



(10) **DE 10 2008 061 573 B4** 2016.03.31

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2008 061 573.0**
(22) Anmeldetag: **11.12.2008**
(43) Offenlegungstag: **05.08.2010**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **31.03.2016**

(51) Int Cl.: **F01D 5/28 (2006.01)**
F01D 5/00 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
Siemens Aktiengesellschaft, 80333 München, DE

(72) Erfinder:
Behnisch, Thomas, 01309 Dresden, DE; Berndt, Anett, 91058 Erlangen, DE; Ebert, Christoph, 01139 Dresden, DE; Füßel, René, 01099 Dresden, DE; Hufenbach, Werner, Prof., 01324 Dresden,

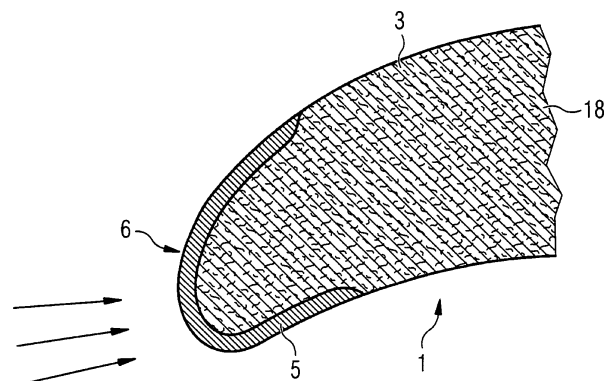
DE; Kapitza, Heinrich, Dr., 90765 Fürth, DE; Langkamp, Albert, Dr., 01324 Dresden, DE; Mantei, Markus, 01896 Pulsnitz, DE; Zeininger, Heinrich, Dr., 90587 Obermichelbach, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:

US	66 07 358	B2
EP	16 45 538	A1
EP	1 788 197	A1

(54) Bezeichnung: **Turbinenschaufel mit Beschichtung**

(57) Hauptanspruch: Turbinenschaufel (1) die zur Verwendung in einer Niederdruckstufe der Dampfturbine gestaltet ist und zumindest bereichsweise Faserverbundwerkstoff enthält, wobei zumindest der den Faserverbundwerkstoff enthaltende Bereich (4) mit einer Schutzschicht (5) beschichtet ist, wobei die Schutzschicht (5) aus einem Material besteht, dessen Schlagzugzähigkeit größer ist als die Schlagzugzähigkeit des Faserverbundwerkstoff und wobei die Schutzschicht (5) Nanopartikel (7) enthält und wobei die Nanopartikel (7) in der Schutzschicht (5) ungleichmäßig verteilt sind und der Nanopartikelanteil in der Beschichtung mit zunehmendem Abstand von der Beschichtungsoberfläche kontinuierlich abnimmt.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Turbinenschaufel mit einem Fußabschnitt sowie einem Schaufelblattabschnitt, die zur Verwendung in einer Niederdruckstufe einer Dampfturbine gestaltet ist und zumindest bereichsweise Faserverbundwerkstoffe enthält, wobei zumindest der dem Faserverbundwerkstoff enthaltene Bereich mit einer Schutzschicht beschichtet ist.

