

(19)



(11)

EP 3 395 482 A2

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:
31.10.2018 Patentblatt 2018/44

(51) Int Cl.:
B22F 9/14 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **18000382.4**

(22) Anmeldetag: **19.04.2018**

(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

(30) Priorität: **26.04.2017 DE 102017004003**

(71) Anmelder: **Hochschule Pforzheim
75175 Pforzheim (DE)**

(72) Erfinder:
• **Oßwald, Kai
70435 Stuttgart (DE)**
• **Woidasky, Jörg
76149 Karlsruhe (DE)**

(74) Vertreter: **Lichti - Patentanwälte Partnerschaft
mbB
Postfach 41 07 60
76207 Karlsruhe (DE)**

(54) **VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG VON PARTIKELN MITTELS FUNKENEROSION UND
HIERFÜR GEEIGNETE ERODIERVORRICHTUNG**

(57) Es wird ein Verfahren und eine Erodiervorrichtung zur Herstellung von Partikeln mittels Funkenerosion vorgeschlagen, indem eine erste Elektrode aus einem ersten Metall und eine zweite Elektrode aus einem zweiten Metall bereitgestellt wird, die Elektroden in einem fluiden Dielektrikum werden, an die Elektroden eine gepulste elektrische Spannung angelegt wird und die Elektroden aufeinander zu bewegt werden, um elektrische Funkenentladungen zwischen denselben zu erzeugen, wonach die anlässlich der Funkenentladungen erzeugten Partikeln aus den Elektrodenmaterialien gewonnen werden. Die Erfindung sieht vor, dass wenigstens eine dritte Elektrode aus einem drittes Metall bereitgestellt und in

dem Dielektrikum angeordnet wird, wobei ferner zwischen die erste und die dritte Elektrode eine gepulste elektrische Spannung angelegt wird und die erste Elektrode und die dritte Elektrode aufeinander zu bewegt werden, um elektrische Funkenentladungen zwischen denselben zu erzeugen, wonach die anlässlich der Funkenentladungen erzeugten Partikel aus den Materialien der ersten und dritten Elektrode gewonnen werden und der Anteil der aus dem Material der ersten, zweiten und dritten Elektrode erzeugten Partikel durch Verlagern der ersten Elektrode in Bezug auf die zweite und dritte Elektrode gesteuert wird.

EP 3 395 482 A2

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung von Partikeln mittels Funkenerosion, umfassend die folgenden Schritte:

- Bereitstellen wenigstens einer ersten Elektrode, welche wenigstens ein erstes Metall enthält;
- Bereitstellen wenigstens einer zweiten Elektrode, welche wenigstens ein zweites Metall enthält;
- Anordnen der wenigstens einer ersten Elektrode und der wenigstens einer zweiten Elektrode in einem fluiden Dielektrikum;
- Anlegen einer gepulsten elektrischen Spannung zwischen der wenigstens einer ersten Elektrode und der wenigstens einer zweiten Elektrode;
- Bewegen der wenigstens einer ersten Elektrode und der wenigstens einer zweiten Elektrode aufeinander zu und Erzeugen von elektrischen Funkenentladungen zwischen denselben; und
- Gewinnen der anlässlich der Funkenentladungen erzeugten Partikel aus den Materialien der ersten Elektrode und der zweiten Elektrode.

[0002] Die Erfindung bezieht sich ferner auf eine insbesondere zur Durchführung eines solchen Verfahrens geeignete Erodiervorrichtung zur Herstellung von Partikeln mittels Funkenerosion, umfassend:

- wenigstens eine erste Elektrode, welche wenigstens ein erstes Metall enthält;
- wenigstens eine zweite Elektrode, welche wenigstens ein zweites Metall enthält;
- wenigstens einen elektrischen Pulsgenerator zur Erzeugung einer gepulsten elektrischen Spannung, an welchen die wenigstens eine erste Elektrode und die wenigstens eine zweite Elektrode anschließbar sind; und
- eine Verlagerungseinrichtung zum Bewegen der wenigstens einer ersten Elektrode und der wenigstens einer zweiten Elektrode aufeinander zu, um zwischen der wenigstens einer ersten Elektrode und der wenigstens einer zweiten Elektrode elektrische Funkenentladungen zu erzeugen.

[0003] Bei der Funkenerosion (Electrical Discharge Machining, EDM) handelt es sich um ein bekanntes elektroerosives Bearbeitungsverfahren, welches auf sehr kleinräumigen und kurzzeitigen Funkenentladungen zwischen einer ersten Elektrode und einer zweiten Elektrode, an welche eine gepulste elektrische Spannung angelegt worden ist, basiert. Die jeweiligen Elektrodenmaterialien werden dabei aufgeschmolzen und infolge der mit den elektrischen Entladungsvorgängen zwischen den Elektroden erzeugten elektrischen Funken bereichsweise abgetragen, wobei die abgetragenen Materialien in feinpartikulärer Form vorliegen und üblicherweise einen Partikeldurchmesser zwischen etwa 1 µm und etwa 100 µm besitzen. Das Funkenerodieren wird dabei vornehmlich, z.B. in Form einer Senk-, Bohr- oder Drahterosion, zum bereichsweisen Abtragen von Material von Werkstücken eingesetzt, um diesen relativ komplexe Geometrien zu verleihen, welche mittels mechanischen spanabhebender Verfahren nicht oder nur schwer erzeugt werden können. Das Werkstück dient dann als eine der Elektroden, d.h. es wird an den elektrischen Pulsgenerator angeschlossen, welcher zwischen dem Werkstück und der Arbeitselektrode, welche beispielsweise aus Graphit, Kupfer oder dergleichen gefertigt sein kann, die elektrischen Spannungspulse erzeugt. Zwischen den Elektroden bzw. zwischen dem Werkstück und der Arbeitselektrode befindet sich üblicherweise ein flüssiges Dielektrikum, welches beispielsweise von deionisiertem Wasser, Öl oder dergleichen gebildet sein kann. Darüber hinaus ist in diesem Zusammenhang das sogenannte Planetäroderieren bekannt, bei welchem die Elektrode in Bezug auf das zu bearbeitende Werkstück senkrecht zur Einsenk- bzw. Hauptvorschubrichtung bewegt wird, um dem Werkstück insbesondere verhältnismäßig aufwändige Formen zu verleihen, wie beispielsweise Gewinde, Hinterschnitte, scharfkantige Ecken oder Rundungen mit vordefinierten Radien und dergleichen.

[0004] Die bei der Funkenerosion erzielbare Abtragsleistung sowie die Größenverteilung der abgetragenen Partikel als Maß für die durch den Materialabtrag erzielbaren Toleranzen hängt von verschiedenen, ihrerseits von den Elektrodenmaterialien abhängigen Verfahrensparametern ab, wie insbesondere von der Pulsdauer der mittels des Pulsgenerators erzeugten elektrischen Spannung, der Polarität der elektrischen Spannung und der elektrischen Stromstärke des Erodierstromes infolge der Funkenentladungen. So führen beispielsweise höhere elektrische Erodierströme und längere elektrische Spannungspulse zu größeren abgetragenen Partikeln und umgekehrt, während ferner durch Umkehr der Polarität unterschiedliche Abtragsraten an der Kathode bzw. an der Anode erhalten werden können (vgl. z.B. A. M. Matz, D. Kammerer, N. Jost & K. Oßwald: "Machining of metal foams with varying mesostructure using Wire EDM", Procedia CIRP 42 (2016), 263-267; V. S. R. Murti & P. K. Philip: "An analysis of the debris in ultrasonic-assisted electrical discharge machining", Wear 117(2) (1987), 241-250; J. S. Soni: "Microanalysis of debris formed during rotary EDM of titanium alloy (Ti 6Al 4V) and die steel (T 215 Cr12)", Wear 177(1) (1989), 71-79; J. S. Soni: "Performance evaluation of rotary EDM by experimental design technique", Defence Science Journal 47 (1) (1997), 65-73; D.D. DiBitonto, P. T. Eubank, M. R. Patel & M. A. Barrufet: "Theoretical models of the electrical discharge machining process. I. A simple

cathode erosion model", Journal of Applied Physics 66 (9) (1989), 4095-4103).

[0005] In der Fig. 4 ist in diesem Zusammenhang exemplarisch die Abhängigkeit der Abtragsraten einer Kathode aus Kupfer (Cu) und einer Anode aus Eisen (Fe) von der Entladezeit bei einem Erodierstrom von 10 A gemäß dem vorstehenden Aufsatz von DiBitonto et al. dargestellt, wobei es in der Fig. 4 erkennbar ist, dass die Masse der an einer jeweiligen Elektrode abgetragenen Partikeln bei zunehmender elektrischer Pulsdauer ("Entladezeit") jeweils bis zu einem material- und polungsspezifischen Maximalwert (hier: etwa 3 μs im Falle von Kupfer und etwa 30 μs im Falle von Eisen) zunimmt und sodann wieder absinkt.

[0006] Darüber hinaus ist es in jüngerer Zeit bekannt geworden, das Verfahren des Funkenerodierens nicht zur Oberflächenbearbeitung von Werkstücken, sondern zur Erzeugung von pulverförmigen Partikeln aus den Materialien der ersten und der zweiten Elektrode einzusetzen, d.h. das Interesse gilt in diesem Fall nicht etwa der Formgebung eines als Elektrode eingesetzten Werkstückes, sondern den von den Elektroden abgetragenen Partikeln. Diese Anwendung der Funkenerosion hat sich insbesondere für die wirtschaftliche Herstellung relativ kleiner Partikelchargen von Partikeln auf der Basis von Metallen als geeignet erwiesen, wobei ihr insbesondere die kurzen Herstellungszeiten zur Erzeugung der Partikel, die breite Einstellbarkeit der Pulverzusammensetzung durch Auswahl der entsprechenden Elektrodenmaterialien sowie die gute Steuerbarkeit des Verfahrens hinsichtlich der Partikelgröße der erhaltenen Partikel in Abhängigkeit der oben genannten Verfahrensparameter zugutekommen.

