



(10) **DE 10 2009 006 418 A1** 2010.12.09

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2009 006 418.4**

(22) Anmeldetag: **28.01.2009**

(43) Offenlegungstag: **09.12.2010**

(51) Int Cl.⁸: **F01D 5/28** (2006.01)

F01D 5/00 (2006.01)

B23D 25/02 (2006.01)

(71) Anmelder:

**Siemens Aktiengesellschaft, 80333 München, DE;
Technische Universität Dresden, 01069 Dresden,
DE**

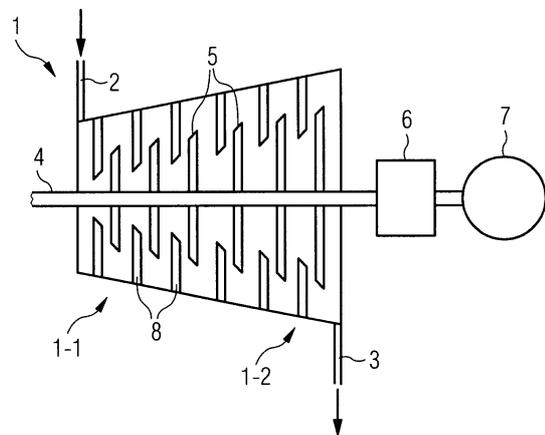
(72) Erfinder:

**Behnisch, Thomas, 01309 Dresden, DE;
Langkamp, Albert, Dr., 01324 Dresden, DE; Ebert,
Christoph, 01139 Dresden, DE; Füßel, René, 01099
Dresden, DE; Hufenbach, Werner, Prof., 01324
Dresden, DE; Kapitza, Heinrich, Dr., 90765 Fürth,
DE; Berndt, Anett, 91058 Erlangen, DE; Mantei,
Markus, 01896 Pulsnitz, DE; Zeininger, Heinrich,
Dr., 90587 Obermichelbach, DE**

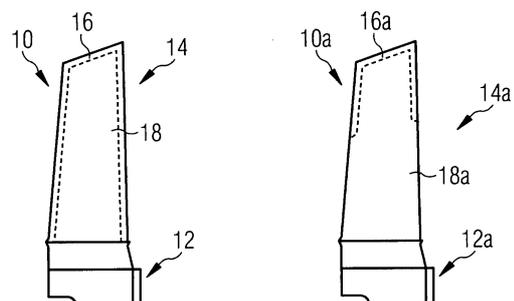
Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Turbinenschaufel, insbesondere Laufschaufel für eine Dampfturbine, sowie Herstellungsverfahren hierfür**



(57) Zusammenfassung: Um bei einer Turbinenschaufel (10) eine vergleichsweise hohe Verschleißfestigkeit (z. B. gegen Tropfenschlagerosion) bei gleichzeitig niedrigem Gewicht zu ermöglichen, wird gemäß der Erfindung zumindest ein Abschnitt der Turbinenschaufel (10) durch ein Faserverbundmaterial (16) mit einer Matrix und darin eingebetteten Fasern ausgebildet, wobei die Matrix darin und/oder daran verteilt angeordnete Nanopartikel aufweist. Die Turbinenschaufel (10) kann z. B. als Laufschaufel (5) in der Endstufe (1-2) einer Kondensationsdampfturbine (1) verwendet werden.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine Turbinenschaufel, insbesondere Laufschaufel für eine Dampfturbine, sowie ein Verfahren zur Herstellung einer Turbinenschaufel.

[0002] Bekannte Turbinenschaufeln werden üblicherweise hohl oder massiv aus einem metallischen Werkstoff wie z. B. Stahl hergestellt, und werden beispielsweise für Dampfturbinen benötigt.

[0003] Bei einer Dampfturbine wird die thermische Energie von der Turbine zugeführtem Dampf in mechanische Arbeit umgewandelt. Dampfturbinen umfassen hierfür wenigstens einen hochdruckseitigen Dampfeinlass und wenigstens einen niederdruckseitigen Dampfauslass. Eine sich durch die Turbine hindurch erstreckende Welle, der so genannte Turbinenläufer, wird mit Hilfe von Turbinenschaufeln angetrieben. Durch eine Kopplung des Läufers mit einem elektrischen Generator ermöglicht eine Dampfturbine z. B. die Erzeugung von elektrischer Energie.