[0002] Um einen möglichst hohen Wirkungsgrad bei der Dampfturbine zu erzielen, muss der Dampf möglichst weit entspannt werden. Hierzu sind insbesondere bei den Endstufenlaufschaukeln hohe Durchströmflächen notwendig. Durch die hierdurch erforderlichen großen Turbinenschaufeln werden große Umfangsgeschwindigkeiten an den Turbinenschaufeln erreicht. Die hohen Umfangsgeschwindigkeiten führen zum Einen zu hohen Fliehkraften und damit hohen Spannungen, zum Anderen kommt es aufgrund von Tropfenschlägen auf der Turbinenschaufel in Verbindung mit den hohen Umfangsgeschwindigkeiten zu Tropfenschlagerosionsbeanspruchungen. Dies führt zu hohem Verschleiß und nicht selten zur vollständigen Zerstörung der Turbinenschaufel. Um die Fliehkraftbeanspruchungen zu reduzieren ist es bekannt, anstelle von hochfesten Stählen Titanschaufeln zu verwenden. Durch das geringere Gewicht der Titanschaufel wird die Fliehkraftspannung reduziert. Um die Tropfenschlagerosion zu verringern werden zurzeit die nachstehenden Maßnahmen eingesetzt: Stufenentwässerung an der Turbinengehäusewand, Härtung der Eintrittskanten der Laufschaufel, Ausführung von Absaugschlitzen in Hohlleitschaufeln und deren Beheizung. Alle diese Maßnahmen sind jedoch sehr aufwendig und mit zum Teil erheblichen Kosten verbunden.

[0003] Aufgrund ihrer guten werkstofftechnischen Eigenschaften werden zunehmend Schaufeln aus faserverbundverstärkten Werkstoffen gefertigt. Die faserverbundverstärkten Werkstoffe, insbesondere kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe, weisen eine außerordentlich hohe Zugfestigkeit und E-Modul sowie eine sehr niedrige Dichte auf, wobei das Verhältnis zwischen der Zugfestigkeit und der Dichte maßgebender Parameter für die mechanische Belastbarkeit der Schaufeln ist. Nachteilig bei den Faserverbundwerkstoffen ist allerdings die sehr geringe Widerstandsfähigkeit gegenüber Tropfenschlagerosion. Schon bei geringem Tropfenschlag kommt es an den faserverbundverstärkten Werkstoffen zu erheblichen Schädigungen der Schaufeln.

[0004] Die EP 1 788 197 A1 offenbart eine Turbinenschaufel die aus einem Faserverbundwerkstoff ausgebildet ist, und die eine feuchtigkeitsundurchlässige Schutzschicht aufweist. Die feuchtigkeitsundurchlässige Schutzschicht sorgt dabei dafür, dass die Feuch-

tigkeit nicht in den Faserverbundwerkstoff eindringen kann und ihn so schwächen kann. Die Schutzschicht hat jedoch den Nachteil, dass sie bei hoher Erosionsbelastung aufgrund vom Tropfenschlag weiterhin leicht beschädigt und abgetragen werden kann.

[0005] Die US 6 607 358 B2 offenbart eine Turbinenschaufel die zur Verwendung in einer Niederdruckstufe einer Dampfturbine gestaltet ist und zumindest bereichsweise Faserverbundwerkstoff enthält, wobei der Faserverbundwerkstoff enthaltene Bereich mit einer Schutzschicht beschichtet ist, wobei die Schutzschicht aus einem Material besteht, dessen Schlagzugzähigkeit größer ist als die Schlagzugzähigkeit des Faserverbundwerkstoffes. Hierdurch soll die Turbinenschaufel höheren Erosionsbelastungen standhalten.

[0006] Die EP 1 645 538 A1 offenbart ein beschichtetes metallisches Bauteil, insbesondere eine Verdichterschaufel, welche mit einer Beschichtung versehen ist, welche unter anderem Nanopartikel aufweist um einen verbesserten Erosionsschutz zu gewährleisten.

[0007] Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, eine Turbinenschaufel auszubilden, die aus einem faserverbundverstärkten Werkstoff besteht und die dauerhaft unempfindlich gegen Erosion ist.

[0008] Die Aufgabe wird durch die Merkmale des unabhängigen Patentanspruchs 1 gelöst.

[0009] Vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen, welche einzeln oder in Kombination miteinander einsetzbar sind, sind Gegenstand der Unteransprüche.