[0007] So beschreibt die DE 11 2004 001 663 T5 ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Herstellung von Partikeln mittels Funkenerosion gemäß dem Oberbegriff der Ansprüche 1 und 8, wobei die erste Elektrode und die zweite Elektrode in einem Behälter angeordnet werden, welcher ein flüssiges Dielektrikum auf der Basis von demineralisiertem Wasser oder Öl aufnimmt. Die von den beiden Elektrodenmaterialien abgetragenen Partikel werden sodann mittels Verdampfen des Dielektrikums, Sedimentieren in dem Dielektrikum oder Sieb-Klassieren gewonnen.

[0008] Hiervon ausgehend, liegt der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren und eine Erodiervorrichtung zur Herstellung von Partikeln mittels Funkenerosion der eingangs genannten Art auf einfache und kostengünstige Weise dahingehend weiterzubilden, dass die Erzeugung eines breiteren Spektrums an Partikel möglich wird.

[0009] In verfahrenstechnischer Hinsicht wird diese Aufgabe mit einem Verfahren der eingangs genannten Art gelöst, welches durch die folgenden Schritte gekennzeichnet durch:

- Bereitstellen wenigstens einer dritten Elektrode, welche wenigstens ein drittes Metall enthält;
- Anordnen der dritten Elektrode in dem Dielektrikum;
- Anlegen einer gepulsten elektrischen Spannung zwischen die wenigstens eine erste Elektrode und die wenigstens eine dritte Elektrode;
- Bewegen der wenigstens einen ersten Elektrode und der wenigstens einen dritten Elektrode aufeinander zu und Erzeugen von elektrischen Funkenentladungen zwischen denselben; und
- Gewinnen der anlässlich der Funkenentladungen erzeugten Partikeln aus den Materialien der ersten Elektrode und der dritten Elektrode,

wobei der Anteil der aus dem Material der wenigstens einen ersten Elektrode, der wenigstens einen zweiten Elektrode und der wenigstens einen dritten Elektrode erzeugten Partikel durch Verlagern der wenigstens einen ersten Elektrode in Bezug auf die wenigstens eine zweite Elektrode sowie in Bezug auf die wenigstens eine dritte Elektrode gesteuert wird.

[0010] Zur Lösung dieser Aufgabe sieht die Erfindung in vorrichtungstechnischer Hinsicht bei einer Erodiervorrichtung der eingangs genannten Art ferner vor, dass

- die Erodiervorrichtung wenigstens eine dritte Elektrode umfasst, welche wenigstens ein drittes Metall enthält;
- die wenigstens eine dritte Elektrode an wenigstens einen elektrischen Pulsgenerator zur Erzeugung einer gepulsten elektrischen Spannung zwischen der wenigstens einen ersten Elektrode und der wenigstens einen dritten Elektrode anschließbar ist; und
- die Verlagerungseinrichtung ferner zum Bewegen der wenigstens einen ersten Elektrode und der wenigstens einen dritten Elektrode aufeinander zu ausgebildet ist, um zwischen der wenigstens einen ersten Elektrode und der wenigstens einen dritten Elektrode elektrische Funkenentladungen zu erzeugen,

wobei die Verlagerungseinrichtung bezüglich einer Verlagerung der wenigstens einen ersten Elektrode in Bezug auf die wenigstens eine zweite Elektrode sowie in Bezug auf die wenigstens eine dritte Elektrode steuerbar ist.

[0011] Die erfindungsgemäße Ausgestaltung sieht folglich die Verwendung einer oder mehrerer dritter Elektrode(n) aus gegenüber sowohl dem Material der ersten Elektrode als auch dem hiervon verschiedenen Material der zweiten Elektrode verschiedenen Elektrodenmaterialien vor, so dass die Erzeugung von Partikeln aus wenigstens drei unterschiedlichen Materialien möglich ist, welche beispielsweise zur Herstellung von Legierungen mit verschiedenen Anteilen der Elektrodenmaterialien eingesetzt werden können. Die Steuerung der Anteile an den jeweiligen Partikeln, deren Partikeldurchmesser im Übrigen üblicherweise zwischen etwa 1 μm und etwa 100 μm betragen kann, wie es aus der

herkömmlichen Funkenerosion bekannt ist, wird dabei durch Verlagerung der ersten Elektrode(n) in Bezug auf die zweite und dritte(n) Elektrode(n) gesteuert, wobei diese Verlagerung, wie weiter unten noch näher erläutert, sowohl in eine Richtung aufeinander zu bzw. voneinander fort als auch in eine hierzu senkrechte Richtung aneinander vorbei, d.h. parallel zu den der wenigstens einen ersten Elektrode zugewandten Flächen der zweiten und dritten Elektrode(n) erfolgen kann.

[0012] Es sei an dieser Stelle explizit darauf hingewiesen, dass der im Rahmen der vorliegenden Offenbarung in Bezug auf die Elektrodenmaterialien verwendete Begriff "Metall" bzw. "Metallwerkstoff" nicht notwendigerweise auf ein Element des Periodensystems aus der Gruppe der Metalle gerichtet ist, sondern auch Metalllegierungen sowie Metalloxide und andere, wenigstens ein Metall enthaltende Metallverbindungen umfasst.

[0013] Zusätzlich zu der Relativverlagerung der wenigstens einen ersten Elektrode in Bezug auf die wenigstens eine zweite und die wenigstens eine dritte Elektrode kann in vorteilhafter Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens vorgesehen sein, dass der Anteil der aus dem Material der wenigstens einen ersten Elektrode, der wenigstens einen zweiten Elektrode und der wenigstens einen dritten Elektrode erzeugten Partikel ferner durch Verändern wenigstens eines Parameters aus der Gruppe

- Pulsdauer der elektrischen Spannung zwischen der wenigstens einen ersten Elektrode und der wenigstens einen zweiten und dritten Elektrode,
- Polarität der elektrischen Spannung zwischen der wenigstens einen ersten Elektrode und der wenigstens einen zweiten und dritten Elektrode, und
- elektrische Stromstärke des Erodierstromes zwischen der wenigstens einen ersten Elektrode und der wenigstens einen zweiten und dritten Elektrode gesteuert wird, wie es als solches aus dem eingangs geschilderten Stand der Technik bekannt ist.

[0014] Bei einer hierzu geeigneten Erodiervorrichtung kann der wenigstens eine elektrische Pulsgenerator folglich vorzugsweise ferner hinsichtlich

- der Pulsdauer der elektrischen Spannung, und/oder
- der Polarität der elektrischen Spannung, und/oder
- der elektrische Stromstärke des Erodierstromes steuerbar sein, um die Anteile der aus den jeweiligen Elektrodenmaterialien erzeugten Partikeln gemäß der gewünschten Zusammensetzung derselben einzustellen.

[0015] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsvariante des erfindungsgemäßen Verfahrens kann vorgesehen sein, dass die wenigstens eine zweite Elektrode und die wenigstens eine dritte Elektrode zu einem Elektrodenarray elektrisch leitfähig miteinander verbunden werden und die gepulste elektrische Spannung zwischen die wenigstens eine erste Elektrode und das Elektrodenarray aus der wenigstens einen zweiten Elektrode und der wenigstens einen dritten Elektrode angelegt wird, wobei der Anteil der aus dem Material der wenigstens einen ersten Elektrode, der wenigstens einen zweiten Elektrode und der wenigstens einen dritten Elektrode erzeugten Partikel durch Verlagern der wenigstens einen ersten Elektrode im Wesentlichen parallel zu der der wenigstens einen ersten Elektrode zugewandten Fläche des Elektrodenarrays aus der wenigstens einen zweiten Elektrode und der wenigstens einen dritten Elektrode gesteuert wird. Die erste Elektrode wird in diesem Fall folglich nicht nur auf das aus der zweiten und dritten Elektrode - sowie gegebenenfalls weiteren Elektroden aus weiteren Materialien - gebildete Elektrodenarray zu bzw. von diesem fort bewegt, um die elektrischen Funkenentladungen zu erzeugen, sondern wird die erste Elektrode darüber hinaus in einer hierzu senkrechten Richtung entlang der Oberfläche des Elektrodenarrays bewegt, um durch das bzw. die Elektrodenmaterial(ien) des jeweiligen Flächenabschnittes des Elektrodenarrays, welcher der ersten Elektrode gegenüberliegt und in welchem folglich die Funkenentladungen stattfinden, den gewünschten Anteil an den jeweiligen Partikeln zu erzeugen.

[0016] Die von einer jeweiligen zweiten bzw. dritten (oder weiteren) Elektrode abgetragene Stoffmenge kann auf diese Weise entsprechend dem gewünschten Anteil an Partikeln aus dem jeweiligen Elektrodenmaterial gesteuert werden. Wie oben angedeutet, können dabei selbstverständlich auch mehrere dritte Elektroden, wie eine vierte, fünfte etc. Elektrode aus verschiedenen Elektrodenmaterialien in das Elektrodenarray integriert werden, wobei die das Elektrodenarray bildenden dritten, vierten etc. Elektroden zweckmäßigerweise an einem Punkt aneinander angrenzen.

