch als "aerosolbasierte Kaltabscheidung" oder "Aerosol-Depositions-Methode", kurz "ADM" bezeichnet. Hierbei können bei Raumtemperatur dichte Schichten direkt aus den Ausgangspulvern auf verschiedenste Substratmaterialien abgeschieden werden. Diese zeichnen sich sowohl durch eine feste Anhaftung auf dem Substrat, hohe Dichtheit als auch durch im Vergleich zu den eingesetzten Ausgangspulvern ähnlichen Materialeigenschaften aus.

[0006] Die Grundlage des Verfahrens besteht darin, dass in einer entsprechenden Vorrichtung (siehe Fig. 1) Partikel 5 beschleunigt und auf ein zu beschichtendes Substrat 6 gelenkt werden. Die hohe kinetische Energie der Partikel 5 führt beim Aufprall auf das Substrat 6 mutmaßlich [1] sowohl zu einem lokalen Druck- und Temperaturanstieg als auch zu einer plastischen Deformation und zum Aufbrechen der Partikel. Dies sorgt wiederum für eine entsprechende Haftung sowohl zwischen den Partikeln als auch zwischen Partikeln und Substrat. Der Vorgang der Schichtabscheidung beginnt nach derzeitigem Wissensstand [1] mit einer Ausbildung einer Verankerungsschicht auf dem Substrat 6 und setzt sich mit einem kontinuierlichen Aufbau und der Verdichtung der Schicht fort. In der englischsprachigen Literatur wird der Vorgang dieser Schichtbildung auch häufig mit dem Begriff "Room Temperature Impact Consolidation" (RTIC) bezeichnet [1].

Stand der Technik bezüglich des Aufbaus einer Vorrichtung zur aerosolbasierten Kaltabscheidung von Pulvern unter Normalbedingungen (terrestrische Anwendungen)

[0007] Die Hauptkomponenten einer Vorrichtung zur aerosolbasierten Kaltabscheidung von Pulvern nach dem Stand der Technik sind, wie in Fig. 1 dargestellt, eine Vakuumkammer 1, eine Evakuierungsvorrichtung 2, eine aerosolerzeugende Vorrichtung 3 und eine Düsenapparatur 4. Veröffentlichungen bezüglich des Anlagenaufbaus finden sich z.B. in der US 7,553,376 B2. Das Prinzip einer Anlage zur aerosolbasierten Kaltabscheidung von Pulvern basiert darauf, dass über eine Evakuierungsvorrichtung 2 innerhalb der Vakuumkammer 1 ein Vakuum erzeugt wird [5]. Die aerosolerzeugende Vorrichtung 3 vermischt ein Gas, z.B. Sauerstoff oder Stickstoff, mit Partikeln 5 und erzeugt so ein Pulver-Aerosol [4]. Als Folge des auftretenden Druckabfalls zwischen aerosolerzeugender Vorrichtung 3 und Vakuumkammer 1 werden die Partikeln von der aerosolerzeugenden Vorrichtung 3 über eine Verbindungsleitung 4.1 in die Vakuumkammer 1 transportiert. Die Verbindungsleitung 4.1 mündet in einer Düse 4.2, in der durch Querschnittsänderung die Partikel 5 weiter beschleunigt werden. In der Vakuumkammer 1 treffen die Partikel 5 auf ein bewegtes Substrat 6 und bilden dort einen dichten kratzfesten Film [1], und das obwohl keine Temperaturbehandlung notwendig ist.

Nachteile des Standes der Technik

[0008]

- Hohe Masse der Vakuumkammer 1 und der Evakuierungsvorrichtung 2
- Hoher Energiebedarf durch die Evakuierungsvorrichtung 2.

Zugrundeliegende Aufgabe

[0009] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Herstellung von Schichten oder Körpern im Weltraum (d.h. unter gegenüber den Verhältnissen auf der Erde veränderten Atmosphären- und/oder

Schwerkraft- und/oder Temperaturbedingungen, insbesondere auf dem Erdmond, einem anderen nicht-irdischen Himmelskörper, z.B. Planeten, Meteoriten, oder einem künstlichen Satelliten, z.B. einer Raumstation in einem Orbit im Weltraum) zu schaffen, das dort wirtschaftlich betrieben werden kann.

[0010] Diese Aufgabe wird mit dem Verfahren nach Anspruch 1 gelöst. Vorteilhafte Ausführungen sowie eine Vorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens sind Gegenstände von weiteren Ansprüchen.

Vorteile der Erfindung

[0011]

- Nutzbarmachung der ADM für nichtterrestrische Anwendungen unter veränderten Atmosphären-, Schwerkraft- und Temperaturbedingungen.
- Geringere Masse, da Vakuumkammer 1 und Evakuierungsvorrichtung 2 entfällt
- Geringerer Energiebedarf, da Evakuierungsvorrichtung 2 entfällt
- Ermöglicht die Integration als Nutzlast in ein Flug- oder Raumfahrzeug
- Ermöglicht die direkte Verarbeitung von vorgefundenen Ressourcen während einer Raumfahrtmission (auch als "In-Situ Ressource Utilization" bekannt) z.B. zur Herstellung von Schutz- oder Funktionsschichten in großer Dickenvariation
- Ausnutzung bereits in einem Raumfahrzeug oder einer Nutzlast vorhandener Infrastrukturen, wie zum Beispiel Aufnahmeeinrichtungen für Pulver, Gasspeicher, Gasleitungen oder Düsen.
- Erfindung ermöglicht erst die Nutzbarmachung von Mondstaub (wie z.B. Regolith) in nachgeschalteten Prozessen.
- Erfindung wandelt Mondstaub und/oder Meteroitenstaub und/oder Asteroidenstaub und/oder Staub auf anderen Planeten in definierte Beschichtungen und 3-dimensionale Strukturen um.
- Vibrationsarmer/-vibrationsfreier Betrieb.
- Gasrückgewinnung zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit oder zur Verminderung der Kontamination der Atmosphäre durch Fremdgase.
- Die auf dem Mond oder im Weltall typischerweise vorhandene Trockenheit führt zu optimierter Erzeugung des Pulver-Aerosols. Auf der Erde ist oftmals ein Pulver-Handling mittels Glove-Box mit sehr niedriger Feuchte nötig; jegliches Arbeiten unter normaler Feuchte lässt das Pulver Wasser adsorbieren, was das Abscheideergebnis verschlechtert.
- Erzeugung des Pulver-Aerosols unter Bedingungen geringer Gravität gestaltet sich einfacher und effizienter als bei Normalbedingungen auf der Erde.
- Die am besten geeigneten Gase besitzen eine hohe Schallgeschwindigkeit. Auf dem Mond oder im Weltall (allgemein im Vakuum) bietet sich Wasserstoff als Trägergas an. Bezüglich der Verwendung von Wasserstoff bestehen aufgrund des nicht vorhandenen Sauerstoffs keine Sicherheitsbedenken. Dadurch wird ohne zusätzlichen Aufwand der Einsatz von Wasserstoff als Trägergas mit größter Schallgeschwindigkeit möglich.
- Das erfindungsgemäße Verfahren kann insbesondere für die Herstellung von keramischen oder metallischen Schichten oder Körpern eingesetzt werden.

[0012] Die Erfindung wird anhand von konkreten Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf Figuren näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 eine Prinzipskizze zur terrestrischen Durchführung eines Verfahrens zur aerosolbasierten Kaltabscheidung gemäß Stand der Technik, wie in der Beschreibungseinleitung erläutert;
Fig. 2 eine erste Ausführung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Herstellung von Schichten oder Körpern im Weltall;
Fig. 3 eine weitere Ausführung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung, mit einer semipermeablen Substratabschirmung, die das Substrat vollständig umschließt;
Fig. 4 eine weitere Ausführung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung, mit einer impermeablen Substratabschirmung und Trägergasrückführung;
Fig. 5 eine weitere Ausführung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung, mit einer impermeablen Substratabschirmung, ausgebildet als Faltenbalg;
Fig. 6 eine weitere Ausführung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung mit vorteilhafter Aerosolerzeugung;
Fig. 7 eine weitere Ausführung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung, bei der das Substrat unmittelbar hinter dem Auslassquerschnitt der Aerosol-erzeugenden Vorrichtung angeordnet ist;
Fig. 8 eine weitere Ausführung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung, bei der die Aerosol-erzeugende Vorrichtung mit einer semipermeablen Trennwand zur verbesserten Gasverwirbelung versehen ist;
Fig. 9 eine weitere Ausführung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung, mit einem rotierenden Element, das den Transport des Pulvers aus dem Pulverreservoir in die Aerosol-erzeugende Einheit fördert;
Fig. 10 eine weitere Ausführung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung mit mehreren Pulverreservoiren;
Fig. 11 eine weitere Ausführung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung mit mehreren Düsen und mehreren Aerosol-erzeugenden Einheiten;
Fig. 12 eine weitere Ausführung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung mit einer vor dem Substrat angeordneten Beschichtungsmaske;
Fig. 13 eine weitere Ausführung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung mit einem Substratwechsler.