[0004] Zum Antreiben des Läufers sind typischerweise Laufschaufeln und Leitschaufeln vorgesehen, wobei die Laufschaufeln am Läufer befestigt sind und mit diesem rotieren, wohingegen die Leitschaufeln zumeist feststehend an einem Turbinengehäuse (alternativ: an einem Leitschaufelträger) angeordnet sind. Die Leitschaufeln sorgen für eine günstige Strömungsführung des Dampfes durch die Turbine, um eine möglichst effiziente Energieumsetzung zu erzielen. Bei dieser Umsetzung reduziert sich im Verlauf zwischen Dampfeinlass und Dampfauslass die Enthalpie des Dampfes. Hierbei verringert sich sowohl die Temperatur als auch der Druck des Dampfes.

[0005] Aus Effizienzgründen ist eine möglichst hohe Enthalpiedifferenz zwischen zugeführtem und auszulassendem Dampf aus einer so genannten Endstufe der Dampfturbine anzustreben. In dieser Hinsicht ist ein relativ geringer Druck des auszulassenden Dampfes von Vorteil.

[0006] Aufgrund des Erreichens des Sattdampfzustandes in einem Niederdruckteil der Turbine kann sich aus dem Dampf auskondensierte Feuchtigkeit niederschlagen und Wassertropfen in der Turbine ausbilden. Die rotierenden Laufschaufeln schlagen mit hoher Energie auf die von der Dampfströmung mitgenommenen Wassertropfen, so dass sie einem entsprechenden Verschleiß unterliegen.

[0007] Da durch diesen Effekt ("Tropfenschlagerosion") selbst gehärteter Stahl abgetragen wird, ergibt sich in der Praxis ein hoher Aufwand zur Fertigung möglichst resistenter Laufschaufeln bzw. zum regelmäßigen Austausch von erodierten Laufschaufeln aus der Endstufe.

[0008] Außerdem ist die Endstufe einer Dampfturbine meist eine begrenzende Baugruppe bezüglich maximaler Durchströmfläche bzw. maximaler Drehzahl des Läufers, da insbesondere in diesem Bereich die Fliehkräfte zu hohen Zugspannungen im Material der Laufschaufeln führen. Insofern wäre insbesondere in diesem Bereich der Einsatz von Turbinenschaufeln in Leichtbauweise (z. B. aus Leichtmetall) mit entsprechend geringerer Masse wünschenswert. In der Praxis scheiterte dieser Ansatz jedoch von vornherein daran, dass entsprechende Leichtbaumaterialien einem noch rascheren Verschleiß durch die Tropfenschlagerosion unterliegen.

[0009] Es ist daher eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, bei einer Turbinenschaufel eine vergleichsweise hohe Erosionsbeständigkeit bei gleichzeitig niedrigem Gewicht zu ermöglichen.

[0010] Diese Aufgabe wird gemäß der Erfindung durch eine Turbinenschaufel nach Anspruch 1 bzw. ein Verfahren zur Herstellung einer Turbinenschaufel nach Anspruch 15 gelöst. Die abhängigen Ansprüche betreffen vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung.

[0011] Die erfindungsgemäße Turbinenschaufel ist dadurch gekennzeichnet, dass zumindest ein Abschnitt der Turbinenschaufel durch ein Faserverbundmaterial mit einer Matrix und darin eingebetteten Fasern gebildet ist und die Matrix darin und/oder daran verteilt angeordnete Nanopartikel aufweist.

[0012] Durch die wenigstens teilweise Ausbildung der Turbinenschaufel aus einem Faserverbundmaterial ergibt sich ein vorteilhaft reduziertes Gewicht. Die hierbei in einfacher Weise in die Matrix des Faserverbundmaterials einzubringenden bzw. an der Matrix anzulagernden Nanopartikel ermöglichen die Erzielung einer Reihe von Vorteilen.