[0017] Bei einer hierfür geeigneten Erodiervorrichtung kann demnach vorgesehen sein, dass die wenigstens eine zweite Elektrode und die wenigstens eine dritte Elektrode zu einem Elektrodenarray elektrisch leitfähig miteinander verbunden sind und der elektrische Pulsgenerator einerseits an die wenigstens eine erste Elektrode, andererseits an das Elektrodenarray aus der wenigstens einen zweiten Elektrode und der wenigstens einen dritten Elektrode anschließbar ist, wobei die Verlagerungseinrichtung zum Bewegen der wenigstens einen ersten Elektrode im Wesentlichen parallel zu der der wenigstens einen ersten Elektrode zugewandten Fläche des Elektrodenarrays aus der wenigstens einen zweiten Elektrode und der wenigstens einen dritten Elektrode ausgebildet ist. Wie bereits erwähnt, kann das Elektrodenarray dabei auch weitere dritte Elektroden, wie vierte, fünfte etc. Elektroden aus weiteren Elektrodenmaterialien

umfassen, wobei die dritten, vierten etc. Elektroden vorzugsweise an einem Punkt aneinander angrenzen.

[0018] Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsvariante des erfindungsgemäßen Verfahrens kann stattdessen beispielsweise vorgesehen sein, dass der wenigstens einen zweiten Elektrode und der wenigstens einen dritten Elektrode jeweils eine erste Elektrode zugeordnet und einerseits zwischen einer der ersten Elektroden und der wenigstens einen zweiten Elektrode, andererseits zwischen einer weiteren der ersten Elektroden und der wenigstens einen dritten Elektrode jeweils eine gepulste elektrische Spannung angelegt wird, wobei die ersten Elektroden gemeinsam auf die jeweilige, ihr zugeordnete, wenigstens eine zweite und wenigstens eine dritte Elektrode zu bewegt werden, um elektrische Funkenentladungen zu erzeugen, und wobei der Anteil der aus dem Material der wenigstens einen ersten Elektrode, der wenigstens einen zweiten Elektrode und der wenigstens einen dritten Elektrode erzeugten Partikel einerseits

- durch gemeinsames Verlagern der ersten Elektroden auf die jeweilige, ihr zugeordnete, wenigstens eine zweite und dritte Elektrode zu bzw. von dieser fort, andererseits
- durch Verändern der Pulsdauer und/oder der Polarität der elektrischen Spannung und/oder der Stromstärke des Erodierstromes zwischen jeweils einer ersten Elektrode und der ihr zugeordneten zweiten und dritten Elektrode unabhängig voneinander

gesteuert wird. In diesem Fall werden die ersten Elektroden folglich gemeinsam auf die jeweilige, ihnen zugeordnete zweite bzw. dritte Elektrode zu bzw. von dieser fort bewegt, wie es als solches in Bezug auf eine Anode und eine Kathode auch bei herkömmlichen Funkenerodierverfahren der Fall ist. Aufgrund dessen, dass zwischen einer jeweiligen ersten Elektrode und der jeweiligen, ihnen zugeordneten zweiten bzw. dritten Elektrode jeweils eine gepulste elektrische Spannung angelegt wird, welche in Bezug auf ihre Pulsdauer, Polarität und/oder Stromstärke des Erodierstromes unabhängig voneinander verändert werden kann, lässt sich der Anteil an erhaltenen Partikeln gleichwohl entsprechend deren gewünschter Zusammensetzung steuern, wie es aus dem eingangs geschilderten Stand der Technik als solches bekannt ist. Dabei besteht ein Vorteil dieser Ausführungsvariante insbesondere darin, dass zusätzlich zu der Verlagerung der ersten Elektrode auf die zweite und dritte Elektrode zu bzw. von diesen fort keine zusätzliche Verlagerungsrichtung der Elektroden erforderlich ist, so dass zur Durchführung dieser Verfahrensvariante eine herkömmliche Funkenerodier Vorrichtung z.B. auf einfache Weise dadurch umgerüstet werden kann, indem die dritte Elektrode mechanisch starr, aber elektrisch isoliert an der zweiten Elektrode befestigt und mittels eines zusätzlichen Pulsgenerators an die weitere erste Elektrode angeschlossen wird.

[0019] Bei einer hierfür geeigneten Erodier Vorrichtung kann folglich vorgesehen sein, dass der wenigstens einen zweiten Elektrode und der wenigstens einen dritten Elektrode jeweils eine erste Elektrode zugeordnet ist und einerseits eine der ersten Elektroden und die wenigstens eine zweite Elektrode, andererseits eine weitere der ersten Elektroden und die wenigstens eine dritte Elektrode jeweils an einen separaten elektrischen Pulsgenerator anschließbar sind, wobei die Verlagerungseinrichtung zum gemeinsamen Bewegen der ersten Elektroden auf die jeweilige, ihr zugeordnete, wenigstens eine zweite und wenigstens eine dritte Elektrode zu und von dieser fort ausgebildet ist, um elektrische Funkenentladungen zu erzeugen, und wobei jeder Pulsgenerator ferner hinsichtlich der Pulsdauer und/oder der Polarität der elektrischen Spannung und/oder der Stromstärke des Erodierstromes unabhängig voneinander steuerbar ist.

[0020] Wie bereits angedeutet, kann es sich in diesem Zusammenhang von Vorteil erweisen, wenn die wenigstens eine zweite Elektrode und die wenigstens eine dritte Elektrode, insbesondere mechanisch, starr miteinander verbunden, aber elektrisch voneinander isoliert sind.

[0021] Darüber hinaus macht es das erfindungsgemäße Verfahren selbstverständlich grundsätzlich möglich, dass die Partikelgröße der erzeugten Partikel aus dem Material der wenigstens einen ersten Elektrode sowie der wenigstens einen zweiten Elektrode und der wenigstens einen dritten Elektrode durch Verändern wenigstens eines Parameters aus der Gruppe

- Pulsdauer der elektrischen Spannung zwischen der wenigstens einen ersten Elektrode und der wenigstens einen zweiten und dritten Elektrode,
- elektrische Stromstärke des Erodierstromes zwischen der wenigstens einen ersten Elektrode und der wenigstens einen zweiten und dritten Elektrode, und
- Frequenz und/oder Amplitude einer Schwingung, insbesondere im Ultraschallbereich, mit welcher zumindest eine der Elektroden beaufschlagt wird,

gesteuert wird. Während die beiden ersten Alternativen aus dem eingangs geschilderten Stand der Technik als solche bekannt sind, kann ferner die erste Elektrode und/oder die zweite bzw. dritte Elektrode (oder weitere Elektroden) mit Schwingungen, vorzugsweise im Ultraschallbereich, beaufschlagt werden, das zu größeren mittleren Partikelgrößen der aus dem jeweiligen Elektrodenmaterial erzeugten Partikel sowie zu einer breiteren Partikelgrößenverteilung führt.

[0022] Bei einer entsprechenden Erodier Vorrichtung kann demnach vorgesehen sein, dass wenigstens einer der ersten, zweiten und dritten Elektroden eine Schwingungserzeugungseinrichtung zugeordnet ist, welche hinsichtlich der

Frequenz und/oder der Amplitude der erzeugten Schwingung steuerbar ist, wobei die Schwingungserzeugungseinrichtung insbesondere wenigstens eine Sonotrode zur Erzeugung von Schwingungen im Ultraschallbereich aufweist.

[0023] Entgegen der Lehre der weiter oben zitierten DE 11 2004 001 663 T5 wird die wenigstens eine erste Elektrode zur Erzeugung von Funkenentladungen zweckmäßigerweise nicht mit der wenigstens einen zweiten und mit der wenigstens einen dritten Elektrode in Kontakt gebracht wird, sondern stets in einem zur Erzeugung der Funkenentladungen geeigneten Abstand gehalten, um für die erfindungsgemäße Verlagerung der Elektroden relativ zueinander zu sorgen und keine allenfalls nur schwer reproduzierbare Kontaktentladungen zu verursachen.

[0024] In vorteilhafter Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens kann ferner vorgesehen sein, dass

- als Dielektrikum ein verflüssigtes Gas oder ein überkritisches Fluid eingesetzt wird und die erzeugten Partikel durch Expandieren des überkritischen Fluides oder des verflüssigten Gases und Überführen desselben in den gasförmigen Zustand von diesem abgetrennt werden; oder
- ein flüssiges Dielektrikum eingesetzt wird und die erzeugten Partikel mechanisch, magnetisch und/oder mittels Trocknung von diesem abgetrennt werden.

Als Dielektrikum kommen folglich einerseits grundsätzlich beliebige bekannte, insbesondere flüssige Dielektrika, wie deionisiertes Wasser, Öl oder dergleichen, in Betracht, wie sie aus dem Stand der Technik herkömmlicher Funkenerodiervorrichtungen bekannt sind, wobei die Abtrennung der erzeugten Partikel aus dem Dielektrikum mittels beliebiger bekannter Trennverfahren geschehen kann, wie unter anderem mittels der aus der DE 11 2004 001 663 T5 bekannten Trennverfahren des Sedimentierens der Partikel in dem Dielektrikum, des Klassierens bzw. Siebens oder Filterns der Partikel aus dem Dielektrikum oder der magnetischen Abscheidung, aber auch z.B. durch Zentrifugieren der erhaltenen Partikel, Verdampfen des Dielektrikums von den Partikeln bzw. Trocknen der Partikel. Gemäß einer vorteilhaften Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens kann jedoch auch vorgesehen sein, dass als Dielektrikum ein verflüssigtes Gas oder ein überkritisches Fluid eingesetzt wird und die erzeugten Partikel durch Expandieren des überkritischen Fluides oder des verflüssigten Gases und Überführen desselben in den gasförmigen Zustand von diesem abgetrennt werden, was eine einfache und schnelle sowie insbesondere rückstandsfreie Abtrennung der Partikel aus dem Dielektrikum ermöglicht. Es sei in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, dass sich die Verwendung eines solchen Dielektrikums in Form überkritischer Fluide oder verflüssigter Gase nicht nur für das erfindungsgemäße Verfahren als vorteilhaft erweisen kann, sondern sich grundsätzlich für beliebige, zur Herstellung von Partikeln eingesetzte Funkenerodiervorrichtungen anbietet einschließlich der aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren mit nur einer ersten und einer zweiten Elektrode, wie es beispielsweise die vorgenannte DE 11 2004 001 663 T5 offenbart.