[0013] Fig. 2 zeigt eine erste Ausführung der erfin-

dungsgemäßen Vorrichtung. Sie umfasst insbesondere die folgenden Bestandteile:

- Trägergasreservoir A1 für die Aufnahme des Trägergases für die Aerosolerzeugung;
- Gasdruck- und Gasflussregler A2 zur Steuerung des Gasdrucks und Gasflusses;
- Aerosol-erzeugende Einheit A3 zur Erzeugung des Aerosols aus dem Trägergas und einem Pulver;
- Düsenapparatur A4 zur Beschleunigung des erzeugen Aerosols;
- fest installierter oder verfahrbarer Substrathalter mit Substrat A5;
- Substratabschirmung A6, zur Abschirmung des Substrats von den übrigen Elementen der Vorrichtung im Sinne eines mechanischen Schutzes. Diese umschließt in dieser Ausführung das Substrat nicht vollständig, sondern nur teilweise, nämlich in Richtung auf die übrigen Elemente der erfindungsgemäßen Vorrichtung. Das Substrat A5 befindet sich somit frei in der die Vorrichtung umgebenden Atmosphäre;
- Pulverreservoir A7, in der das Pulver für die Aerosolerzeugung gespeichert wird;
- Thermische Steuereinheit A8;
- Kommando- und Datenverarbeitungssystem A9;
- Elektrischer Energiespeicher A10 zur Strom- und Spannungsversorgung der Vorrichtung;
- Rahmenstruktur mit thermischem Abschirm- und Isolationsmaterial A11.

[0014] Das Trägergasreservoir A1 ist bevorzugt ein geschlossenes Behältnis und speichert ein beliebiges Gas oder Gasgemisch im Druckbereich von 0,5 bis 300 bar. Als ein solches Trägergas für das zu erzeugende Aerosol wird bevorzugt Wasserstoff, Helium, Stickstoff oder Sauerstoff eingesetzt. Das Trägergasreservoir A1 beinhaltet vorteilhaft mindestens einen Drucksensor und mindestens ein steuerbares Auslassventil (Aktuator). Die Hochdruck-Gasleitung A1.1 verbindet das Gasauslassventil mit dem Gasdruck- und Gasflussregler A2. Letzterer A2 weist mindestens einen Gaseinlass und einen Gasauslass auf. Optional kann der Gasdruck- und Gasflussregler A2 mehrere Gasauslässe, die mit verschiedenen Untereinheiten der erfindungsgemäßen Beschichtungsvorrichtung verbunden sind, aufweisen. Ein konkretes Ausführungsbeispiel hierzu wird anhand der Fig. 6 und 7 erläutert.

[0015] Gasdruck- und Gasflussregler A2 umfasst vorteilhaft für jeden Gasauslass einen Drucksensor oder einen Flusssensor und ein feinjustierbares Auslassventil (Aktuator), das einen spezifischen Gasdruck bzw. Gasfluss im Bereich 0,001 bis 100 bar bzw. 0,01 bis 1000 Nl / min (Normliter pro Minute) erzeugt. Der Gasdruck- und Gasflussregler A2 ist über mindestens eine Gasniederdruckleitung A2.1 mit der Aerosolerzeugenden Einheit A3 verbunden. Die Aerosol-erzeugende Vorrichtung A3 vermischt das Trägergas mit Pulver aus dem Pulverreservoir A7 und erzeugt so ein Pulveraerosol.

[0016] Das Pulverreservoir A7 umfasst vorteilhaft eine gasdichte Schleuse A7.3 zur Beladung mit Pulver von außerhalb der Vorrichtung sowie einen Pulverfüllstandssensor. Die Pulverzuleitung A7.1 leitet Pulver vom Pulverreservoir A7 zu der Aerosolerzeugenden Einheit A3. Die Niederdruckaerosolleitung A3.1 leitet das erzeugte Aerosol von der Aerosol-erzeugenden Einheit A3 in die Düse A4. In der Düse A4 wird das Aerosol durch Querschnittsänderung beschleunigt und auf das Substrat A5 geleitet. Es bildet dort eine kratzfeste funktionale Schicht. Optional umfasst die erfindungsgemäße Vorrichtung mehrere Einzeldüsen (siehe Fig. 11) mit steuerbarer Querschnittsänderung. Optional kann die Düsenform konvergent, divergent oder konvergent-divergent ausgeführt sein.

[0017] Das Substrat A5 steht in direkter Verbindung zur Umgebung der erfindungsgemäßen Vorrichtung, in der ein reduzierter Druck herrscht, typischerweise Vakuum (unter Vakuum soll hier ein Druck $p < 0{,}1$ bar verstanden werden). Die Lage des Substrats A5 kann mittels eines XYZ-Verfahrmechanismus in drei Dimensionen geregelt werden. Die Substratabschirmung A6 trennt die probennahe Umgebung von den übrigen Elementen der erfindungsgemäßen Vorrichtung. Die Düse ist unmittelbar an die Substratabschirmung A6 angeschlossen. Alternativ kann die Substratabschirmung A6 auch eine Durchführung oder Öffnung umfassen, durch die die Düse A4 durchgesteckt wird.

[0018] Die thermische Steuereinheit A8 umfasst eine elektronische Regel- und Steuereinheit und einen elektronischen Datenspeicher. Die thermische Steuereinheit A8 ist mit einem Temperatursensoren- und Heizelementenetz A8.1 verbunden, das pro Untereinheit A1 - A5 jeweils mindestens einen Temperatursensor und ein Heizelement inklusive elektrischer Zuleitungen umfasst. Der elektronische Datenspeicher speichert Temperaturwerte und Regelparameter, die über eine direkte Datenverbindung zum Kommando- und Datenverarbeitungssystem A9 gespeichert und ausgelesen werden. Die Kommando- und Datenverarbeitungssystem A9 beinhaltet eine elektronische Regel- und Steuereinheit sowie einen elektronischen Datenspeicher, in den über eine externe Datenschnittstelle A9.2 Kontroll- und Regelparameter eingespeichert und ausgelesen werden. Über das Datennetz A9.1 werden die Signale aller Sensoren der Untereinheiten A1, A2, A3, A4, A5, A7, A8, A10 an A9 übertragen und alle Stellparameter von A9 an Aktuatoren der Untereinheiten A1, A2, A3, A4, A5, A7, A8, A10 übertragen. Der elektrische Energiespeicher A10 versorgt die Baugruppen A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A10 über das elektrische Versorgungsnetz A10.1 mit einer elektrischen Gleichspannung. Der elektrische Energiespeicher A10 wir durch die externe Schnittstelle A10.2 geladen. Die Rahmenstruktur A11 bildet einen verwindungssteifen Bauraum, in dem alle Baugruppen A1 - A10 sowie thermisches Abschirm- und Isolationsmaterial integriert und befestigt sind.

Vorteile:

[0019] Da die Beschichtung unter Umgebungsbedingungen (also reduziertem Druck, insbesondere Vakuumbedingungen) stattfindet, fällt kein Aufwand für die Evakuierung des Substrats an. Das Substrat kann, wie in Fig. 2 gezeigt, frei in der Umgebung platziert werden.
Der gezeigte Aufbau ermöglicht außerdem die Integration als Nutzlast in ein Flug- oder Raumfahrzeug. Die Schleuse A7.3 im Pulverbehältnis A7 ermöglicht eine Beladung in nicht-terrestrischer Umgebung. Dies ermöglicht eine direkte Verarbeitung von vorgefundenen Ressourcen während einer Raumfahrtmission z.B. zur Herstellung von Schutz- oder Funktionsschichten und eine verbesserte Schichtbildung. Zusätzlich ermöglicht dies die Verarbeitung von extrem trockenem Pulvern wie z.B. Mondstaub und/oder Meteroitenstaub und/oder Staub auf anderen Planeten, die bei terrestrischer Verarbeitung Feuchtigkeit aufnehmen. Dadurch wird bei der extraterrestrischen Verarbeitung dieser Pulver eine bessere Schichtbildung erzielt.
[0020] Die Fig. 3 zeigt eine weitere Ausführung der erfindungsgemäßen Beschichtungsvorrichtung. Gegenüber der in der Fig. 2 gezeigten Ausführung umfasst sie eine Substratabschirmung A6, die das Substrat vollständig umgibt. Die Substratabschirmung A6 ist abschnittsweise semipermeabel ausgebildet (strichpunktierte Linie). Semipermeabel bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Substratabschirmung für das Trägergas durchlässig, jedoch undurchlässig für das Pulver ist. Dies könnte z.B. durch eine Mikroperforation realisiert sein. Dort, wo die Substratabschirmung das Innere der Vorrichtung gegen das Innere der Substratabschirmung abgrenzt (durchgezogene Linie) ist die Substratabschirmung impermeabel ausgebildet, um das Eindringen von Gas in die Vorrichtung zu verhindern. Die Substratabschirmung A6 kann als flexible und/oder dehnbare und/oder faltbare und/oder starre Membran oder Folie ausgebildet sein, die mit der Düsenapparatur verbunden und an diese angeschlossen ist.