[0013] So kann beispielsweise der Einbau von Nanopartikeln in die Matrix die Haftung zwischen den Fasern und der Matrix verbessern. Alternativ oder zusätzlich an der Matrix angelagerte Nanopartikel können die Haftung zu angrenzenden Abschnitten der Turbinenschaufel verbessern und/oder, wenn die angelagerten Nanopartikel eine Außenoberfläche der Turbinenschaufel ausbilden, die Erosionsbeständigkeit beträchtlich verbessern.

[0014] Es kann vorgesehen sein, dass lediglich ein oder mehrere Oberflächenabschnitte der Turbinenschaufel durch das Faserverbundmaterial ausgebildet werden, insbesondere an Stellen, die im Betrieb der Turbinenschaufel einer besonders hohen Erosionsbelastung ausgesetzt sind und/oder aufgrund ihres relativ großen Abstandes von der Läuferdrehachse relativ stark zur Fliehkrafterzeugung beitragen. Vor diesem Hintergrund ist es bevorzugt, zumindest einen radial äußersten und/oder in Richtung der Um-

fangsgeschwindigkeit orientierten Oberflächenabschnitt durch das Faserverbundmaterial auszubilden. Übrige Oberflächenabschnitte und/oder Kernbereiche (auch unter oberflächlichen Faserverbundbereichen) können hierbei aus einem anderen Material (z. B. ein anderes Faserverbundmaterial oder Leichtmetall) vorgesehen sein.

[0015] In einer anderen Ausführungsform ist vorgesehen, dass im Wesentlichen die gesamte Oberfläche der Turbinenschaufel durch das Faserverbundmaterial ausgebildet ist. Davon ausgenommen sein können z. B. Oberflächenabschnitte im Fußbereich der Turbinenschaufel, welche im Betrieb aufgrund der Befestigung des Schaufelfußes am Turbinenläufer überdeckt werden und sich somit nicht unmittelbar in der Dampfströmung befinden.

[0016] In einer Ausführungsform ist vorgesehen, dass das Faserverbundmaterial eine äußere Faserverbundschicht auf einem Kern der Turbinenschaufel ist. Der Kern kann hierbei z. B. aus einem von dem Faserverbundmaterial sich unterscheidenden weiteren Faserverbundmaterial bestehen. Dies ist sowohl bei einer nur teilweise als auch bei einer im Wesentlichen vollständig durch das Faserverbundmaterial ausgebildeten Schaufeloberfläche möglich.

[0017] Als Kernmaterial ist ein Faserverbundmaterial bevorzugt, welches zweckmäßigerweise hinsichtlich seiner mechanischen Eigenschaften ausgewählt bzw. optimiert ist. Diesbezüglich ist z. B. ein in Radialrichtung langgestreckter Faserverbundkern von Vorteil, dessen Fasern eine Vorzugsorientierung in Radialrichtung aufweisen, insbesondere z. B. als über die im Wesentlichen ganze Radialerstreckung des Kerns durchgehende Fasern ausgebildet sind.

[0018] Das oben bereits erwähnte "weitere Fasermaterial", welches den gegebenenfalls vorgesehenen Turbinenschaufelkern bildet, kann sich von dem (erstgenannten) Faserverbundmaterial z. B. hinsichtlich der Matrix (Harzsystem) und/oder hinsichtlich der Faserart unterscheiden. In einer speziellen Ausführungsform ist z. B. ein Kern aus CFK (Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff) mit einer oberflächlichen Schicht des (erstgenannten) "Fasermaterials" aus GFK (Glasfaserverstärkter Kunststoff) vorgesehen. In diesem Beispiel können auch die beiden Matrixmaterialien sich unterscheiden, oder identisch vorgesehen sein (z. B. beide als Epoxidharz).

[0019] Alternativ oder zusätzlich zu einem Unterschied in der Faserart zwischen den beiden Materialien (Kernmaterial und einen Oberflächenbereich der Turbinenschaufel ausbildendes Material) kann auch ein Unterschied in der Faserlänge (bzw. Faserlängenverteilung) und/oder der Faserorientierung (bzw. Faserorientierungsverteilung) vorgesehen sein.