[0025] Eine entsprechende Erodier Vorrichtung weist demnach vorzugsweise ferner eine Separiereinrichtung zur Gewinnung der anlässlich der Funkenentladungen erzeugten Partikel aus einem sowohl zwischen die wenigstens eine erste Elektrode und die wenigstens eine zweite Elektrode als auch zwischen die wenigstens eine erste Elektrode und die wenigstens eine dritte Elektrode eingebrachten fluiden Dielektrikum auf, um für eine einfache Trennung der erhaltenen Partikel von dem Dielektrikum zu sorgen.

[0026] In bevorzugter Ausgestaltung kann hierbei vorgesehen sein, dass die Separiereinrichtung im Falle eines als vorteilhaft erachteten Dielektrikums in Form überkritischer Fluide oder verflüssigter Gase

- einen Expansionsbehälter aufweist, welcher zur Entspannung eines als Dielektrikum eingesetzten verflüssigten Gases oder eines überkritischen Fluides geeignet ist, um die erzeugten Partikel durch Expandieren des überkritischen Fluides oder des verflüssigten Gases und Überführen desselben in den gasförmigen Zustand von diesem abzutrennen,

wohingegen sie im Falle des Einsatzes herkömmlicher, insbesondere flüssiger, Dielektrika beispielsweise

- eine mechanische Klassiereinrichtung, insbesondere in Form eines Siebs, eines Filters, einer Zentrifuge oder eines Sedimenters;
 - einen Verdampfer oder Trockner; und/oder
 - einen Magnetabscheider
- aufweisen kann. In Bezug auf den zur Entspannung eines als Dielektrikum eingesetzten verflüssigten Gases oder überkritischen Fluides vorzugsweise vorgesehenen Expansionsbehälter gilt das oben in Bezug auf eine Eignung auch für bekannte, zur Herstellung von Partikeln eingesetzte Erodierverfahren gemäß dem Stand der Technik gesagte.

[0027] Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnungen. Dabei zeigen:

- Fig. 1 eine schematische Ansicht einer ersten Ausführungsvariante einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Herstellung von Partikeln mittels Funkenerosion;
- Fig. 2 eine schematische Ansicht einer demgegenüber abgewandelten Ausführungsform der ersten Ausführungsvariante einer erfindungsgemäßen Erodiervorrichtung gemäß Fig. 1;
- Fig. 3 eine schematische Ansicht einer zweiten Ausführungsvariante einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Herstellung von Partikeln mittels Funkenerosion; und
- Fig. 4 ein exemplarisches Schaubild zur Veranschaulichung der Abhängigkeit der Abtragsrate zweier Elektrodenmaterialien - hier: Kupfer (Cu) und Eisen (Fe) - bei der Funkenerosion in Abhängigkeit der Pulsdauer der an die Elektroden angelegten Spannung bei einem konstanten Erodierstrom.

[0028] Die in der Fig. 1 schematisch wiedergegebene Erodiervorrichtung gemäß einer ersten Ausführungsvariante umfasst einerseits eine erste, z.B. - wenngleich nicht notwendigerweise - etwa kreiszylindrische Elektrode 1 aus einem ersten Metallwerkstoff, andererseits ein Elektrodenarray EA, welches aus einer zweiten Elektrode 2 aus einem von dem ersten Metallwerkstoff verschiedenen zweiten Metallwerkstoff und einer dritten Elektrode 3 aus einem sowohl von dem ersten als auch von dem zweiten Metallwerkstoff verschiedenen dritten Metallwerkstoff gebildet ist, welche elektrisch leitfähig miteinander verbunden sind. Die zweite 2 und dritte Elektrode 3 können beispielsweise - wenngleich nicht notwendigerweise - einen etwa rechteckigen oder quadratischen Querschnitt besitzen und an einer ihrer Rechteck- bzw. Quadratseiten aneinander angrenzen. Die Erodiervorrichtung umfasst ferner einen elektrischen Pulsgenerator 6 zur Erzeugung einer gepulsten elektrischen Spannung zwischen einerseits der ersten Elektrode 1, andererseits der zweiten 2 und dritten Elektrode 3 des Elektrodenarrays, wobei sowohl die erste Elektrode 1 als auch das Elektrodenarray EA zu diesem Zweck elektrisch an den Pulsgenerator 6 angeschlossen sind. Darüber hinaus umfasst die Erodiervorrichtung eine nicht im Einzelnen zeichnerisch wiedergegebene Verlagerungseinrichtung, welche im vorliegenden Fall beispielsweise zum Bewegen der ersten Elektrode 1 in Bezug auf das Elektrodenarray EA aus der zweiten 2 und dritte Elektrode 3 ausgebildet ist, während letzteres beim vorliegenden Ausführungsbeispiel stationär angeordnet ist, indem es beispielsweise auf einem Träger fixiert worden ist. Die Verlagerungseinrichtung vermag einerseits, wie es als solches bei herkömmlichen Erodiermaschinen bekannt ist, die erste Elektrode 1 in gesteuerter Weise in Richtung des Pfeils P_1 auf das Elektrodenarray EA der zweiten 2 und dritten Elektrode 3 zu und von diesem fort zu bewegen, um hierzwischen elektrische Funkenentladungen F zu erzeugen. Darüber hinaus vermag die Verlagerungseinrichtung die erste Elektrode 1 in gesteuerter Weise nach Art einer Schwebbewegung in eine hierzu senkrechte Richtung gemäß dem Pfeil P_2 zu verlagern, so dass die erste Elektrode 1 etwa parallel zu der der ihr zugewandten Fläche des Elektrodenarrays EA aus der zweiten 2 und dritten Elektrode 3 bewegt wird. Letztere Verlagerung in Richtung des Pfeils P_2 vollzieht sich dabei zweckmäßigerweise im Wesentlichen senkrecht zu der Grenzlinie, entlang welcher die zweite Elektrode 2 an die dritte Elektrode 3 anstößt. Zur Verlagerung der ersten Elektrode 1 sowohl in Richtung des Pfeils P_1 als auch in Richtung des Pfeils P_2 dient beispielsweise eine programmtechnisch eingerichtete Steuereinrichtung (nicht dargestellt).

[0029] Der elektrische Pulsgenerator 6 ist hinsichtlich der Pulsdauer der elektrischen Spannung, der Polarität der elektrischen Spannung und der elektrischen Stromstärke des Erodierstromes steuerbar, was gleichfalls zweckmäßigerweise mittels der Steuereinrichtung geschieht. Darüber hinaus können der ersten Elektrode 1 und/oder dem Elektrodenarray EA aus der zweiten 2 und dritten Elektrode 3 Schwingungserzeugungseinrichtungen (nicht gezeigt), wie beispielsweise Sonotroden zur Erzeugung von Ultraschallschwingungen, zugeordnet sein, um die jeweilige(n) Elektrode(n) 1, 2, 3 gesteuert in Schwingungen zu versetzen, deren Frequenz und/oder Amplitude vorzugsweise veränderbar ist.

[0030] Zumindest der zwischen der ersten Elektrode 1 und dem Elektrodenarray EA aus der zweiten 2 und dritten Elektrode 3 gebildete Zwischenraum ist mit einem fluiden Dielektrikum befüllt, bei welchem es sich z.B. um bekannte flüssige Dielektrika, wie deionisiertes Wasser, Öl oder dergleichen oder insbesondere auch um verflüssigte Gase oder überkritische Fluide handeln kann, welche zweckmäßigerweise chemisch inert sind, wie beispielsweise Kohlendioxid, Stickstoff, Argon oder dergleichen. Eine nicht zeichnerisch dargestellte Separiereinrichtung dient zur Gewinnung der durch die anlässlich der Funkenentladungen F zwischen der ersten 1 und der zweiten Elektrode 2 und/oder zwischen der ersten 1 und der dritten Elektrode 3 erzeugten Partikel 7, indem letztere aus dem Dielektrikum abgetrennt werden können. Besteht letzteres aus einer Flüssigkeit, so kann die Separiereinrichtung beispielsweise ein Sieb oder Filter, eine Zentrifuge, ein Absetzgefäß oder einen Magneten umfassen. Besteht das Dielektrikum aus einem flüssigen Gas oder aus einem überkritischen Fluid, so umfasst die Separiereinrichtung zweckmäßigerweise einen Expansionsbehälter, welcher zur Entspannung des Dielektrikums dient, um dieses in die Gasphase zu überführen und auf diese Weise die erzeugten Partikel einfach und schnell abzutrennen.