[0010] Die erfindungsgemäße Turbinenschaufel, die zur Verwendung in einer Niederdruckstufe einer Dampfturbine gestaltet ist und zumindest bereichsweise Faserverbundwerkstoff enthält, wobei zumindest der dem Faserverbundwerkstoff enthaltene Bereich mit einer Schutzschicht beschichtet ist, zeichnet sich dadurch aus, dass die Schutzschicht aus einem Material besteht, dessen Schlagzugzähigkeit größer ist als die Schlagzugzähigkeit des Faserverbundwerkstoffes. Durch die schlagzugzähe Beschichtung wird eine Dämpfung des Tropfenaufpralls erreicht. Die Aufprallenergie wird somit von der Schutzschicht aufgenommen und das darunterliegende Material der Turbinenschaufel wird nicht beschädigt. Hierdurch ergibt sich eine Turbinenschaufel die unempfindlich gegen Erosion insbesondere Tropfenerosion ist.

[0011] Eine vorteilhafte Ausgestaltung der Erfindung sieht vor, dass die Schutzschicht aus einem Material besteht, dessen Härte größer ist als die Härte des Faserverbundwerkstoffes. Durch die größere Härte der Schutzschicht wird ein Materialabtrag durch Tropfe-

nerosion verhindert und die dauerhafte Erosionsunempfindlichkeit erhalten.

[0012] Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung der Erfindung sieht vor, dass die Turbinenschaufel aus einem Faserverbundwerkstoff ausgebildet ist, der Glasfasern und/oder Kunststofffasern und/oder Kohlenstofffasern und/oder Aramidfasern enthält. Diese Faserverbundwerkstoffe eignen sich besonders gut für die Turbinenschaufel da sie eine hohe Zugfestigkeit und einen hohen E-Modul aufweisen. Es ist aber auch möglich einen glasfaserverstärkten Kunststoff oder keramischen Faserverbundwerkstoff zu verwenden. Als Matrixmaterial ist Epoxydharz oder Keramik sehr gut geeignet.

[0013] Eine besonders bevorzugte Ausgestaltung der Erfindung sieht vor, dass die Schutzschicht aus Polyurethan, vorzugsweise hartelastisches Polyurethan, ausgebildet ist. Polyurethan verfügt über die wesentlichen Eigenschaften, die für eine solche Schutzschicht erforderlich sind, nämlich eine hohe Zugzähigkeit sowie eine hohe Härte.

[0014] Eine besonders vorteilhafte Ausgestaltung der Erfindung sieht vor, dass die Dicke der Schutzschicht zwischen 0,5 mm und 5 mm beträgt. Diese Schichtdicke hat sich in der Praxis als besonders günstig erwiesen.

[0015] Erfindungsgemäß bevorzugt wird die Schutzschicht nur oder verstärkt in erosionsbelasteten Zonen der Schaufel ausgeführt. Dies ist insbesondere die Eintrittskante und an dieser insbesondere der Spitzenbereich bzw. das obere Drittel der Eintrittskante. Ferner ist die Austrittskante der Schaufel insbesondere der wellennahe Bereich (unteres Drittel der Austrittskante) erosionsbeansprucht und zwar in dem Falle das die Stufe ventiliert und Wasser zur Kühlung eingespritzt wird.

[0016] Eine bevorzugte Ausgestaltung der Erfindung sieht vor, dass die Schutzschicht Nanopartikel enthält. Die Nanopartikel sorgen für eine verbesserte Dämpfungseigenschaft der Schutzschicht und für eine gleichmäßigere Kräfteinleitung in die Schutzschicht. Die Nanopartikel werden dabei durch den Tropfeneinschlag in Schwingung versetzt und von der Matrix und/oder der Schutzschicht gedämpft. Durch die Nanopartikel wird ein Materialabtrag zusätzlich erschwert.

[0017] Eine besonders bevorzugte Ausgestaltung der Erfindung sieht vor, dass die Nanopartikel aus einer der nachstehend genannten chemischen Verbindungen besteht: Aluminiumoxid, Siliziumoxid, Siliziumcarbid, Zirkonoxid, Titanoxid. Diese Nanopartikel haben sich als besonders geeignet für die Schutzschicht herausgestellt.