Vorteile:

[0021] Keine Freisetzung von Pulverpartikel in die Umgebung der erfindungsgemäßen Beschichtungsvorrichtung. Auffangen und Wiederverwendung von überschüssigen Pulver wird ermöglicht.
[0022] Bei der in Fig. 4 gezeigten Ausführung ist die Substratabschirmung A6, welche das Substrat vollständig umschließt, impermeabel ausgebildet. Sowohl Trägergas wie auch Pulverpartikel können nicht durch die Substratabschirmung hindurch dringen und werden innerhalb der Substratabschirmung gehalten. Die Substratabschirmung A6 ist als starre Trennwand ausgebildet und kann mit einer Pumpe A14 gekoppelt werden, um das Trägergas zur Gasrückgewinnung über Leitungen A6.2 und A14.1 zurück in das Trägergasreservoir A1 zu transportieren. Vorteilhafterweise kann eine semipermeable Filtervorrichtung A6.1 vorhanden sein (undurchdringlich für Pulver), so dass kein Pulver in die Pumpe A14 dringen kann.
[0023] Obwohl die impermeable Substratabschirmung keinen Austausch mit der Umgebung erlaubt, herrscht innerhalb wie außerhalb der Substratabschirmung dasselbe Druckniveau, nämlich der örtliche Umgebungsdruck (typischerweise Vakuum). Die impermeable Substratabschirmung muss also nicht als druckfestes Behältnis ausgebildet sein.
[0024] Eine weitere Variation der Substratabschirmung ist in der Fig. 5 dargestellt. Hier ist die Substratabschirmung als flexibler Faltenbalg ausgebildet ist, der mit einem Hubmechanismus zur Kontraktion der Substratabschirmung zusammenwirkt. Damit wird der Rücktransport des Trägergases über eine regulierbare Leitung A6.2 in das Trägergasreservoir ermöglicht. Auch hier kann wieder eine separate Filtervorrichtung (siehe A6.1 in Fig. 4) integriert sein, um das Pulver bei der Gasrückgewinnung innerhalb der Substratabschirmung zurückzuhalten.
[0025] Optional kann in der Substratabschirmung ein Öffnungsmechanismus integriert sein, um nach der Gasrückgewinnung das überschüssige Pulver entfernen zu können.

Vorteile:

[0026] Keine Freisetzung von Trägergas und Pulverpartikel in die Umgebung der Beschichtungsvorrichtung, beispielsweise zur Verhinderung der Kontamination der Atmosphäre mit Fremdgas. Wiederverwendung des Trägergases für die Aerosolerzeugung wird ermöglicht.
[0027] Fig. 6 zeigt eine weitere Ausführung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung mit vorteilhafter Aerosolerzeugung. In dieser Ausführung umfasst die Aerosolerzeugende Einheit A3 eine Aerosolerzeugungsdüse A3.3, die einen Gaseinlass mit Querschnittsreduzierung zum Düseninneren, einen Pulvereinlass mit Querschnittsreduzierung zum Düseninneren und einem Aerosolauslass mit Querschnittserweiterung zum Düsenausgang aufweist.
Dabei ist das Pulverreservoir A7 ist mit dem Pulvereinlass der Aerosolerzeugungsdüse A3.3 verbunden. Die Gasniederdruckleitung A2.1 ist mit dem Gaseinlass der Aerosolerzeugungsdüse A3.3 verbunden.
[0028] Die Aerosol-erzeugende Einheit A3 weist eine zweite Gaszufuhr A3.2 auf, die mit dem Aerosolauslass der Aerosolerzeugungsdüse A3.3 verbunden ist. Damit kann die Druckdifferenz zwischen dem Gaseinlass und dem Aerosolauslass der Aerosolerzeugungsdüse A3.3 sowie zwischen dem Ein- und Auslass der Düse A4 reguliert werden.
[0029] Des Weiteren weist das Pulverreservoir A7 eine separate Gaszufuhr A7.2 auf, die zur Regulierung des Pulvereintrags in die Aerosolerzeugungsdüse A3.3 dient.

Vorteile:

[0030] Verbesserte Aerosolerzeugung dadurch, dass

- durch die Querschnittsreduzierung im Inneren der Aerosolerzeugungsdüse A3.3 eine erhöhte Gasgeschwindigkeit und Aerosolverwirbelung erzeugt wird;
- die Druckdifferenz und Gasgeschwindigkeit zwischen Gaseinlass und Aerosolauslass der Aerosolerzeugungsdüse A3.3 durch die Gaszuleitung A3.2 geregelt und optimiert wird;
- die Druckdifferenz zwischen Ein- und Auslass der Düse A4 durch die Gaszuleitung A3.2 geregelt und optimiert wird;
- eine optimale Dosierung des Pulvereintrags vom Pulverreservoir A7 in den Gasstrom innerhalb der Aerosolerzeugungsdüse A3.3 durch die separate Gaszuführung A7.2 eingestellt wird.

[0031] Fig. 7 zeigt eine weitere Ausführung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung, bei der das Substrat unmittelbar hinter dem Auslassquerschnitt der Aerosol-erzeugenden Vorrichtung angeordnet ist. Im Vergleich zu der Vorrichtung nach Fig. 6 entfallen hier die die Aerosolleitung A3.1 und die Düse 4 sowie die zweite Gaszufuhr A3.2.

Vorteil:

[0032] Die Aerosol-erzeugende Einheit kann direkt zur Beschleunigung des Aerosols und somit zum Sprühen verwendet werden, ohne dass eine zusätzliche Düse nachgeschaltet werden müsste. Durch die geringere Anzahl an Komponenten kann bei dieser Ausführung eine kompaktere Bauweise bei geringerer Masse erreicht werden.

[0033] Als Alternative zu dem in der Fig. 7 gezeigten Aufbau der Aerosol-erzeugenden Einheit ist in Fig. 8 eine weitere Ausführung einer Aerosol-erzeugenden Einheit dargestellt. Dabei ist die Aerosol-erzeugende Einheit A3 in ihrem Innern mit einer semipermeablen Trennwand A3.4 zur verbesserten Gasverwirbelung versehen. Diese befindet sich im Trägergasstrom, bevorzugt quer zu dessen Strömungsrichtung. Die Trennwand A3.4 ist partikelundurchlässig und kann porös ausgebildet sein. Vorteilhaft kann eine Fritte eingesetzt werden.

Vorteil:

[0034] Verbesserte Aerosolerzeugung dadurch, dass durch die semipermeable Trennwand A3.4 im Inneren der Aerosol-erzeugenden Einheit A3 eine erhöhte Gas- und somit Aerosolverwirbelung erzeugt wird

[0035] Fig. 9 zeigt eine weitere Ausführung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung, mit einem rotierenden Element A3.5, z.B. einer Bürste, das den Transport des Pulvers aus dem Pulverreservoir A7 in die Aerosol-erzeugende Einheit A3 fördert. Das rotierende Element A3.5 ist vorteilhaft im Bereich des Ausgangs des Pulverreservoirs A7 im Übergang zur Aerosol-erzeugenden Einheit angeordnet. Vorteilhaft kann das Pulver in kompaktierter Form im Pulverreservoir A7 vorliegen und mittels einer Vorschubeinrichtung auf das rotierende Element zu bewegt werden.

Vorteil:

[0036] Verbesserte Aerosolerzeugung dadurch, dass durch die Bewegung des rotierenden Elements sowie der Scherströmung über dieses eine erhöhte Gas- und Aerosolverwirbelung erzeugt wird.

[0037] Fig. 10 zeigt eine weitere Ausführung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung mit mehreren parallel geschalteten Pulverreservoiren A7, die jeweils dieselbe Aerosolerzeugende Einheit A3 speisen (über die Sammelleitung A7.1). Mittels Ventilen A7.4 an den einzelnen Pulverreservoiren A7 sind diese jeweils individuell zuschaltbar oder abtrennbar.

Vorteile:

[0038] Erzeugung von beliebigen Schichtabfolgen auf dem Substrat durch Füllung der Pulverreservoire A7 mit unterschiedlichen Pulvermaterialien und Abscheidung einer einzelnen Schicht der Schichtabfolge aus jeweils einem Pulvermaterial.
Erzeugung von Mischschichten durch Mischung von verschiedenen Pulvermaterialien in der aerosolerzeugenden Vorrichtung A3.
Fig. 11 zeigt eine weitere Ausführung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung mit mehreren Düsen A4 und mehreren Aerosol-erzeugenden Einheiten A3.
Es kann eine beliebige Anzahl von Düsen A4 vor dem Substrat A5 positioniert werden.
Jede Düsenapparatur A4 wird dabei durch eine separate Aerosol-erzeugende Einheit A3 gespeist. Vorteilhaft wird jede dieser Aerosol-erzeugenden Einheiten mit einem separaten Pulverreservoir verbunden.
In einer weiteren Ausführung (nicht gezeigt) können auch mehrere Düsen von nur einer Aerosol-erzeugenden Einheit gespeist werden. In einer weiteren vorteilhaften Ausführung werden die Düsen so dicht nebeneinander positioniert, dass ihre Auslassquerschnitte praktisch einen gemeinsamen Auslassquerschnitt bilden.