[0020] Wenn das mit den Nanopartikeln versehene Faserverbundmaterial als eine äußere Faserverbundschicht auf einem aus "weiterem Faserverbundmaterial" ausgebildeten Kern der Turbinenschaufel vorgesehen ist, und hierbei dasselbe Kunstharzsystem als Matrixmaterial vorgesehen ist, so kann die Herstellung der Turbinenschaufel vorteilhaft mit einem Infiltrationsschritt erfolgen, bei welchem z. B. in einem Formwerkzeug ein darin eingelegtes Fasermaterial infiltriert wird. Die in zumindest einem oberflächlichen Bereich der Turbinenschaufel bereitzustellenden Nanopartikel können z. B. vor dem Infiltrationsschritt dem hierfür verwendeten flüssigen oder zähflüssigen Harzsystem beigemischt werden. Zur Erzielung einer inhomogenen Konzentration an Nanopartikeln im Volumen der Matrix kommt in Betracht, die Nanopartikel während des Infiltrationsschrittes in variierender Konzentration einem Harzsystem zuzugeben, welches in das Formwerkzeug einströmt.

[0021] Ein anderes Herstellungsverfahren, mittels welchem ein Faserverbundkern und eine oberflächliche Faserverbundschicht der Turbinenschaufel noch universeller und unabhängig voneinander gestaltet werden können, besteht darin, in einem ersten Schritt den Schaufelkern im Wesentlichen fertigzustellen (z. B. aus nur teilweise ausgehärtetem "weiterem Faserverbundmaterial") und in einem zweiten Schritt wenigstens einen Teil oder im Wesentlichen die gesamte Oberfläche der Turbinenschaufel durch das (erstgenannte) Faserverbundmaterial auszubilden. Der im ersten Schritt gefertigte Schaufelkern (z. B. aus CFK) kann hierbei z. B. mit oberflächlich angelagertem weiterem Fasermaterial im zweiten Schritt infiltriert werden, um die betreffende(n) Oberfläche(n) der Turbinenschaufel als Beschichtung auszubilden (z. B. aus GFK).

[0022] Zur Erzielung einer inhomogenen Konzentration an Nanopartikeln in einer solchen Beschichtung kann wieder eine variierende Zugabe der Nanopartikel während des Infiltrationsschrittes eingesetzt werden. Alternativ oder zusätzlich ist es denkbar, ein jeweils zu infiltrierendes Fasermaterial bereits vor seiner Infiltration mit Nanopartikeln auszustatten.

[0023] Bei allen vorstehend erwähnten Herstellungsverfahren kommt auch in Betracht, Fasermaterial vorab dem noch flüssigen bzw. zähflüssigen Harzsystem zuzugeben. Dies ist z. B. insbesondere für eine oberflächliche Schicht der Turbinenschaufel interessant, um an dieser Stelle relativ kurze Fasern und/oder ungeordnete Fasern einzubauen.

[0024] Falls die Turbinenschaufel außer dem gemäß der Erfindung mit Nanopartikeln versehenen Faserverbundmaterial noch ein anderes Kernmaterial aufweist (bevorzugt ein "weiteres Fasermaterial", denkbar jedoch auch z. B. Metall), so kann dieser Kern hohl oder massiv vorgesehen sein.

[0025] Für die Auswahl bzw. Gestaltung des Faserverbundmaterials, welches zumindest einen Abschnitt der Schaufeloberfläche ausbildet, gibt es vielfältige Möglichkeiten.

[0026] In einer bevorzugten Ausführungsform ist z. B. vorgesehen, dass die darin eingebetteten Fasern deutlich kürzer sind als der maximale, entlang des betreffenden Oberflächenabschnittes gemessene Abstand zwischen zwei Punkten dieses Oberflächenabschnittes. Anders ausgedrückt sind über den oder die betreffenden Oberflächenabschnitte betrachtet keine generell durchgehenden Fasern vorgesehen.

[0027] Insbesondere für Turbinenschaufeln mit einer Schauffellänge von 1 m oder mehr ist es z. B. vorteilhaft, wenn die Fasern jeweils eine Länge im Bereich von 1 bis 10 cm, insbesondere 1 bis 5 cm besitzen.