[0018] Die Nanopartikel weisen bevorzugt eine Größe auf, die kleiner als 100 nm ist. Die Nanopartikel können so sehr gut in die Schutzschicht eingebracht werden und verteilen sich innerhalb der Schutzschicht besonders gut.

[0019] Besonders bevorzugt weist die Beschichtung einen Nanopartikelanteil von weniger als 25% auf. Ein höherer Anteil an Nanopartikel würde die Eigenschaften der Schutzschicht nicht weiter verbessern.

[0020] Eine besonders bevorzugte Ausgestaltung der Erfindung sieht weiterhin vor, dass die Nanopartikelkonzentration im äußeren Bereich der Schutzschicht erhöht ist. Mit zunehmendem Abstand von der Schutzschichtoberfläche kann der Nanopartikelanteil abnehmen. Die Nanopartikel sorgen insbesondere in den oberflächennahen Bereich für eine Erhöhung der Dämpfungseigenschaften der Schutzschicht. Diese Wirkung lässt mit zunehmendem Abstand von der Schutzschichtoberfläche nach.

[0021] Ausführungsbeispiele und weitere Vorteile der Erfindung werden nachfolgend anhand der Figuren erläutert. Es zeigt:

[0022] Fig. 1 eine erfindungsgemäße Turbinenschaufel;

[0023] Fig. 2 den Schnitt II/II gemäß Fig. 1;

[0024] Fig. 3 die Detailansicht X gemäß Fig. 2;

[0025] Fig. 4 die Anströmkante eines zweiten Ausführungsbeispieles einer erfindungsgemäßen Turbinenschaufel.

[0026] Bei den Figuren handelt es sich jeweils um stark vereinfachte Darstellungen, bei denen nur die wesentlichen, zur Beschreibung der Erfindung notwendigen, Bauteile gezeigt sind. Gleiche bzw. funktionsgleiche Bauteile werden figurübergreifend mit denselben Bezugszeichen versehen.

[0027] Fig. 1 zeigt ein erstes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Turbinenschaufel **1**. Die Turbinenschaufel **1** weist einen Fußabschnitt **2** und einen Schaufelblattabschnitt **3** auf. Die Turbinenschaufel **1** ist insbesondere zur Verwendung in einer Niederdruckstufe einer Dampfturbine gestaltet. Der Fußabschnitt **2** weist einen Steckfuß **8** zur Befestigung der Turbinenschaufel **1** im Rotor auf. Der Schaufelblattabschnitt **3** ist aus Faserverbundwerkstoff ausgebildet. Die Hauptfaserrichtung **9** verläuft dabei vorzugsweise entlang einer Hauptachse **10** der Turbinenschaufel **1**. Im Bereich des Fußabschnittes **2** weist der Schaufelblattabschnitt **3** eine Zusatzfaserverbundlage **11** auf, die der Verstärkung dient. Die Zusatzfaserverbundlage **11** enthält zusätzliche Fasern, die unter abweichendem Winkel gegenüber der

Hauptachse **10** verlaufen und somit einer weiteren Versteifung des Schaufelblattabschnittes **3** dienen. Es ist auch möglich mehrere Zusatzfaserverbundlagen **11** vorzusehen, die dann vorzugsweise spiegelsymmetrisch angeordnet werden, wodurch eine Verwindung verringert bzw. vermieden wird. Zur Vermeidung von Tropfenerosion ist der Schaufelblattabschnitt **3** mit einer Schutzschicht **5** überzogen. Die Schutzschicht **5** besteht aus einem Material, dessen Schlagzugzähigkeit größer ist als die Schlagzugzähigkeit des Faserverbundwerkstoffes. Durch die hohe Schlagzugzähigkeit der Schutzschicht **5** wird die Energie beim Tropfenaufschlag stark gedämpft, wodurch eine Zerstörung des Schaufelblattabschnittes **3** vermieden wird. Ohne eine solche schlagabsorbierende Schutzschicht **5** würde der Faserverbundwerkstoff aufgrund des Tropfeneinschlages beschädigt werden, was nachfolgend zu einem Versagen der Turbinenschaufel und damit zur Beschädigung der gesamten Anlage führen würde.