Vorteile:

[0039] Erzeugung von beliebigen Schichtabfolgen auf dem Substrat aus unterschiedlichen Pulvermaterialien durch abwechselnden Betrieb einer einzelnen Düse ohne Cross-Kontamination zwischen verschiedenen Pulvern während der Aerosolerzeugung. Erzeugung beliebig breiter Schichten aus einem oder verschiedenen Aerosolen durch Zusammenschalten beliebig vieler Düseneinheiten wird ermöglicht.

[0040] Fig. 12 zeigt eine weitere Ausführung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung mit einer vor dem Substrat A5 positionierten Beschichtungsmaske A12. Die Maske A12 kann auch beweglich ausgeführt sein.

Vorteil:

[0041] Abscheidung von 3-dimensionalen Strukturen auf dem Substrat.

[0042] Fig. 13 zeigt eine weitere Ausführung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung mit einem Substratwechsler A5.1. Auf dem Substratwechsler sind mehrere Substrate A5 angeordnet. Der Substratwechsler 5.1 ist z.B. drehbar ausgeführt (Revolverausführung). Im gezeigten Beispiel weist er einen Querschnitt von der Form eines regelmäßigen Fünfecks auf, so dass fünf Substrate aufgebracht werden können, welche zeitlich im Wechsel beschichtet werden können.

[0043] Der Substratwechsler ist in einer besonders vorteilhaften Ausführung dergestalt ausgeführt, dass dieser oder die einzelnen Substrate entkoppelt und einer Transporteinrichtung übergeben werden können z.B. für die anschließende analytische Untersuchungen vor Ort oder die Rücksendung auf die Erde.

[0044] Alternativ können auch mehrere Substrate auf einem in XYZ-verfahrbaren Tisch positioniert werden. In einer weiteren alternativen Ausführung kann auch ein Substratring verwendet werden.
In einer weiteren Ausführung wird ein Substratband, auf dem mehrere Substrate angeordnet sind, eingesetzt, das über eine Rollenvorrichtung geführt wird.

Vorteil:

[0045] Es können in unmittelbarer zeitlicher Folge (ohne zusätzliche Umbauten) mehrere Substrate beschichtet werden und/oder es werden der Abtransport und/oder nachfolgende Untersuchungen ermöglicht, ohne dass die Beschichtung der übrigen Substrate verzögert würde.

Literatur

[0046]

[1] J. Akedo: Room temperature impact consolidation (RTIC) of fine ceramic powder by aerosol deposition method and applications to microdevices, J. Therm. Spray Tech., 17, 181-198 (2008), doi: 10.1007/s11666-008-9163-7

[2] H. Salmang, H. Scholze: Keramik, 7th ed, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (2007), p. 857-859, 906, ISBN 3-540-63273-5

[3] J. Akedo, M. Lebedev: Microstructure and Electrical Properties of Lead Zirconate Titanate (Pb(Zr52/Ti48)O3) Thick Films Deposited by Aerosol Deposition Method, Jpn. J. Appl. Phys., 38, 5397-5401 (1999), doi: 10.1143/JJAP.38.5397

[4] K. Sahner, M. Kaspar, R. Moos: Assessment of the novel aerosol deposition method for room temperature preparation of metal oxide gas sensor films, Sens. Actuators. B: Chemical, 139, 394-399 (2009), doi: 10.1016/j.snb.2009.03.011

[5] M. Schubert, J. Exner, R. Moos: Influence of carrier gas composition on the stress of Al2O3 coatings prepared by the aerosol deposition method, Materials, 7, 5633-5642 (2014), doi: 10.3390/ma7085633

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung von Schichten oder Körpern an einem Ort, der gegenüber den Verhältnissen auf der Erde einen geringeren natürlichen Umgebungsdruck aufweist, **dadurch gekennzeichnet, dass** aus einem Trägergas und einem Pulver ein Pulver-Aerosol erzeugt wird, welches unter dem Einfluss einer Druckdifferenz auf ein Substrat (A5) gelenkt wird und dort schichtweise abgelagert wird, wobei am Ort der Ablagerung der Umgebungsdruck des Ortes herrscht.

2. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Pulver-Aerosol vor der Ablagerung mittels einer Düse (A4) zusätzlich beschleunigt wird.

3. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Verfahren auf dem Erdmond, einem anderen nicht-irdischen Himmelskörper oder einem künstlichen Satelliten durchgeführt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Pulver ein auf dem Erdmond oder einem anderen nicht-irdischen Himmelskörper vorgefundenes Pulver ist, oder aus einem dort vorgefundenen Material erzeugt wird.

5. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Trägergas Wasserstoff, Helium, Stickstoff oder Sauerstoff eingesetzt wird.

6. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorangehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch**:

   - ein Trägergasreservoir (A1),
   - ein Pulverreservoir (A7),
   - eine Aerosol-erzeugende Einheit (A3), die aus dem Trägergas des Trägergasreservoirs (A1) und Pulver aus dem Pulverreservoir (A7) ein

Pulver-Aerosol erzeugt,
- mindestens ein Substrat (A5), auf dem das in der Aerosol-erzeugenden Einheit (A3) erzeugte Pulver-Aerosol abgelagert wird.

7. Vorrichtung nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine Düse (A4) zur zusätzlichen Beschleunigung des Aerosols vorhanden ist.

8. Vorrichtung nach Anspruch 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine Substratabschirmung (A6) vorhanden ist, die das Substrat (A5) von den übrigen Elementen der Vorrichtung abschirmt.

9. Vorrichtung nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Substratabschirmung (A6) an die Düse (A4) angeschlossen ist.

10. Vorrichtung nach Anspruch 8 oder 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Substratabschirmung (A6) das Substrat (A5) nur teilweise umschließt.

11. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 oder 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Substratabschirmung (A6) das Substrat (A5) voll umschließt.

12. Vorrichtung nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Substratabschirmung (A6) semipermeable Eigenschaften aufweist, in dem sie durchlässig für das Trägergas, aber undurchlässig für das Pulver ist.

13. Vorrichtung nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Substratabschirmung (A6) impermeable Eigenschaften aufweist, in dem sie undurchlässig für das Trägergas und undurchlässig für das Pulver ist.

14. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 11 bis 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Substratabschirmung (A6) flexibel oder dehnbar oder faltbar oder starr ausgebildet ist.

15. Vorrichtung nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Substratabschirmung (A6) flexibel oder dehnbar oder faltbar ausgebildet ist und mit einem Mechanismus (A13) zur Kontraktion der Substratabschirmung (A6) ausgestattet ist, um den Rücktransport des Trägergases in das Trägergasreservoir (A1) zu ermöglichen.

16. Vorrichtung nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Substratabschirmung (A6) starr ausgebildet ist, und mit einer Pumpe (A12) ausgestattet ist, um den Rücktransport des Trägergases in das Trägergasreservoir (A1) zu ermöglichen.

17. Vorrichtung nach Anspruch 16, **dadurch gekennzeichnet, dass** im Innenraum der Substratabschirmung (A6) eine semipermeable Filtervorrichtung (A6.1) vorhanden ist, die durchlässig für das Trägergas und undurchlässig für das Pulver ist, um beim Rücktransport des Trägergases in das Trägerreservoir (A6) ein Eindringen des Pulvers in die Pumpe (A12) zu verhindern.

18. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche 6 bis 17, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Aerosol-erzeugende Vorrichtung (A3) eine Aerosolerzeugungsdüse (A3.3) enthält, die einen Gaseinlass mit Querschnittsreduzierung in Strömungsrichtung des Trägergases, einen Pulvereinlass mit Querschnittsreduzierung in Strömungsrichtung des Pulvers und einen Aerosolauslass mit Querschnittserweiterung in Strömungsrichtung des Aerosols umfasst.

19. Vorrichtung nach Anspruch 18, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur Regulierung des Pulvereintrags in die Aerosolerzeugungsdüse (A3.3) am Pulverreservoir (A7) eine separate Gaszufuhr (A7.2) vorgesehen ist.

20. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche 6 bis 19, dadurch ge= kennzeichnet, dass in der Aerosol-erzeugenden Einheit (A3) im Strömungsweg des Trägergases eine semipermeable Trennwand (A3.4) vorhanden ist, die durchlässig für das Trägergas ist und undurchlässig für das Pulver ist und eine erhöhte Gasverwirbelung erzeugt.

21. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche 6 bis 20, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein rotierendes Element (A3.5) vorhanden ist, das den Transport des Pulvers aus dem Pulverreservoir (A7) in die Aerosol-erzeugende Einheit (A3) fördert, wobei das Pulver im Pulverreservoir (A7) in kompaktierter Form vorliegt und mittels einer Vorschubeinrichtung in den Wirkbereich des rotierenden Elements (A3.5) transportiert wird.

22. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche 6 bis 21, **dadurch gekennzeichnet, dass** mehrere Substrate (A5) auf einer Substratwechseleinrichtung (A5.1) positioniert sind.