[0031] Die in der Fig. 2 gezeigte Ausführungsform der ersten Ausführungsvariante einer erfindungsgemäßen Erodiervorrichtung, bei der identische und wirkungsgleiche Komponenten mit denselben Bezugszeichen versehen sind, unterscheidet sich von jener gemäß Fig. 1 dadurch, dass das Elektrodenarray EA mehr als zwei zweite bzw. dritte Elektroden

2, 3 umfasst, wobei es im vorliegenden Fall eine zweite 2, eine dritte 3, eine vierte 4 und eine fünfte Elektrode 5 aufweist, welche jeweils aus verschiedenen Metallwerkstoffen gefertigt sind. Die Elektroden 2, 3, 4, 5 besitzen jeweils beispielsweise eine der Fig. 1 etwa entsprechende Form und grenzen an einem zentralen Punkt Z aneinander an. Um die erste Elektrode 1 etwa parallel zu der ihr zugewandten Fläche des Elektrodenarrays EA der zweiten 2, dritten 3, vierten 4 und fünften Elektrode 5 zu bewegen, ist die erste Elektrode entlang einer sich parallel zu dieser Fläche erstreckenden Ebene verlagerbar, und zwar sowohl in Richtung des Pfeils P_2 als auch in Richtung des Pfeils P_3 . Die Verlagerungsrichtungen gemäß den Pfeilen P_2 und P_3 erstrecken sich dabei vorzugsweise jeweils senkrecht zu den Grenzlinien, entlang welchen einerseits die zweite Elektrode 2 an die vierte Elektrode 4 und die dritte Elektrode 3 an die fünfte Elektrode 5 anstößt und entlang welchen andererseits die zweite Elektrode 2 an die dritte Elektrode 3 und die vierte Elektrode 4 an die fünfte Elektrode 5 anstößt.

[0032] Infolge der herkömmlichen Verlagerung der ersten Elektrode 1 auf das Elektrodenarray EA zu bzw. von diesem fort in Richtung des Pfeils P_2 sowie insbesondere entlang derselben in Richtung des Pfeils P_2 (Fig. 1) und gegebenenfalls des Pfeils P_3 (Fig. 2) lässt sich die Zusammensetzung der erhaltenen Partikel bei der Funkenerosion in einfacher Weise steuern, wobei jeweilige Partikel einerseits aus dem Metallwerkstoff der ersten Elektrode 1, andererseits aus dem Metallwerkstoff der jeweiligen zweiten 2 und dritten Elektrode 3 (Fig. 1) sowie gegebenenfalls der vierten 4 und fünften Elektrode 5 (Fig. 2) erzeugt werden können, je nach dem, an welcher Position sich die erste Elektrode 1 in Bezug auf das Elektrodenarray EA gerade befindet bzw. zwischen welcher oder welchen Elektroden des Elektrodenarrays EA die Funkenerosion gegenüber der ersten Elektrode 1 stattfindet. Darüber hinaus ist es durch fortwährendes Bewegen der ersten Elektrode 1 in Richtung des Pfeils P_2 (Fig. 1) und gegebenenfalls in Richtung des Pfeils P_3 (Fig. 2) möglich, zeitlich veränderliche Zusammensetzungen von Partikeln zu erzeugen, welche z.B. in einem Folgeprozess, wie beispielsweise Laserauftragsschweißen oder dergleichen, zum Aufbau eines Gradientenwerkstoffes genutzt werden können.

[0033] Die weiteren, vorzugsweise steuerbaren Verfahrensparameter der Funkenerosion sind einschließlich ihrer Wirkungen im Übrigen nochmals in der nachfolgenden Tabelle stichpunktartig zusammengefasst:

Tabelle 1: Zielgröße (Spalte 1), Verfahrensparameter (Spalte 2) und Wirkung (Spalte 3) zur Steuerung eines Verfahrens zur Herstellung von Partikeln mittels Funkenerosion.

Legierungszusammensetzung der erzeugten Partikel	- Elektrodenmaterialien - Anteil überfahrene Fläche des Legierungsmetalls der jeweiligen Elektrode - Pulsdauer - Polarität	Mögliche Partikelbestandteile Der Anteil eines Legierungsmetalls steigt proportional mit dem Anteil der während des Prozesses überfahrenen Fläche Polarität und Pulsdauer führen zu jeweils unterschiedlichen Abtragsraten an Anode und Kathode (vgl. auch Fig. 4)
Mittlere Partikelgröße	- Erodierstrom - Pulsdauer - Ultraschallbewegung	Höhere Erodierströme, längere Pulsdauern und eine dem Prozess überlagerte Ultraschallbewegung führen jeweils zu größeren mittleren Partikelgrößen
Partikelgrößenverteilung	- Ultraschall - überlagerte Bewegung (z. B. Rotation)	Dem Prozess überlagerte (Ultraschall-) Bewegungen führen zu einer breiteren Partikelgrößenverteilung

[0034] Bei der in der Fig. 3 schematisch wiedergegebenen zweiten Ausführungsvariante einer erfindungsgemäßen Erodiervorrichtung zur Herstellung von Partikeln mittels Funkenerosion sind identische und wirkungsgleiche Komponenten mit denselben Bezugszeichen versehen. Die in der Fig. 3 gezeigte Erodiervorrichtung umfasst dabei einerseits zwei, z.B. - wenngleich nicht notwendigerweise - etwa kreiszylindrische erste Elektroden 1a, 1b aus einem ersten Metallwerkstoff, andererseits eine zweite Elektrode 2 aus einem von dem ersten Metallwerkstoff verschiedenen zweiten Metallwerkstoff und eine dritte Elektrode 3 aus einem sowohl von dem ersten als auch von dem zweiten Metallwerkstoff verschiedenen dritten Metallwerkstoff, welche jeweils einer ersten Elektrode 1a bzw. 1b zugeordnet sind. Die zweite 2 und dritte Elektrode 3 können wiederum beispielsweise einen etwa rechteckigen oder quadratischen Querschnitt besitzen, aber auch eine beliebige andersartige Form aufweisen. Die ersten Elektroden 1a, 1b sind in mechanischer Weise starr miteinander verbunden, wie dies mit dem Bezugszeichen 8 angedeutet ist, aber elektrisch voneinander isoliert. Die Erodiervorrichtung umfasst ferner je einen elektrischen Pulsgenerator 6a, 6b zur Erzeugung einer gepulsten elektrischen Spannung einerseits zwischen der ersten Elektrode 1a und der zweiten Elektrode 2, andererseits zwischen der ersten Elektrode 1b und der dritten Elektrode 3. Zu diesem Zweck sind zum Einen sowohl die erste Elektrode 1a als auch die zweite Elektrode 2 an den Pulsgenerator 6a angeschlossen, während zum Anderen sowohl die erste

Elektrode 1b als auch die dritte Elektrode 3 an den Pulsgenerator 6b angeschlossen sind. Darüber hinaus umfasst die Erodiervorrichtung eine nicht im Einzelnen zeichnerisch wiedergegebene Verlagerungseinrichtung, welche im vorliegenden Fall beispielsweise zum gemeinsamen Bewegen der ersten Elektroden 1a, 1b in Bezug auf die zweite 2 bzw. dritte Elektrode 3 ausgebildet ist, während letztere beim vorliegenden Ausführungsbeispiel stationär angeordnet sind, indem sie beispielsweise auf einem Träger fixiert worden sind. Die Verlagerungseinrichtung vermag dabei, wie es als solches bei herkömmlichen Erodiermaschinen bekannt ist, die ersten Elektroden 1a, 1b in gesteuerter Weise gemeinsam in Richtung des Pfeils P_1 auf die zweite 2 bzw. dritte Elektrode 3 zu und von diesen fort zu bewegen, um einerseits zwischen der ersten Elektrode 1a und der zweiten Elektrode 2, andererseits zwischen der ersten Elektrode 1b und der dritten Elektrode 3 elektrische Funkenentladungen F zu erzeugen. Zu dieser gemeinsamen Verlagerung der beiden ersten Elektroden 1a, ab in Richtung des Pfeils P_1 dient beispielsweise eine programmtechnisch eingerichtete Steuerungseinrichtung (nicht dargestellt).

[0035] Beide elektrischen Pulsgeneratoren 6a, 6b sind hinsichtlich der Pulsdauer der elektrischen Spannung, der Polarität der elektrischen Spannung und der elektrischen Stromstärke des Erodierstromes steuerbar, was gleichfalls zweckmäßigerweise mittels der Steuereinrichtung geschieht. Darüber hinaus können den ersten Elektroden 1a, 1b und/oder der zweiten 2 und/oder dritten Elektrode 3 wiederum Schwingungserzeugungseinrichtungen (nicht gezeigt), wie beispielsweise Sonotroden zur Erzeugung von Ultraschallschwingungen, zugeordnet sein, um die jeweilige(n) Elektrode(n) 1a, 1b, 2, 3 gesteuert in Schwingungen zu versetzen, deren Frequenz und/oder Amplitude vorzugsweise veränderbar ist.

[0036] Zumindest der zwischen den ersten Elektroden 1a, 1b und der zweiten 2 bzw. dritten Elektrode 3 gebildete Zwischenraum ist wiederum mit einem fluiden Dielektrikum befüllt, bei welchem es sich z.B. um bekannte flüssige Dielektrika, wie deionisiertes Wasser, Öl oder dergleichen oder insbesondere auch um verflüssigte Gase oder überkritische Fluide handeln kann, wie vorzugsweise um solche der oben unter Bezugnahme auf die Fig. 1 exemplarisch genannten Art. Eine nicht zeichnerisch dargestellte Separiereinrichtung dient in entsprechender Weise wie bei der Erodiervorrichtung gemäß Fig. 1 und 2 zur Gewinnung der durch die anlässlich der Funkenentladungen F zwischen der jeweiligen ersten Elektrode 1a bzw. 1b und der zweiten Elektrode 2 bzw. der dritten Elektrode 3 erzeugten Partikel 7, indem letztere aus dem Dielektrikum abgetrennt werden können. In Bezug auf mögliche Ausgestaltungen der Separiereinrichtungen gilt das oben unter Bezugnahme auf die Fig. 1 gesagte.