[0028] In einer Ausführungsform ist vorgesehen, dass die Länge der einzelnen Fasern in einem relativ engen Bereich um einen Mittelwert der Faserlänge variiert. Davon soll z. B. der Fall umfasst sein, dass das obere Quartil der Faserlängenverteilung höchstens um einen Faktor von 1,5 größer als das untere Quartil der Faserlängenverteilung ist. An dieser Stelle ist jedoch darauf hinzuweisen, dass es im Rahmen der Erfindung keineswegs zwingend ist, dass die Faserlängenverteilung für den oder die betreffenden Oberflächenbereiche einheitlich vorgesehen ist. Vielmehr könnte auch eine lokal variierte Faserlängenverteilung, insbesondere lokal variierte mittlere Faserlänge vorgesehen sein.

[0029] Der Vorteil einer Faserlänge, die deutlich geringer (z. B. um wenigstens einen Faktor 10) als die Schauffellänge ist, besteht vor allem darin, dass damit eine verbesserte Duktilität und Homogenität des Faserverbundes im Vergleich zu einer durchgehenden Fasernanordnung erzielt werden können. Beispielsweise aus dem gleichen Grund ist es bevorzugt, wenn die Fasern ungeordnet in der Matrix eingebettet sind, also nennenswerte Anteile sämtlicher (zumindest in der Oberflächenebene verlaufenden) Faserorientierungen vorhanden sind. Dies soll nicht ausschließen, dass bei dieser ungeordneten Fasereinbettung statistisch betrachtet eine Vorzugsrichtung (insbesondere z. B. in Radialrichtung) vorhanden ist. Hierbei kann vorgesehen sein, dass das Ausmaß und/oder die Orientierung der Vorzugsrichtung lokal über den oder die betreffenden Oberflächenabschnitte variiert.

[0030] Ebenfalls im Hinblick auf die Duktilität und Homogenität des Faserverbundmaterials ist die Einbettung der Fasern in loser Form oder in Form eines Faservlieses gegenüber deren Einbettung als Gewebe, Geflecht oder dergleichen bevorzugt.

[0031] Als besonders vorteilhaft hat es sich herausgestellt, wenn der Anteil der Fasern im Faserverbundmaterial im Bereich von 20 bis 70 Vol.-%, insbesondere 30 bis 60 Vol.-% liegt.

[0032] Was die Wahl der Fasern anbelangt, so kommen grundsätzlich alle aus dem Bereich der Faserverbundtechnologie bekannten und gebräuchlichen Fasern in Betracht (z. B. Kohlenstofffasern, synthetische Kunststofffasern, Naturfasern etc.). In einer bevorzugten Ausführungsform sind z. B. Glasfasern in der Matrix eingebettet.

[0033] Auch für die Auswahl des Matrixmaterials kann grundsätzlich auf aus dem Bereich der Faserverbundtechnologie bekannte Materialien zurückgegriffen werden. Die Matrix des Faserverbundmaterials kann z. B. aus Epoxidharz, Polyimid, Cyanat-Ester oder Phenolharz bestehen. Für den hier besonders interessierenden Anwendungsfall einer Laufschaufel in einem Niederdruckbereich einer Dampfturbine ist z. B. eine duroplastische Matrix wie Epoxidharz mit darin eingebetteten Glasfasern besonders interessant.

[0034] Der Begriff "Nanopartikel" soll insbesondere Teilchen mit einer typischen Ausdehnung im Bereich von 10 bis 100 nm bezeichnen. Es hat sich herausgestellt, dass derartige, z. B. synthetisch hergestellte Partikel in der Matrix die Haftung der Fasern verbessern können und an der Oberfläche der Turbinenschaufel die Erosionsbeständigkeit der Turbinenschaufel verbessern können.

[0035] In einer bevorzugten Ausführungsform sind Nanopartikel im Volumen der Matrix im Wesentlichen homogen verteilt angeordnet. Um dies zu erreichen, können die Nanopartikel wie oben bereits erläutert dem noch nicht verfestigten Matrixmaterial beigegeben und mit diesem vermischt werden. Bei diesem Schritt können auch die einzubettenden Fasern zugegeben werden, sofern diese nicht separat an einem Kernmaterial der Turbinenschaufel angeordnet werden, etwa als ein Faserhalbzeug (z. B. Gewebe, Gelege, Vlies etc.).