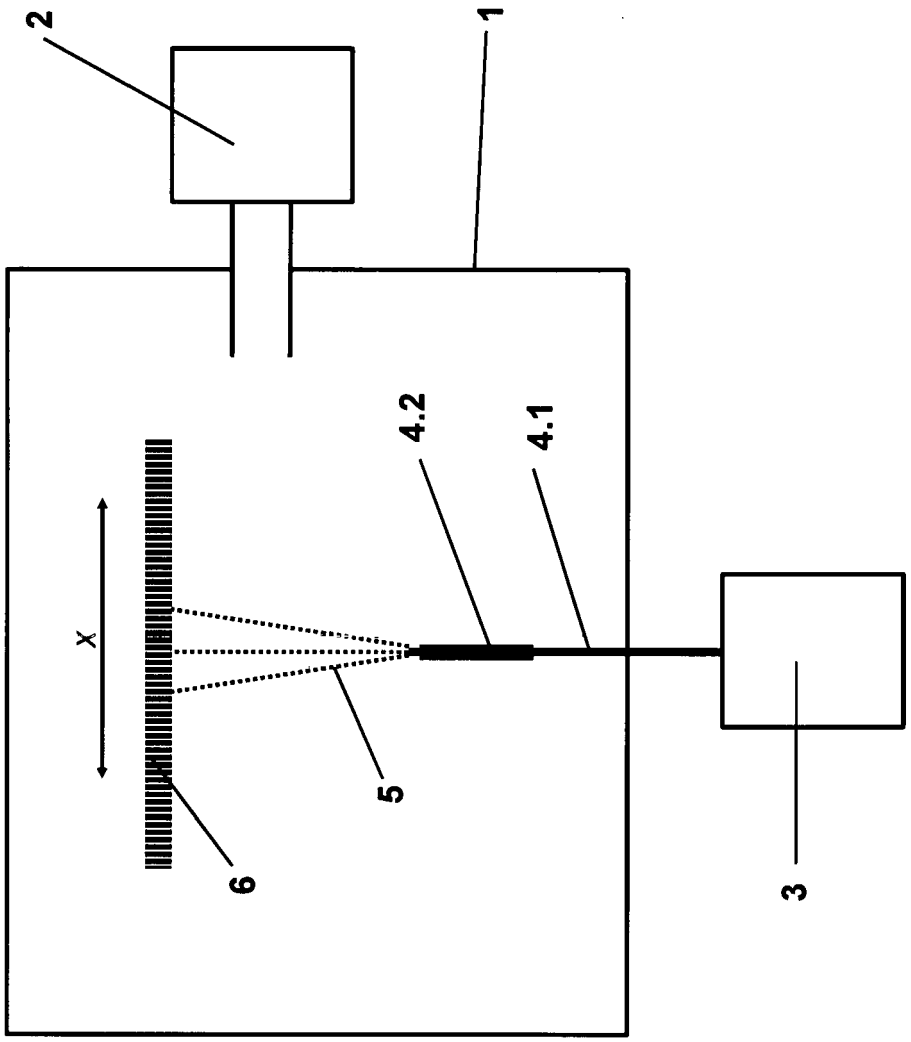


Fig. 1

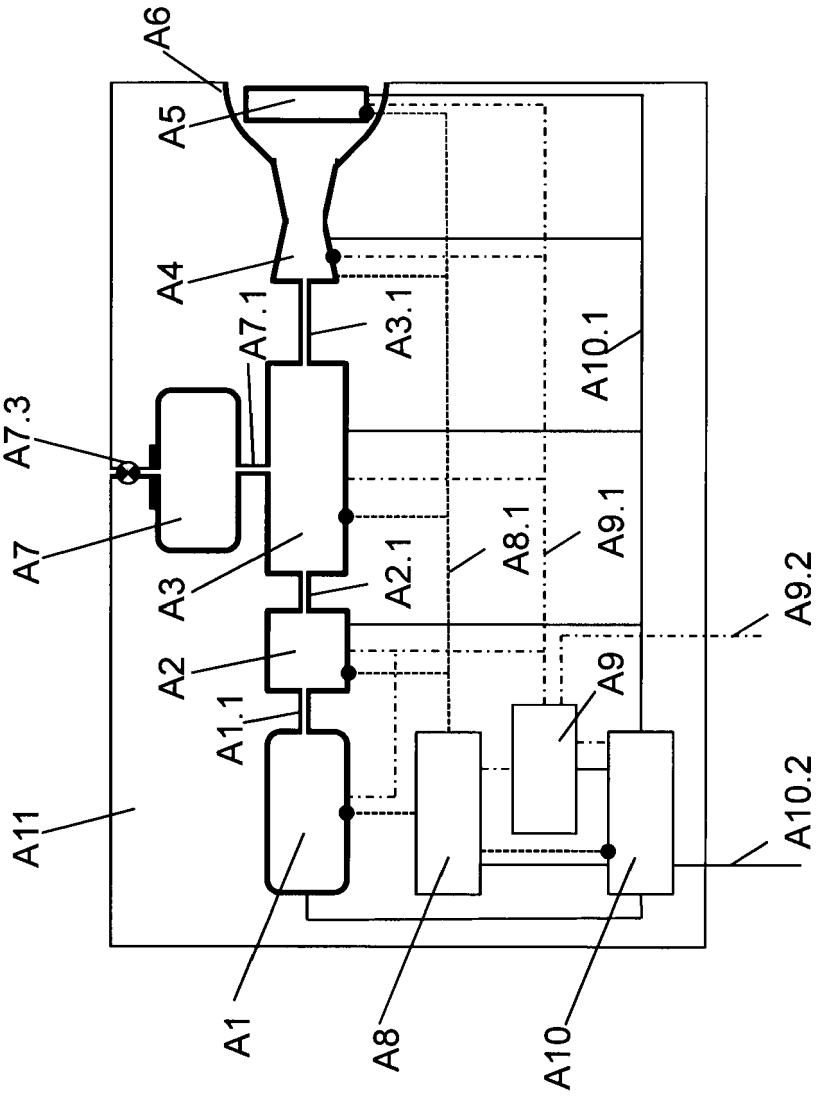

A6
A5
A4
A7.1
A3.1
A10.1
A7.3
A7
A3
A2.1
A8.1
A9.1
A9.2
A2
A9
A1.1
A11
A10.2
A1
A8
A10

Fig. 2

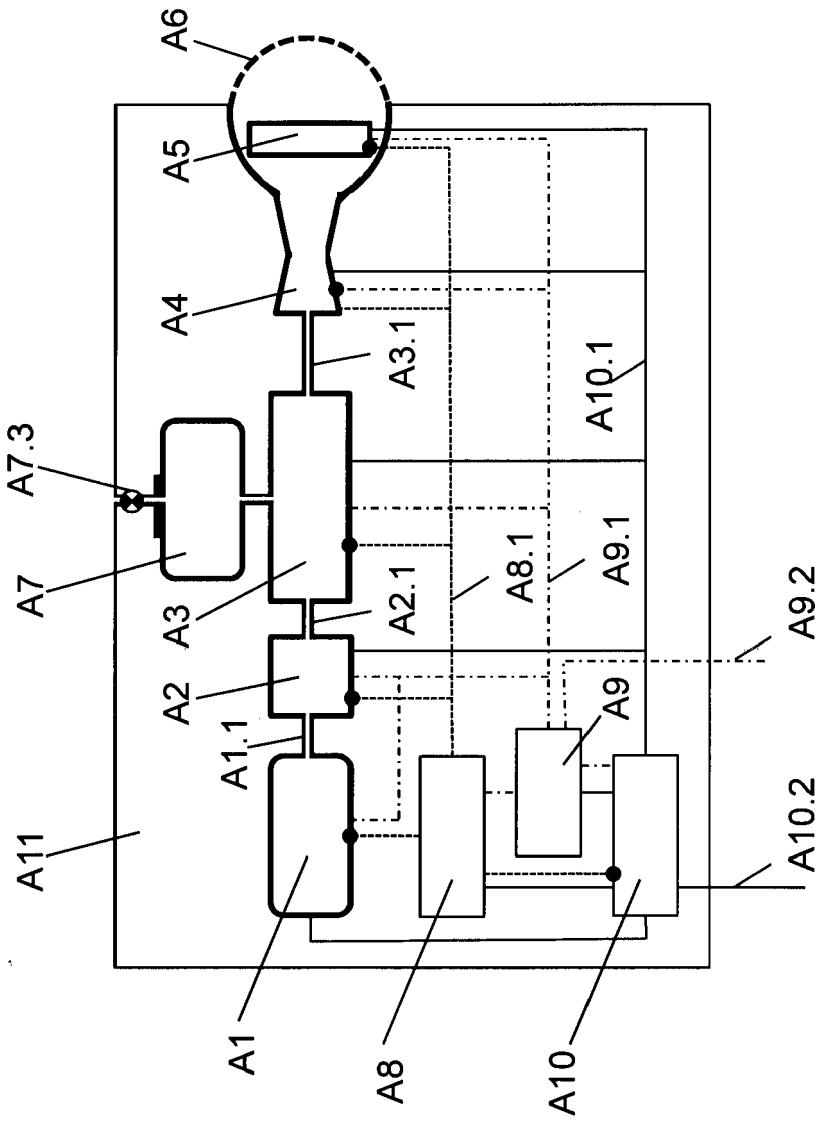

A6
A5
A4
A3.1
A10.1
A7.3
A7
A3
A2.1
A8.1
A9.1
A9.2
A2
A9
A1.1
A11
A10.2
A1
A8
A10

Fig. 3

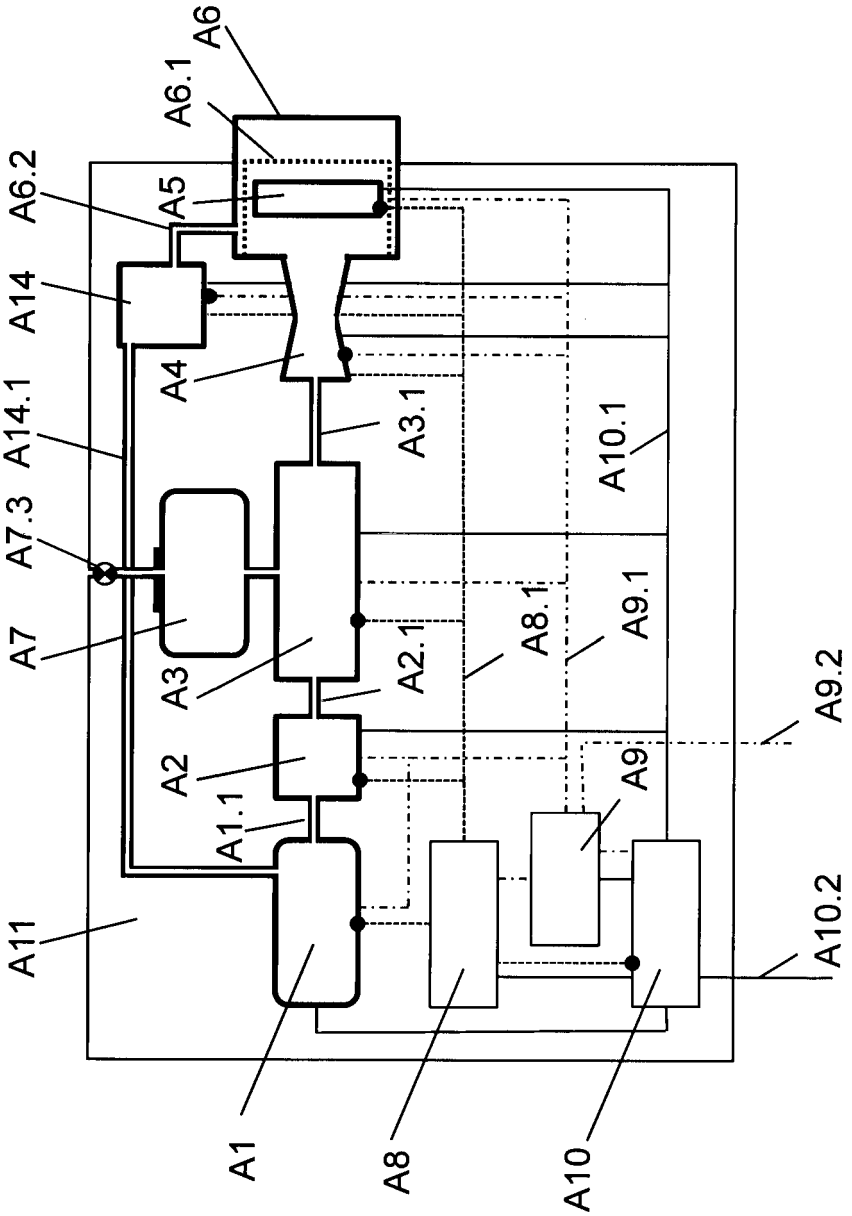

A6
A6.1
A6.2
A5
A14
A4
A14.1
A3.1
A10.1
A7.3
A7
A3
A2.1
A8.1
A9.1
A9.2
A2
A9
A1.1
A11
A10.2
A1
A8
A10

Fig. 4

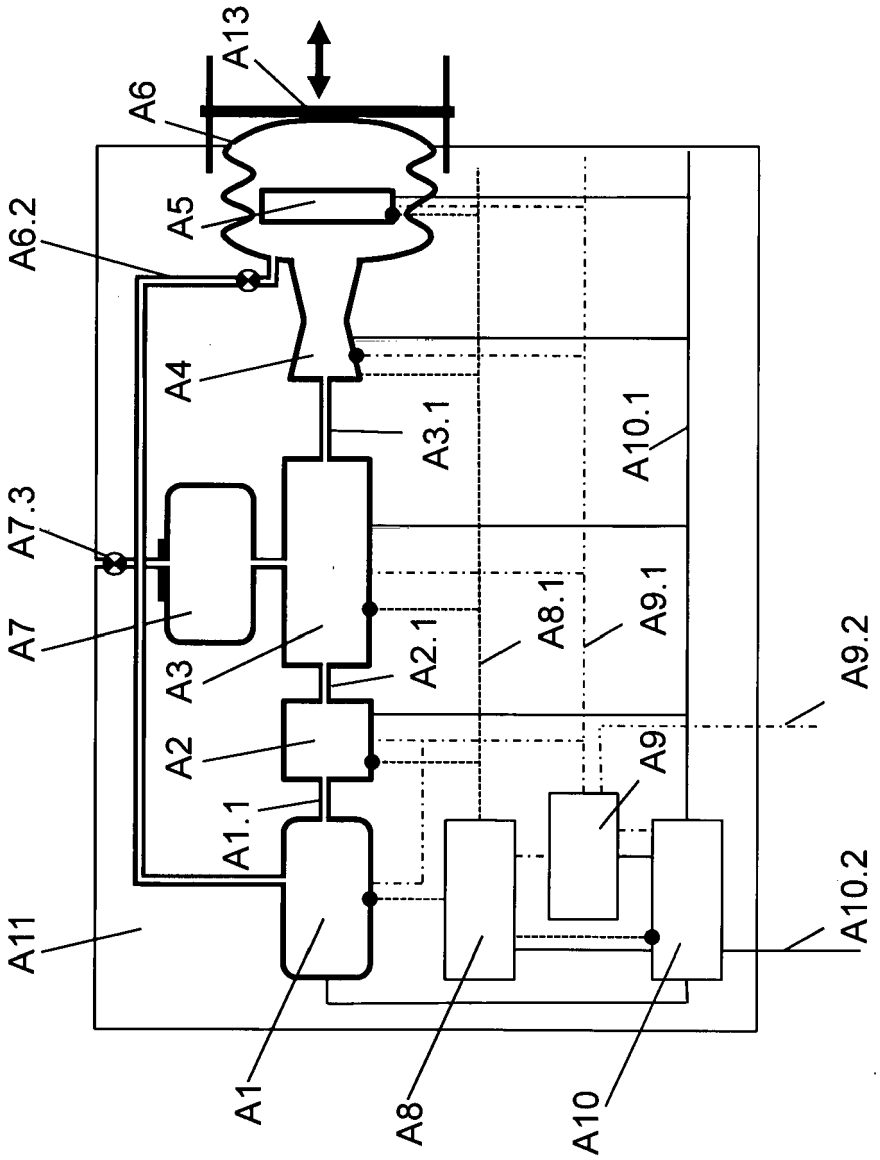

A13
A6
A5
A6.2
A4
A3.1
A10.1
A7.3
A7
A3
A2.1
A8.1
A9.1
A9.2
A2
A9
A1.1
A10.2
A11
A1
A8
A10

Fig. 5

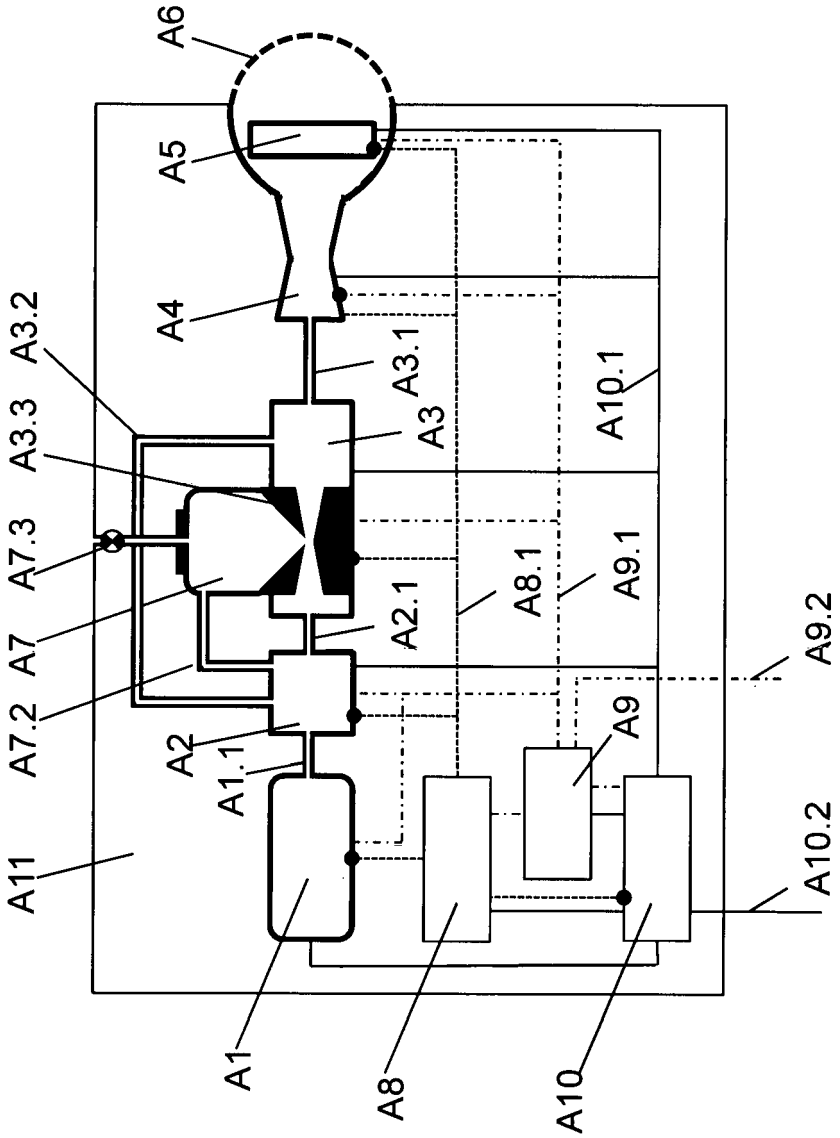

A6
A5
A4
A3.2
A3.1
A3.3
A3
A10.1
A7.3
A8.1
A9.1
A7
A2.1
A9.2
A7.2
A9
A2
A1.1
A10.2
A11
A1
A8
A10

Fig. 6

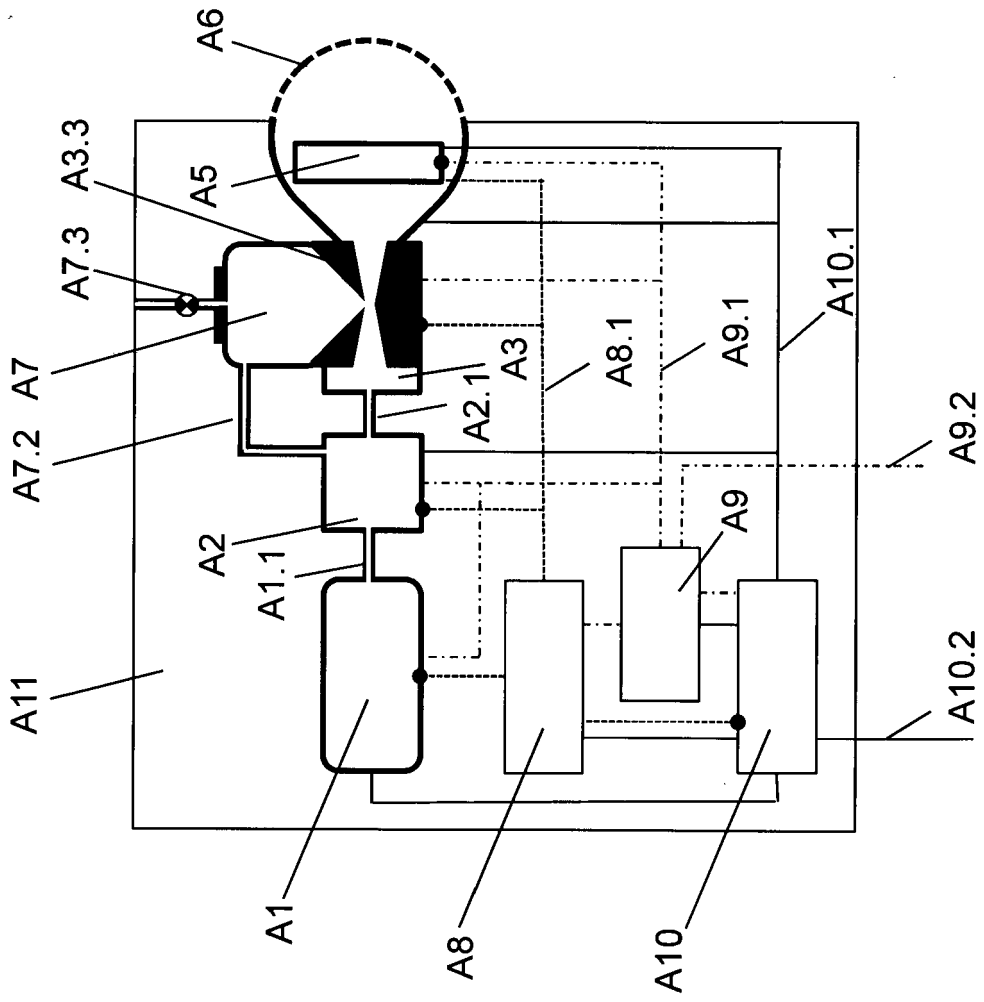

A6
A3.3
A5
A7.3
A7
A7.2
A3
A8.1
A9.1
A10.1
A2.1
A9.2
A2
A9
A1.1
A11
A10.2
A1
A8
A10

Fig. 7

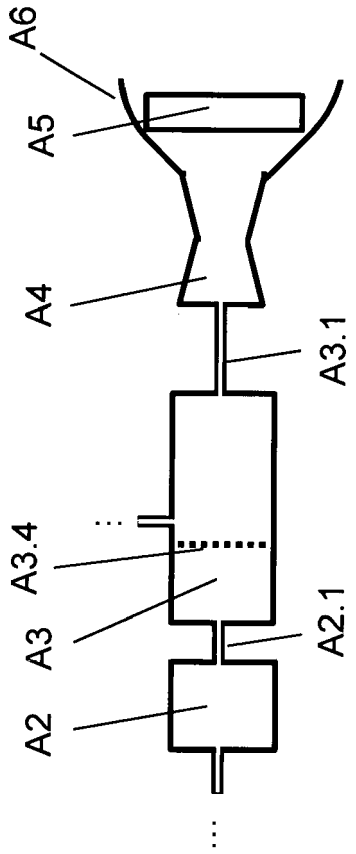


Fig. 8

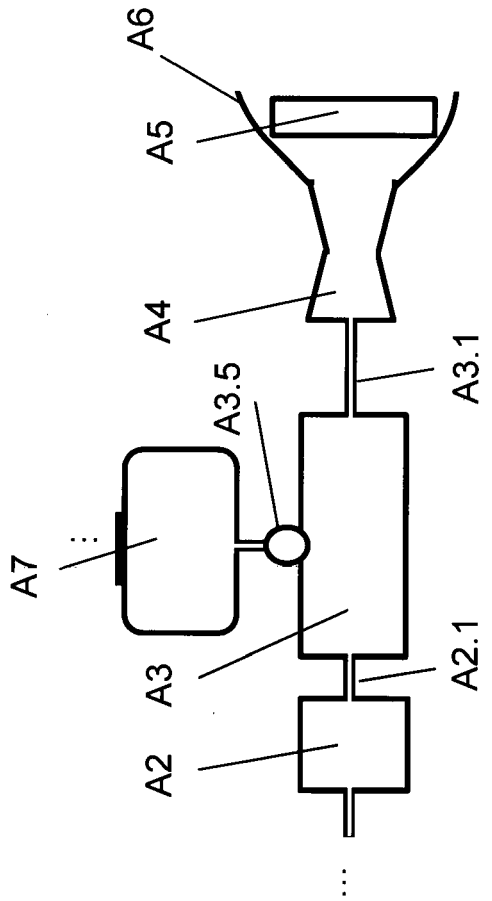


Fig. 9

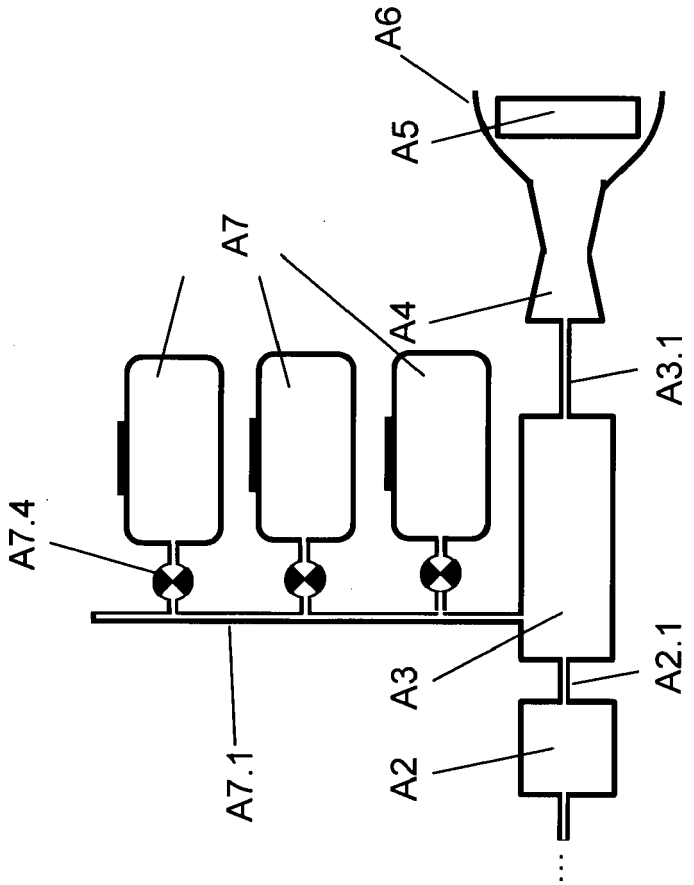


Fig. 10

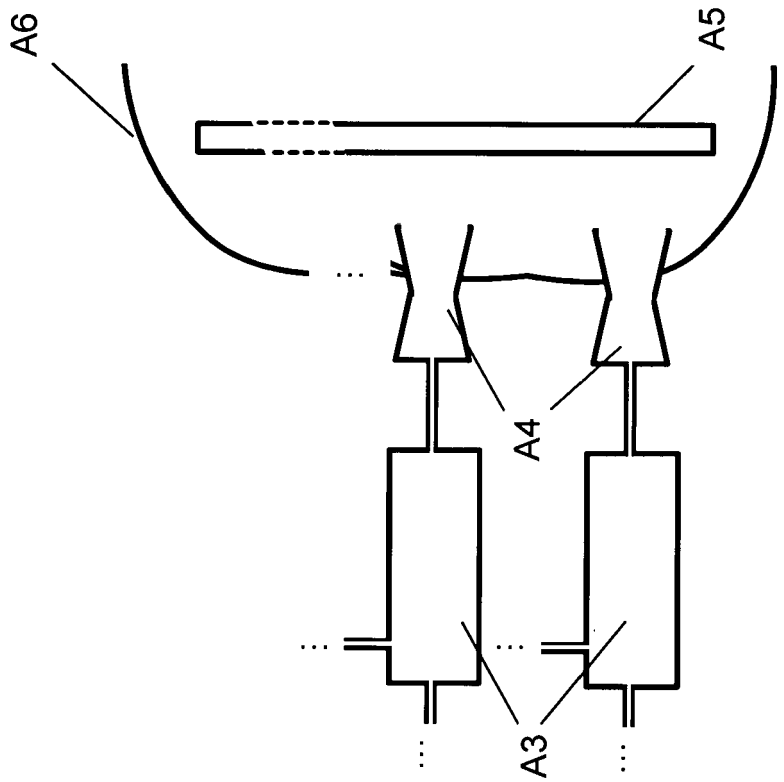


Fig. 11