[0037] Infolge der gemeinsamen Verlagerung der beiden ersten Elektroden 1a, 1b auf die zweite 2 bzw. dritte Elektrode 3 zu bzw. von diesen fort in Richtung des Pfeils P_1 sowie der Steuerung der Pulsgeneratoren 6a, 6b hinsichtlich der vorgenannten Verfahrensparameter unabhängig voneinander lässt sich die Zusammensetzung der erhaltenen Partikel bei der Funkenerosion in einfacher Weise steuern, wobei jeweils Partikel einerseits aus dem Metallwerkstoff der ersten Elektroden 1a, 1b, andererseits aus dem Metallwerkstoff der zweiten 2 und/oder dritten Elektrode 3 erzeugt werden können (bis hin zu einem Anteil an Partikeln aus dem Material der zweiten Elektrode 2 bzw. der dritten Elektrode 3 von praktisch null, sofern der jeweilige Pulsgenerator 6a, 6b innerhalb eines Parameterintervalls betrieben wird, bei welchem der Metallwerkstoff des jeweiligen Elektrodenmaterials keinen Abtrag erfährt), je nach dem, unter welchem Abstand die ersten Elektroden 1a, 1b von der zweiten 2 bzw. dritten Elektrode 3 angeordnet sind und welche Verfahrensparameter an dem jeweiligen Pulsgenerator 6a, 6b eingestellt worden sind. Darüber hinaus ist es durch fortwährendes Bewegen der ersten Elektroden 1a, 1b in Richtung des Pfeils P_1 und/oder fortwährendes Verändern der Verfahrensparameter zumindest eines der Pulsgeneratoren 6a, 6b möglich, zeitlich veränderliche Zusammensetzungen von Partikeln zu erzeugen, welche z.B. in einem Folgeprozess, wie beispielsweise Laserauftragsschweißen oder dergleichen, zum Aufbau eines Gradientenwerkstoffes genutzt werden können.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung von Partikeln (7) mittels Funkenerosion, umfassend die folgenden Schritte:

- Bereitstellen wenigstens einer ersten Elektrode (1; 1a, 1b), welche wenigstens ein erstes Metall enthält;
- Bereitstellen wenigstens einer zweiten Elektrode (2), welche wenigstens ein zweites Metall enthält;
- Anordnen der wenigstens ersten Elektrode (1; 1a, 1b) und der wenigstens einen zweiten Elektrode (2) in einem fluiden Dielektrikum;
- Anlegen einer gepulsten elektrischen Spannung zwischen die wenigstens eine erste Elektrode (1; 1a, 1b) und die wenigstens eine zweite Elektrode (2);
- Bewegen der wenigstens einen ersten Elektrode (1; 1a, 1b) und der wenigstens einen zweiten Elektrode (2) aufeinander zu und Erzeugen von elektrischen Funkenentladungen (F) zwischen denselben; und
- Gewinnen der anlässlich der Funkenentladungen (F) erzeugten Partikel (7) aus den Materialien der ersten Elektrode (1; 1a, 1b) und der zweiten Elektrode (2), **gekennzeichnet durch** die folgenden Schritte:
- Bereitstellen wenigstens einer dritten Elektrode (3, 4, 5), welche wenigstens ein drittes Metall enthält;

- Anordnen der dritten Elektrode (3, 4, 5) in dem Dielektrikum;
- Anlegen einer gepulsten elektrischen Spannung zwischen die wenigstens eine erste Elektrode (1; 1a, 1b) und die wenigstens eine dritte Elektrode (3, 4, 5);
- Bewegen der wenigstens einen ersten Elektrode (1; 1a, 1b) und der wenigstens einen dritten Elektrode (3, 4, 5) aufeinander zu und Erzeugen von elektrischen Funkenentladungen (F) zwischen denselben; und
- Gewinnen der anlässlich der Funkenentladungen (F) erzeugten Partikel (7) aus den Materialien der ersten Elektrode (1; 1a, 1b) und der dritten Elektrode (3, 4, 5),

wobei der Anteil der aus dem Material der wenigstens einen ersten Elektrode (1; 1a, 1b), der wenigstens einen zweiten Elektrode (2) und der wenigstens einen dritten Elektrode (3, 4, 5) erzeugten Partikel (7) durch Verlagern der wenigstens einen ersten Elektrode (1; 1a, 1b) in Bezug auf die wenigstens eine zweite Elektrode (2) sowie in Bezug auf die wenigstens eine dritte Elektrode (3, 4, 5) gesteuert wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Anteil der aus dem Material der wenigstens einen ersten Elektrode (1; 1a, 1b), der wenigstens einen zweiten Elektrode (2) und der wenigstens einen dritten Elektrode (3, 4, 5) erzeugten Partikel ferner durch Verändern wenigstens eines Parameters aus der Gruppe

- Pulsdauer der elektrischen Spannung zwischen der wenigstens einen ersten Elektrode (1; 1a, 1b) und der wenigstens einen zweiten (2) und dritten Elektrode (3, 4, 5),
- Polarität der elektrischen Spannung zwischen der wenigstens einen ersten Elektrode (1; 1a, 1b) und der wenigstens einen zweiten (2) und dritten Elektrode (3, 4, 5), und
- elektrische Stromstärke des Erodierstromes zwischen der wenigstens einen ersten Elektrode (1; 1a, 1b) und der wenigstens einen zweiten (2) und dritten Elektrode (3, 4, 5) gesteuert wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die wenigstens eine zweite Elektrode (2) und die wenigstens eine dritte Elektrode (3, 4, 5) zu einem Elektrodenarray (EA) elektrisch leitfähig miteinander verbunden werden und die gepulste elektrische Spannung zwischen die wenigstens eine erste Elektrode (1) und das Elektrodenarray (EA) aus der wenigstens einen zweiten Elektrode (2) und der wenigstens einen dritten Elektrode (3, 4, 5) angelegt wird, wobei der Anteil der aus dem Material der wenigstens einen ersten Elektrode (1), der wenigstens einen zweiten Elektrode (2) und der wenigstens einen dritten Elektrode (3, 4, 5) erzeugten Partikel (7) durch Verlagern der wenigstens einen ersten Elektrode (1) im Wesentlichen parallel zu der der wenigstens einen ersten Elektrode (1) zugewandten Fläche des Elektrodenarrays (EA) aus der wenigstens einen zweiten Elektrode (2) und der wenigstens einen dritten Elektrode (3, 4, 5) gesteuert wird.

4. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** der wenigstens einen zweiten Elektrode (2) und der wenigstens einen dritten Elektrode (3) jeweils eine erste Elektrode (1a, 1b) zugeordnet und einerseits zwischen einer (1a) der ersten Elektroden (1a, 1b) und der wenigstens einen zweiten Elektrode (2), andererseits zwischen einer weiteren (1b) der ersten Elektroden (1a, 1b) und der wenigstens einen dritten Elektrode (3) jeweils eine gepulste elektrische Spannung angelegt wird, wobei die ersten Elektroden (1a, 1b) gemeinsam auf die jeweilige, ihr zugeordnete, wenigstens eine zweite (2) und wenigstens eine dritte Elektrode (3) zu bewegt werden, um elektrische Funkenentladungen (F) zu erzeugen, und wobei der Anteil der aus dem Material der wenigstens einen ersten Elektrode (1a, 1b), der wenigstens einen zweiten Elektrode (2) und der wenigstens einen dritten Elektrode (3) erzeugten Partikel (P) einerseits

- durch gemeinsames Verlagern der ersten Elektroden (1a, 1b) auf die jeweilige, ihr zugeordnete, wenigstens eine zweite (2) und dritte Elektrode (3) zu bzw. von dieser fort, andererseits
- durch Verändern der Pulsdauer und/oder der Polarität der elektrischen Spannung und/oder der Stromstärke des Erodierstromes zwischen jeweils einer ersten Elektrode (1a, 1b) und der ihr zugeordneten zweiten (2) und dritten Elektrode (3) unabhängig voneinander gesteuert wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Partikelgröße der erzeugten Partikel (7) aus dem Material der wenigstens einen ersten Elektrode (1; 1a, 1b) sowie der wenigstens einen zweiten Elektrode (2) und der wenigstens einen dritten Elektrode (3, 4, 5) durch Verändern wenigstens eines Parameters aus der Gruppe

- Pulsdauer der elektrischen Spannung zwischen der wenigstens einen ersten Elektrode (1; 1a, 1b) und der

wenigstens einen zweiten (2) und dritten Elektrode (3, 4, 5),

- elektrische Stromstärke des Erodierstromes zwischen der wenigstens einen ersten Elektrode (1; 1a, 1b) und der wenigstens einen zweiten (2) und dritten Elektrode (3, 4, 5), und

- Frequenz und/oder Amplitude einer Schwingung, insbesondere im Ultraschallbereich, mit welcher zumindest eine der Elektroden (1; 1a, 1b; 2; 3, 4, 5) beaufschlagt wird, gesteuert wird.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die wenigstens eine erste Elektrode (1; 1a, 1b) zur Erzeugung von Funkenentladungen (F) nicht mit der wenigstens einen zweiten (2) und mit der wenigstens einen dritten Elektrode (3, 4, 5) in Kontakt gebracht wird.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet, dass**

- als Dielektrikum ein verflüssigtes Gas oder ein überkritisches Fluid eingesetzt wird und die erzeugten Partikel (7) durch Expandieren des überkritischen Fluides oder des verflüssigten Gases und Überführen desselben in den gasförmigen Zustand von diesem abgetrennt werden; oder

- ein flüssiges Dielektrikum eingesetzt wird und die erzeugten Partikel mechanisch, magnetisch und/oder mittels Trocknung von diesem abgetrennt werden.