[0028] Fig. 2 zeigt den Schnitt II/II im Schaufelblattabschnitt **3** gemäß Fig. 1. Da in diesem Bereich des Schaufelblattes eine große Blattdicke vorliegt ist zur Gewichts- und Steifigkeitsoptimierung ein Füllkörper **12** vorgesehen, der von dem Faserverbundwerkstoff **13** umschlossen ist. Der Schaufelblattabschnitt **3** ist zum Schutz gegen Tropfenschlagerosion vollständig mit einer Schutzschicht **5** umgeben. Die Schutzschicht **5** besteht wie bereits beschrieben aus einem Material dessen Schlagzugzähigkeit größer ist als die Schlagzugzähigkeit des Faserverbundwerkstoffes. Darüber hinaus weist die Schutzschicht **5** eine Härte auf, die größer ist als die Härte des Faserverbundwerkstoffes. Die größere Härte sorgt für eine weiter verbesserte Erosionsunempfindlichkeit und erhöht damit die Dauerfestigkeit der Turbinenschaufel. Die Schutzschicht **5** weist eine Shorehärte von wenigstens A70 auf. Die Schutzschicht **5** besteht aus einem gehärteten Polyurethan und besitzt vorzugsweise eine Schichtdicke zwischen 0,5 und 5 mm auf. Diese Schichtdicke hat sich als besonders vorteilhaft herausgestellt.

[0029] Um die Sicherheit der den Faserverbundwerkstoff enthaltenen Bauteile sicherzustellen, enthält der Faserverbundwerkstoff vorteilhafter Weise Glasfasern und/oder Kunststofffasern und/oder Kohlenstofffasern. Als Kunststofffasern eignen sich insbesondere Aramitfasern.

[0030] Fig. 3 zeigt eine Detailansicht der Schutzschicht **5** entsprechend des Detailausschnitts X aus Fig. 2. Die Schutzschicht **5** ist dabei dauerhaft haftend auf dem Schaufelblattabschnitt **3** aufgebracht. Die Schutzschicht **5** enthält einen gewissen Anteil an Nanopartikeln **7**. Der Anteil an Nanopartikel **7** sollte einen Gewichtsprozentanteil von 25 nicht überschreiten. Als Nanopartikel **7** eignen sich Partikel aus Aluminiumoxyd, Siliziumoxyd, Siliziumcarbid, Zirkon-

oxyd oder Titanoxyd besonders. Die Nanopartikel **7** sorgen dafür, dass beim Aufprall von Tropfen, die Aufprallenergie besonders gut von der Schutzschicht **5** aufgenommen werden kann und besonders gleichmäßig eingeleitet wird. Die Nanopartikel **7** werden beim Aufschlag der Tropfen in Schwingungen versetzt. Durch die Schwingung der Nanopartikel **7** wird die Bewegungsenergie in Reibungsenergie umgewandelt und die Aufschlagenergie dadurch wirkungsvoll gedämpft. Um eine gute Schwingungsanregung zu ermöglichen und eine gute Vermischung zu erzielen, sollten die Nanopartikel einen Durchmesser von weniger als 100 nm aufweisen. Die Konzentration der Nanopartikel **7** ist im äußeren Bereich der Schutzschicht **5** hoch und nimmt mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche kontinuierlich ab. Eine solche ungleichmäßige Verteilung der Nanopartikel **7** über die Schichtdicke **5** ist sinnvoll, da die Aufschlagenergie der Tropfen im oberflächennahen Bereich besonders hoch ist und hier eine erhöhte Dämpfung erforderlich ist. Mit zunehmender Schichtdicke wird die Aufschlagenergie abgebaut, so dass dort weniger Nanopartikel **7** erforderlich sind.