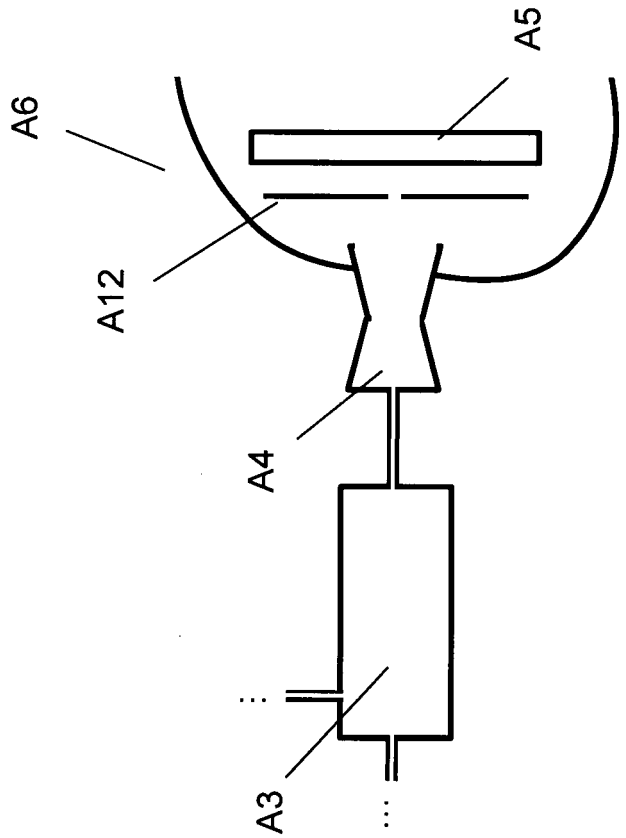


Fig. 12

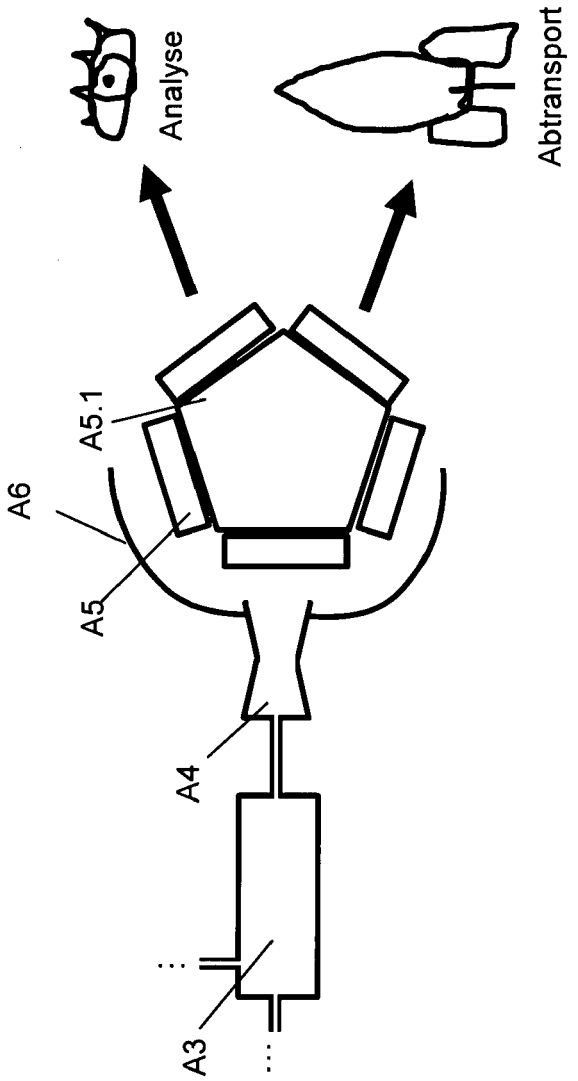


Fig. 13

Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung
EP 18 00 0567

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE

Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	DE 10 2015 012425 A1 (BRUCKNER MICHAELA [DE]; ENGELBRECHT ANDREAS [DE]; EXNER JÖRG [DE]; HAN) 30. März 2017 (2017-03-30) * Absatz [0004] - Absatz [0006] * * Absatz [0008] - Absatz [0010] * * Absatz [0012] - Absatz [0016] * * Ansprüche 1-10; Abbildungen 2-7 * -----	1-22	INV. C23C4/137 C23C24/08 C23C24/04 C23C4/01
X A	DE 10 2016 202607 A1 (SIEMENS AG [DE]; UNIVERSITÄT BAYREUTH [DE]) 16. November 2017 (2017-11-16) * Absatz [0003] - Absatz [0004] * * Absatz [0013] - Absatz [0014] * * Absatz [0020] - Absatz [0023] * * Ansprüche 1-3; Abbildungen 1-4 * -----	1-6,18, 19 7-17, 20-22	
X	ERIC IRISSOU ET AL: "Review on Cold Spray Process and Technology: Part I?Intellectual Property", JOURNAL OF THERMAL SPRAY TECHNOLOGY, ASM INTERNATIONAL, MATERIALS PARK, US, Bd. 17, Nr. 4, 1. Dezember 2008 (2008-12-01), Seiten 495-516, XP002625101, ISSN: 1059-9630, DOI: 10.1007/S11666-008-9203-3 * das ganze Dokument * -----	1-22	RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC) C23C B05B

Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt

Recherchenort	Abschlußdatum der Recherche	Prüfer
Den Haag	10. September 2018	Ovejero, Elena

KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE

X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet
Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie
A : technologischer Hintergrund
O : nichtschriftliche Offenbarung
P : Zwischenliteratur

T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze
E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
D : in der Anmeldung angeführtes Dokument
L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument

& : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR. EP 18 00 0567

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

10-09-2018

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 102015012425 A1	30-03-2017	KEINE	
DE 102016202607 A1	16-11-2017	DE 102016202607 A1	16-11-2017
		WO 2017140855 A1	24-08-2017

EPO FORM P0461

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

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 7553376 B2 **[0007]**

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **J. AKEDO.** Room temperature impact consolidation (RTIC) of fine ceramic powder by aerosol deposition method and applications to microdevices. *J. Therm. Spray Tech.,* 2008, vol. 17, 181-198 **[0046]**
- **H. SALMANG ; H. SCHOLZE.** Keramik. Springer-Verlag, 2007, 857-859, 906 **[0046]**
- **J. AKEDO ; M. LEBEDEV.** Microstructure and Electrical Properties of Lead Zirconate Titanate (Pb(Zr52/Ti48)O3) Thick Films Deposited by Aerosol Deposition Method. *Jpn. J. Appl. Phys.,* 1999, vol. 38, 5397-5401 **[0046]**
- **K. SAHNER ; M. KASPAR ; R. MOOS.** Assessment of the novel aerosol deposition method for room temperature preparation of metal oxide gas sensor films, Sens. *Actuators. B: Chemical,* 2009, vol. 139, 394-399 **[0046]**
- **M. SCHUBERT ; J. EXNER ; R. MOOS.** Influence of carrier gas composition on the stress of Al2O3 coatings prepared by the aerosol deposition method. *Materials,* 2014, vol. 7, 5633-5642 **[0046]**