8. Erodiervorrichtung zur Herstellung von Partikeln (7) mittels Funkenerosion, insbesondere zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der vorangehenden Ansprüche, umfassend:

- wenigstens eine erste Elektrode (1; 1a, 1b), welche wenigstens ein erstes Metall enthält;

- wenigstens eine zweite Elektrode (2), welche wenigstens ein zweites Metall enthält;

- wenigstens einen elektrischen Pulsgenerator (6) zur Erzeugung einer gepulsten elektrischen Spannung, an welchen die wenigstens eine erste Elektrode (1; 1a, 1b) und die wenigstens eine zweite Elektrode (2) anschließbar sind; und

- eine Verlagerungseinrichtung zum Bewegen der wenigstens einen ersten Elektrode (1; 1a, 1b) und der wenigstens einen zweiten Elektrode (2) aufeinander zu, um zwischen der wenigstens einen ersten Elektrode (1; 1a, 1b) und der wenigstens einen zweiten Elektrode (2) elektrische Funkenentladungen (F) zu erzeugen, **dadurch gekennzeichnet, dass**

- die Erodiervorrichtung wenigstens eine dritte Elektrode (3, 4, 5) umfasst, welche wenigstens ein drittes Metall enthält;

- die wenigstens eine dritte Elektrode (3, 4, 5) an wenigstens einen elektrischen Pulsgenerator (6; 6a, 6b) zur Erzeugung einer gepulsten elektrischen Spannung zwischen der wenigstens einen ersten Elektrode (1; 1a, 1b) und der wenigstens einen dritten Elektrode (3, 4, 5) anschließbar ist; und

- die Verlagerungseinrichtung ferner zum Bewegen der wenigstens einen ersten Elektrode (1; 1a, 1b) und der wenigstens einen dritten Elektrode (3, 4, 5) aufeinander zu ausgebildet ist, um zwischen der wenigstens einen ersten Elektrode (1; 1a, 1b) und der wenigstens einen dritten Elektrode (3, 4, 5) elektrische Funkenentladungen (F) zu erzeugen,

wobei die Verlagerungseinrichtung bezüglich einer Verlagerung der wenigstens einen ersten Elektrode (1; 1a, 1b) in Bezug auf die wenigstens eine zweite Elektrode (2) sowie in Bezug auf die wenigstens eine dritte Elektrode (3, 4, 5) steuerbar ist.

9. Erodiervorrichtung nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** der wenigstens eine elektrische Pulsgenerator (6; 6a, 6b) ferner hinsichtlich

- der Pulsdauer der elektrischen Spannung, und/oder

- der Polarität der elektrischen Spannung, und/oder

- der elektrische Stromstärke des Erodierstromes steuerbar ist.

10. Erodiervorrichtung nach Anspruch 8 oder 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** die wenigstens eine zweite Elektrode (2) und die wenigstens eine dritte Elektrode (3, 4, 5) zu einem Elektrodenarray (EA) elektrisch leitfähig miteinander verbunden sind und der elektrische Pulsgenerator (6) einerseits an die wenigstens eine erste Elektrode (1), andererseits an das Elektrodenarray (EA) aus der wenigstens einen zweiten Elektrode (2) und der wenigstens einen dritten Elektrode (3, 4, 5) anschließbar ist, wobei die Verlagerungseinrichtung zum Bewegen der wenigstens einen ersten Elektrode (1) im Wesentlichen parallel zu der der wenigstens einen ersten Elektrode (1) zugewandten Fläche

des Elektrodenarrays (EA) aus der wenigstens einen zweiten Elektrode (2) und der wenigstens einen dritten Elektrode (3, 4, 5) ausgebildet ist.

- 5 11. Erodiervorrichtung nach Anspruch 8 oder 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** der wenigstens einen zweiten Elektrode (2) und der wenigstens einen dritten Elektrode (3) jeweils eine erste Elektrode (1a, 1b) zugeordnet ist und einerseits eine (1a) der ersten Elektroden (1a, 1b) und die wenigstens eine zweite Elektrode (2), andererseits eine weitere (1b) der ersten Elektroden (1a, 1b) und die wenigstens eine dritte Elektrode (3) jeweils an einen separaten elektrischen Pulsgenerator (6a, 6b) anschließbar sind, wobei die Verlagerungseinrichtung zum gemeinsamen Bewegen der ersten Elektroden (1a, 1b) auf die jeweilige, ihr zugeordnete, wenigstens eine zweite (2) und wenigstens eine dritte Elektrode (3) zu und von dieser fort ausgebildet ist, um elektrische Funkenentladungen (F) zu erzeugen, und wobei jeder Pulsgenerator (6a, 6b) ferner hinsichtlich der Pulsdauer und/oder der Polarität der elektrischen Spannung und/oder der Stromstärke des Erodierstromes unabhängig voneinander steuerbar ist.
- 10 12. Erodiervorrichtung nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** die wenigstens eine zweite Elektrode (2) und die wenigstens eine dritte Elektrode (3), insbesondere mechanisch, starr miteinander verbunden, aber elektrisch voneinander isoliert sind.
13. Erodiervorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** wenigstens einer der ersten (1; 1a, 1b), zweiten (2) und dritten Elektroden (3, 4, 5) eine Schwingungserzeugungseinrichtung zugeordnet ist, welche hinsichtlich der Frequenz und/oder der Amplitude der erzeugten Schwingung steuerbar ist, wobei die Schwingungserzeugungseinrichtung insbesondere wenigstens eine Sonotrode zur Erzeugung von Schwingungen im Ultraschallbereich aufweist.
- 20 14. Erodiervorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie ferner eine Separiereinrichtung zur Gewinnung der anlässlich der Funkenentladungen (F) erzeugten Partikel (7) aus einem sowohl zwischen die wenigstens eine erste Elektrode (1; 1a, 1b) und die wenigstens eine zweite Elektrode (2) als auch zwischen die wenigstens eine erste Elektrode (1; 1a, 1b) und die wenigstens eine dritte Elektrode (3, 4, 5) eingebrachten fluiden Dielektrikum aufweist.
- 25 15. Erodiervorrichtung nach Anspruch 14, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Separiereinrichtung
 - einen Expansionsbehälter, welcher zur Entspannung eines als Dielektrikum eingesetzten verflüssigten Gases oder eines überkritischen Fluides geeignet ist, um die erzeugten Partikel (7) durch Expandieren des überkritischen Fluides oder des verflüssigten Gases und Überführen desselben in den gasförmigen Zustand von diesem abzutrennen;
 - 35 - eine mechanische Klassiereinrichtung, insbesondere in Form eines Siebs, eines Filters, einer Zentrifuge oder eines Sedimenters;
 - einen Verdampfer oder Trockner; und/oder
 - einen Magnetabscheider
 - 40 aufweist.