[0036] In einer bevorzugten Ausführungsform ist vorgesehen, dass der Anteil der Nanopartikel in der Matrix kleiner als 30 Gew.-% ist, insbesondere im Bereich von 5 bis 20 Gew.-% liegt.

[0037] In einer bevorzugten Ausführungsform sind Nanopartikel an einer Matrixoberfläche angelagert, welche eine Oberfläche der fertigen Turbinenschaufel darstellt, wobei in diesem Fall weiter bevorzugt ist, dass diese Nanopartikel im Wesentlichen homogen an dieser Oberfläche verteilt angeordnet sind.

[0038] In einer Ausführungsform ist vorgesehen, dass der Anteil der Nanopartikel an einer Oberfläche

der Matrix größer als 70 Gew.-% ist, insbesondere im Bereich von 90 bis 100 Gew.-% liegt. Im Hinblick darauf, dass die Konzentration der Nanopartikel an der Oberfläche bevorzugt relativ groß und im Volumen der Matrix bevorzugt relativ klein ist, ist gemäß einer spezielleren Ausführungsform vorgesehen, dass zumindest in einem äußersten Schichtbereich eines einen Schaufeloberflächenbereich ausbildenden Matrixmaterials ein Gradient der Nanopartikelkonzentration vorgesehen ist (mit zum Schaufelinneren hin abnehmender Partikelkonzentration).

[0039] In einer Ausführungsform ist vorgesehen, dass das Material der Nanopartikel gewählt ist aus der Gruppe bestehend aus Aluminiumoxid, Siliziumcarbid, Siliziumoxid, Zirkonoxid und Titanoxid (einschließlich Kombinationen davon). Insbesondere können Nanopartikel aus einem derartigen Material mit im Wesentlichen sphärischer Form und/oder mit einer typischen Ausdehnung im Bereich von 10 bis 50 nm verwendet werden.

[0040] Der Aufbau der durch das Faserverbundmaterial ausgebildeten Oberflächenabschnitte der Turbinenschaufel kann lokal variiert und damit z. B. der zu erwartenden Erosionsbelastung und mechanischen Belastung angepasst werden. Eine solche Variation kann sich z. B. auf den Anteil, die Art, die Länge und die Anordnung (Orientierung bzw. Orientierungsverteilung) der Fasern beziehen, aber auch z. B. auf den Anteil der Nanopartikel in der Matrix.

[0041] Die erfindungsgemäße Gestaltung kann vorteilhaft auch mit weiteren, an sich bekannten Erosionsschutzmaßnahmen kombiniert werden, wie z. B. separat ausgebildete Schaufelvorderkanten (z. B. aus Metall).

[0042] Die Erfindung wird nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen mit Bezug auf die beigefügten Zeichnungen weiter beschrieben. Es stellen dar:

[0043] [Fig. 1](#) eine schematische Darstellung einer herkömmlichen Dampfturbine,

[0044] [Fig. 2](#) eine Seitenansicht einer Turbinenschaufel gemäß eines ersten Ausführungsbeispiels,

[0045] [Fig. 3](#) eine Seitenansicht einer Turbinenschaufel gemäß eines zweiten Ausführungsbeispiels,

[0046] [Fig. 4](#) eine Seitenansicht einer Turbinenschaufel gemäß eines dritten Ausführungsbeispiels, und

[0047] [Fig. 5](#) ein Detail aus [Fig. 4](#) in einer modifizierten Ausführung.

[0048] [Fig. 1](#) veranschaulicht eine Dampfturbine **1**, umfassend eine hochdruckseitige Dampfzuleitung **2**

zur Zufuhr von Frischdampf (z. B. über ein steuerbares Ventil) und eine niederdruckseitige Dampfableitung **3**, welche z. B. zu einem (nicht dargestellten) Kondensator eines Dampfkreislaufes führt, aus welchem nach Erhitzen des Kondensats wieder Frischdampf erzeugt wird ("Kondensationsdampfturbine").

[0049] In einem Normalbetrieb der Dampfturbine **1** wird der Frischdampf z. B. mit einem Druck von etwa 10^2 bar und einer Temperatur von etwa 500°C über die Zuleitung **2** am Eingang der Turbine **1** zugeführt. Im Verlauf der Turbine **1** expandiert der Dampf, so dass sich sowohl dessen Druck als auch dessen Temperatur verringert. Am Ausgang der Turbine **1** tritt der Dampf über die Ableitung **3** z. B. mit etwa 10^{-1} bar und etwa 40°C wieder aus (z. B. 0,05 bar und 33°C).