[0031] Fig. 4 zeigt ein zweites Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Turbinenschaufel **1**. Die Fig. 4 zeigt dabei eine Anströmkante einer Turbinenschaufel **1** entsprechend dem Detail Y in Fig. 2. Im Gegensatz zum Ausführungsbeispiel 1 umfasst die Schutzschicht **5** nicht den gesamten Schaufelblattabschnitt **3** sondern ist lediglich an der Anströmkante **6** der Turbinenschaufel **1** angebracht. Der einströmende Turbinendampf **14** trifft zunächst auf die Anströmkante **6**, so dass diese der größten Einschlagsenergie ausgesetzt ist. Anschließend strömt der Turbinendampf dann mit wesentlich verringerter Strömungsenergie an der Oberfläche des Schaufelabschnittes **3** vorbei und verursacht dort keine nennenswerten Schäden. Das Anbringen der Schutzschicht im Bereich der Anströmkante **6** ist somit ausreichend um eine Zerstörung aufgrund von Tropfenschlagerosion wirkungsvoll zu verhindern.

[0032] Zusammenfassend lässt sich somit feststellen, dass die erfindungsgemäße Schutzschicht, welche aus einem Material besteht, dessen Schlagzugzähigkeit größer ist als die Schlagzugzähigkeit des Faserverbundwerkstoffes der Turbinenschaufel, einen wirkungsvollen Schutz gegen Tropfenerosion an der Turbinenschaufel ermöglicht. Die erfindungsgemäße Schutzschicht sorgt somit für eine dauerhafte Unempfindlichkeit der Turbinenschaufel gegen Tropfenschlagerosion. Die erfindungsgemäße Turbinenschaufel ermöglicht dadurch einen dauerhaften Einsatz von Turbinenschaufel mit Faserverbundwerkstoffen bei vorhandener Tropfenerosion. Eine aufwendige Gestaltung der Turbinenschaufel wie sie in der Vergangenheit notwendig war, kann damit entfallen. Die Kosten für die Turbinenschaufeln lassen sich

hierdurch erheblich reduzieren bei gleichzeitig erhöhter Lebensdauer.

Patentansprüche

1. Turbinenschaufel (1) die zur Verwendung in einer Niederdruckstufe der Dampfturbine gestaltet ist und zumindest bereichsweise Faserverbundwerkstoff enthält, wobei zumindest der den Faserverbundwerkstoff enthaltende Bereich (4) mit einer Schutzschicht (5) beschichtet ist, wobei die Schutzschicht (5) aus einem Material besteht, dessen Schlagzugzähigkeit größer ist als die Schlagzugzähigkeit des Faserverbundwerkstoffes und wobei die Schutzschicht (5) Nanopartikel (7) enthält und wobei die Nanopartikel (7) in der Schutzschicht (5) ungleichmäßig verteilt sind und der Nanopartikelanteil in der Beschichtung mit zunehmendem Abstand von der Beschichtungsfläche kontinuierlich abnimmt.

2. Turbinenschaufel oder Turbinenschaufelelement nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Schutzschicht (5) aus einem Material besteht, dessen Härte größer ist als die Härte des Faserverbundwerkstoffes.

3. Turbinenschaufel oder Turbinenschaufelelement nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Schutzschicht (5) eine Shorehärte von wenigstens A70 aufweist.

4. Turbinenschaufel nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Faserverbundwerkstoff Glasfasern und/oder Kunststofffasern und/oder Kohlenstofffasern und/oder Keramikfasern und/oder Aramidfasern enthält.

5. Turbinenschaufel nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Schutzschicht (5) aus Polyurethan hergestellt ist.

6. Turbinenschaufel nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Dicke der Schutzschicht (5) zwischen 0,5 mm und 5 mm beträgt.