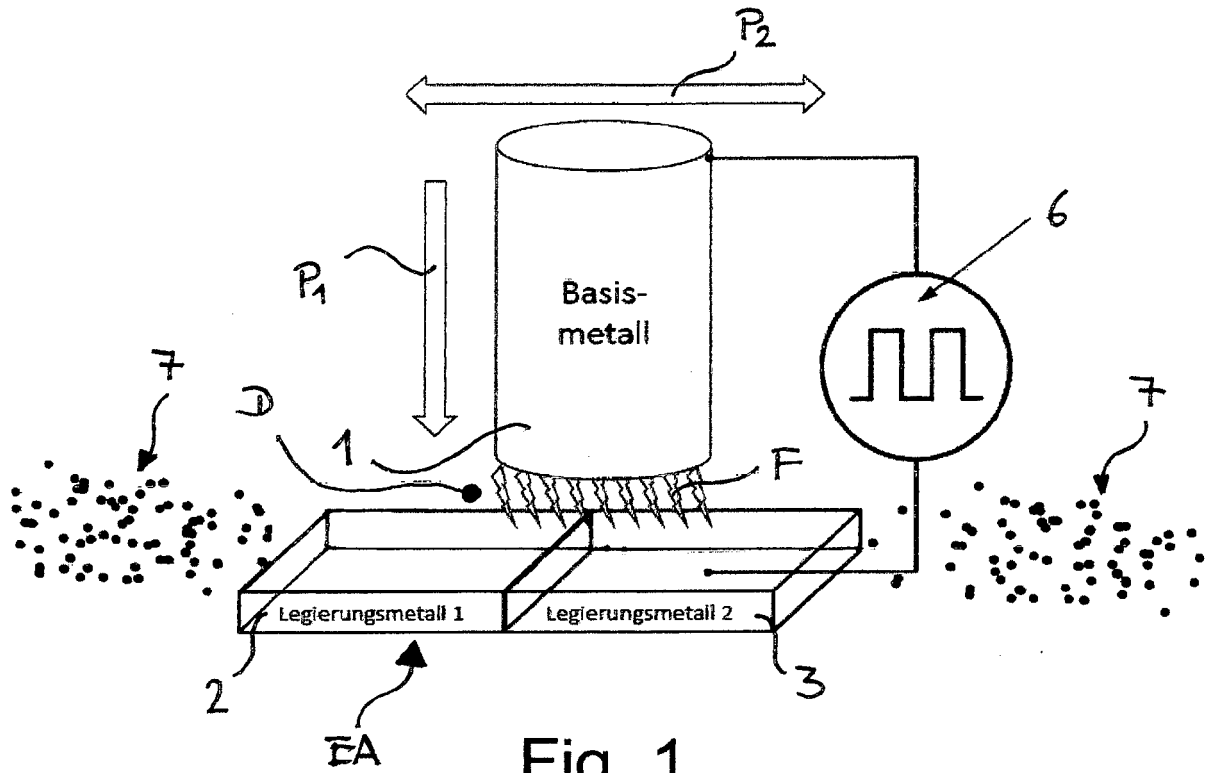


Fig. 1

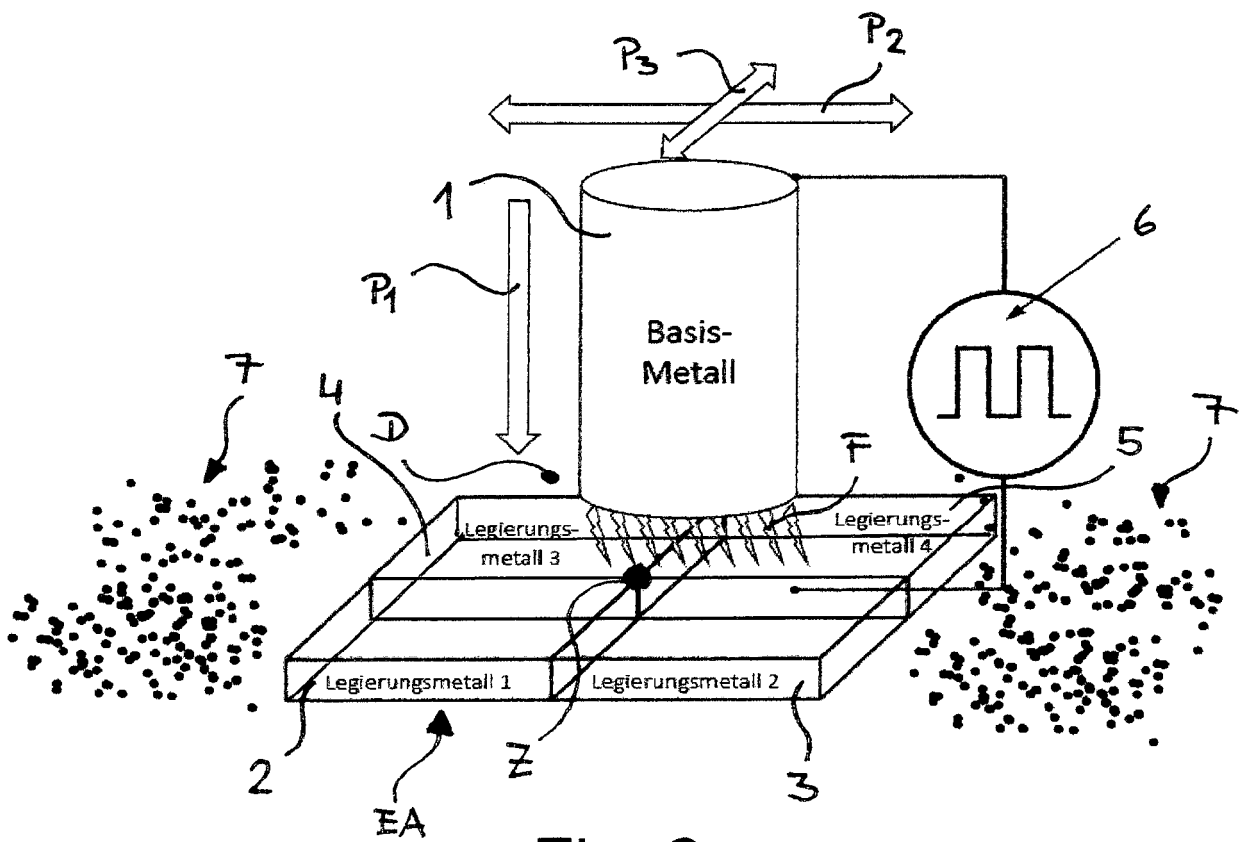


Fig. 2

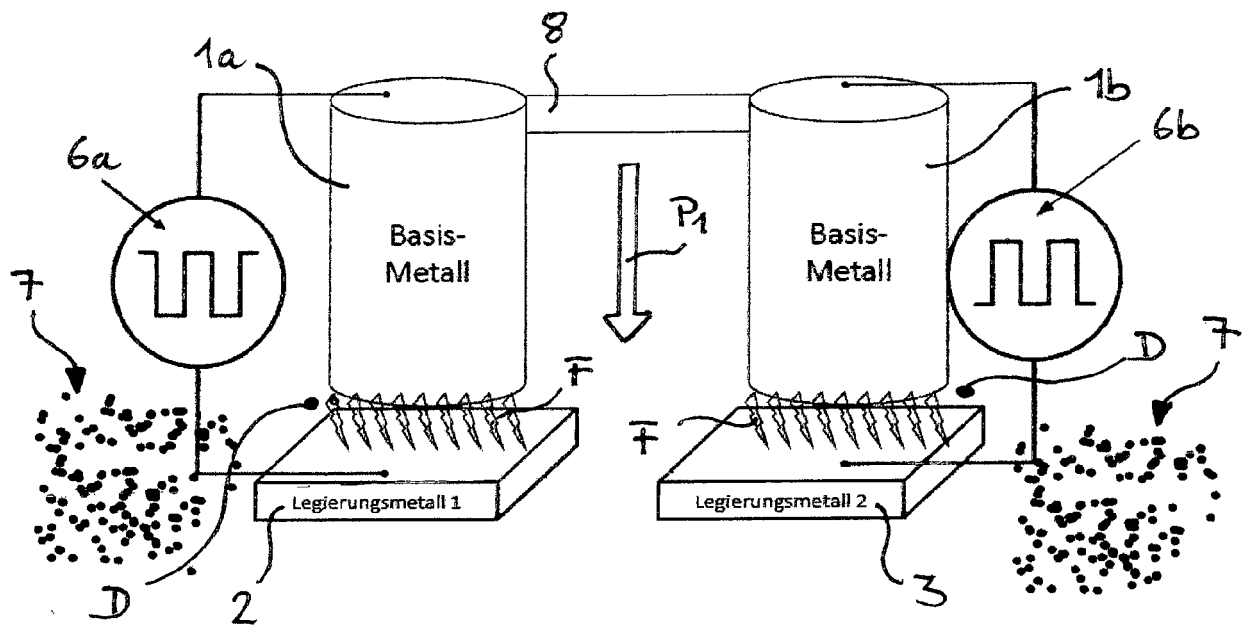


Fig. 3

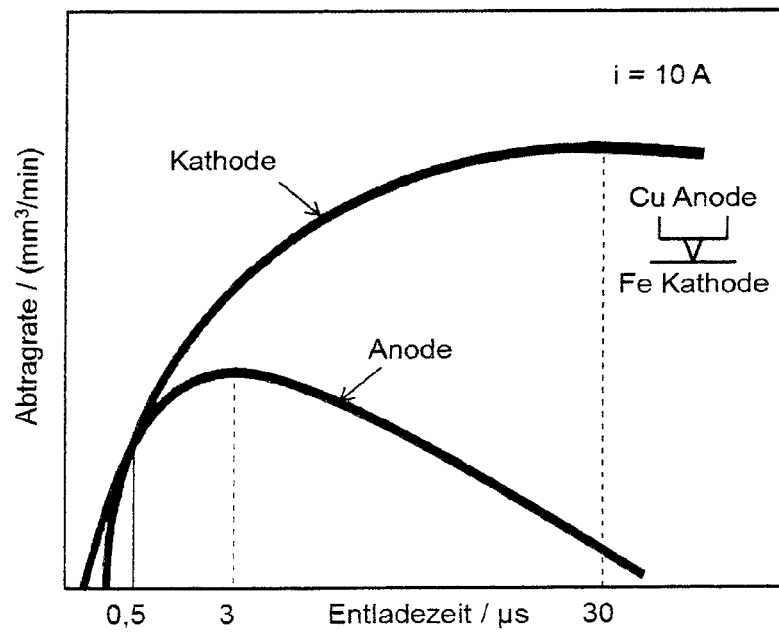


Fig. 4

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

- DE 112004001663 T5 [0007] [0023] [0024]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **A. M. MATZ ; D. KAMMERER ; N. JOST ; K. OßWALD.** Machining of metal foams with varying mesostructure using Wire EDM. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 42, 263-267 [0004]
- **V. S. R. MURTI ; P. K. PHILIP.** An analysis of the debris in ultrasonic-assisted electrical discharge machining. *Wear*, 1987, vol. 117 (2), 241-250 [0004]
- **J. S. SONI.** Microanalysis of debris formed during rotary EDM of titanium alloy (Ti 6Al 4V) and die steel (T 215 Cr12). *Wear*, 1989, vol. 177 (1), 71-79 [0004]
- **J. S. SONI.** Performance evaluation of rotary EMD by experimental design technique. *Defence Science Journal*, 1997, vol. 47 (1), 65-73 [0004]
- **D.D. DIBITONTO ; P. T. EUBANK ; M. R. PATEL ; M. A. BARRUFET.** Theoretical models of the electrical discharge machining process. I. A simple cathode erosion model. *Journal of Applied Physics*, 1989, vol. 66 (9), 4095-4103 [0004]