[0050] Die thermische Energie des zugeführten Dampfes wird zunächst in mechanische Dreharbeit umgewandelt. Ein durch die Turbine **1** in einer Axialrichtung sich hindurch erstreckender Turbinenläufer **4** wird durch daran befestigte Laufschaufeln **5** angetrieben und treibt wiederum über ein gegebenenfalls vorgesehenes Getriebe **6** einen elektrischen Generator **7** an.

[0051] Abweichend vom dargestellten Beispiel könnte die Turbine **1** alternativ oder zusätzlich z. B. Pumpen, Verdichter oder andere Einheiten antreiben, wie sie z. B. oftmals zur Implementierung groß-industrieller chemischer Prozesse benötigt werden.

[0052] Innerhalb der Turbine **1** wechseln sich in Axialrichtung betrachtet die Laufschaufeln **5** mit Leitschaufeln **8** ab, welche für eine günstige Strömungsführung des Dampfes durch die Turbine **1** sorgen. Die Leitschaufeln **8** sind an der Innenseite eines Turbinengehäuses befestigt und stehen radial nach innen gerichtet davon ab.

[0053] Wie aus [Fig. 1](#) ersichtlich, umfasst die Turbine **1** im dargestellten Beispiel insgesamt 6 Schaufelkranzpaare **8, 5**.

[0054] Im Hinblick auf einen möglichst hohen Wirkungsgrad bei der Energieumsetzung ist ein möglichst geringer Enddruck des niederdruckseitig (nach dem letzten Schaufelkranzpaar **8, 5**) über die Ableitung **3** austretenden Dampfes von Vorteil.

[0055] Mit der Entspannung des Dampfes in den Sattdampfbereich hinein geht in der Praxis das gravierende Problem der Tropfenschlagerosion einher, die zu einem hohen Verschleiß der Laufschaufeln im Niederdruckteil der Turbine führt. Im dargestellten Beispiel sind hiervon also die in [Fig. 1](#) weiter rechts angeordneten Laufschaufeln **5** der Turbine **1** betroffen, welche einem zweiten Expansionsabschnitt bzw. einer Niederdruckstufengruppe **1-2** angehören, wohingegen die in [Fig. 1](#) links befindlichen Schaufeln ei-

nem ersten Expansionsabschnitt bzw. einer Hochdruckstufengruppe **1-1** zuzurechnen sind.

[0056] Bei den Laufschaufeln des oder der im Turbinenverlauf letzten Schaufelpaare **8, 5** (Endstufe) ist neben der Tropfenschlagerosion auch eine hohe Fliehkraftbelastung herausfordernd, welche z. B. zu hohen Zugspannungen in radialer Richtung im Material der Laufschaufeln **5** führt.

[0057] Nachfolgend werden mit Bezug auf die [Fig. 2](#) bis [Fig. 4](#) einige Ausführungsbeispiele von Laufschaufeln beschrieben, welche vorteilhaft eine relativ hohe Erosionsbeständigkeit bei gleichzeitig relativ geringer Masse aufweisen. Turbinenschaufeln der nachfolgend beschriebenen Art können insbesondere in einer Installationsumgebung der in [Fig. 1](#) dargestellten Art eingesetzt werden, etwa als Laufschaufeln **5** im Niederdruckbereich **1-2** bzw. in der Endstufe der Dampfturbine **1**.

[0058] [Fig. 2](#) zeigt eine Turbinenlaufschaufel **10** mit einem Schaufelfuß **12** zur Befestigung an einem Turbinenläufer und einem Schaufelkorpus **14** zur Umsetzung der thermischen Energie des Dampfes in mechanische Dreharbeit am Turbinenläufer.

[0059] Eine Besonderheit der Schaufel **10** besteht darin, dass deren im Wesentlichen gesamte Oberfläche durch ein Faserverbundmaterial **16** mit einer Matrix und darin eingebetteten Fasern ausgebildet ist und die Matrix zumindest in einem schaufeloberflächennahen Volumenbereich darin verteilt angeordnete Nanopartikel enthält. Alternativ oder zusätzlich können die Nanopartikel direkt an der Schaufeloberfläche (an der äußeren Matrixoberfläche) angelagert sein.