7. Turbinenschaufel nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Schutzschicht (5) nur auf erosionsbeanspruchten Bereichen (6) der Turbinenschaufel (1) angebracht ist.

8. Turbinenschaufel nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Nanopartikel (7) aus einer oder mehrerer der nachstehenden chemischen Verbindungen bestehen: Aluminiumoxid, Siliziumoxid, Siliziumcarbid, Zirkonoxid, Titanoxid.

9. Turbinenschaufel nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Nanopartikel (7) kleiner als 100 nm sind.

10. Turbinenschaufel nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Gewichtsanteil Nanopartikel in der ganzen Beschichtung weniger als 25% beträgt.

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG 1

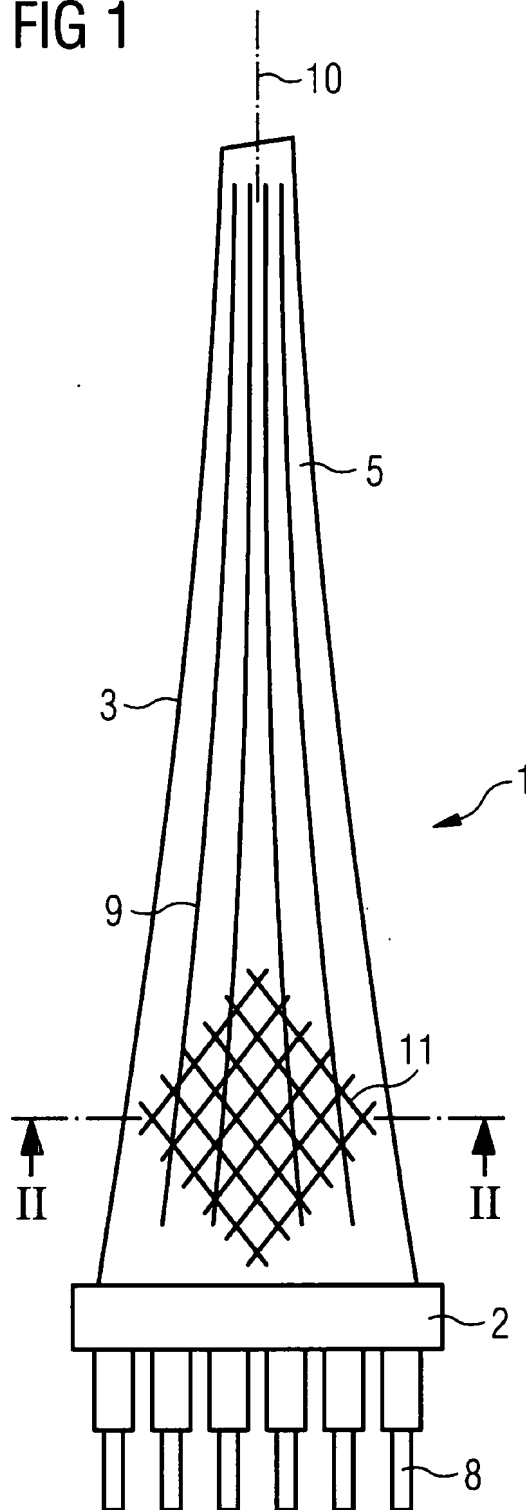


FIG 2

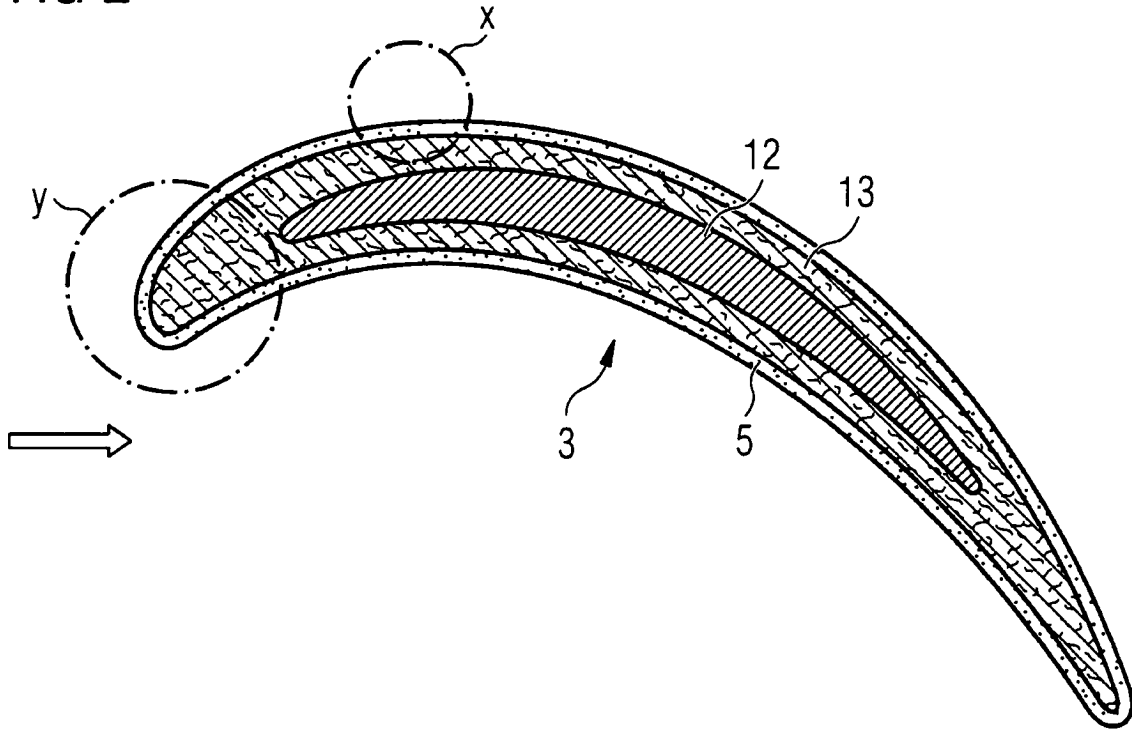


FIG 3

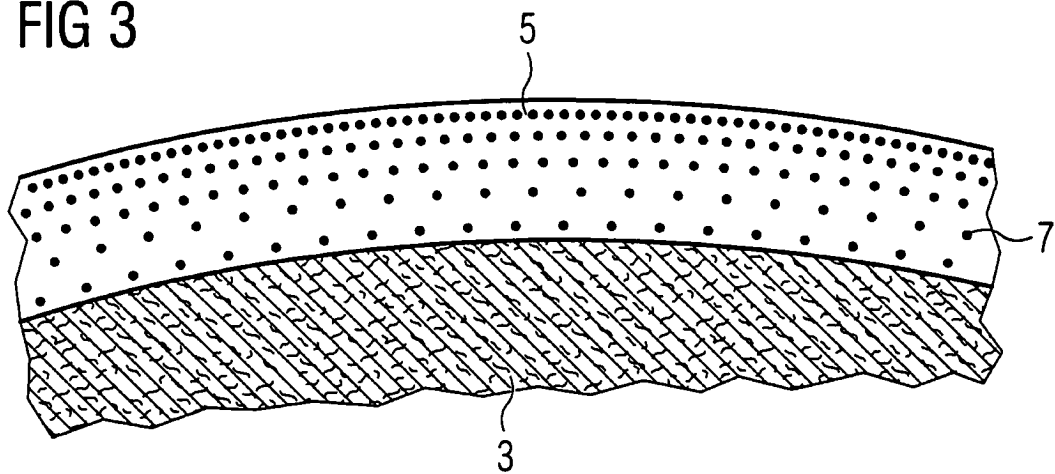


FIG 4