[0060] Bei dem Faserverbundmaterial **16** handelt es sich z. B. um eine Glasfaser-Epoxidharz-Verbund, wobei der Faseranteil im Material **16** etwa 50 Vol.-% beträgt und wobei die Nanopartikel z. B. im Wesentlichen sphärische Partikel aus Siliziumkarbid mit einem typischen (z. B. mittleren) Durchmesser von etwa 10 bis 30 nm sind, deren Anteil im Volumen der Matrix etwa 10 bis 20 Gew.-% beträgt und zur Schaufeloberfläche hin ansteigt (auf z. B. über 70 Gew.-%).

[0061] Bei der Herstellung der Schaufel **10** wurde zunächst aus einem "weiteren Faserverbundmaterial" (welches sich von dem Material **16** unterscheidet), alternativ aus einem metallischen Material wie z. B. Stahl oder Titan, der Schaufelfuß **12** mit einem einstückig damit verbundenen Schaufelkern **18**, der hohl oder massiv sein kann, ausgebildet. Anschließend wurde die gesamte Oberfläche des Faserverbundschaufelkerns **18** mit einer Schicht des Faserverbundmaterials **16** versehen, also mit diesem Material beschichtet.

[0062] Hierzu besteht eine Möglichkeit darin, ein noch nicht verfestigtes Matrixmaterial (z. B. Epoxidharz) mit Glasfasern bzw. Glasfaserabschnitten, den Nanopartikeln und einem Härter (zur Bildung eines Reaktionsharzsystems) zu vermischen und auf den Schaufelkern **18** aufzubringen. Zur Realisierung des erwähnten Anstiegs der Nanopartikelkonzentration zur Schaufeloberfläche hin kann z. B. vorgesehen sein, zusätzlich Nanopartikel in ansteigender Menge in eine zur Infiltration verwendete Kunstharzströmung einzudosieren und/oder nach Abschluss der Infiltration solche zusätzlichen Nanopartikel direkt an der Matrixoberfläche und/oder in das oberflächliche Matrixvolumen hineinreichend anzulagern. Letzteres gelingt relativ einfach und mit gutem Ergebnis, wenn die Anlagerung an die noch nicht ausgehärtete (oder jedenfalls nicht vollständig ausgehärtete) Matrix erfolgt.

[0063] Eine andere Möglichkeit besteht darin, zunächst die Glasfasern in Form eines Halbzeuges (z. B. Glasfaserlege etc.) auf die Oberfläche des Schaufelkerns **18** zu drapieren und das Harzsystem samt Nanopartikeln in einem weiteren Schritt (Infiltration) aufzubringen.

[0064] Derartige Verfahren zur Ausbildung eines Faserverbundmaterials sind aus dem Stand der Technik vielfältig bekannt und bedürfen daher hier keiner näheren Erläuterung. Beispielsweise kann zur Infiltration und nachfolgenden Aushärtung (z. B. thermisch) des Matrixmaterials ein beheizbares Formwerkzeug verwendet werden.

[0065] Bei den oben geschilderten Varianten zur Herstellung der Turbinenschaufel **10** können Nanopartikel auch bereits am betreffenden Fasermaterial angelagert sein, bevor dieses mit dem flüssigen bzw. zähflüssigen Matrixmaterial infiltriert wird. Dies alternativ oder zusätzlich zu einer Integration von Nanopartikeln während und/oder nach der Infiltration.

[0066] Aufgrund des Faserverbundanteils der hieraus resultierenden Schaufel **10** ergibt sich ein vorteilhaft verringertes Gewicht im Vergleich zu einer aus Metall hergestellten Schaufel. Die oberflächliche Schicht des Faserverbundmaterials **16** führt außerdem insbesondere bei im Wesentlichen homogener Verteilung der Nanopartikel in der Matrix und/oder an der Matrixoberfläche zu einer beträchtlichen Verbesserung der mechanischen Eigenschaften bzw. Erhöhung der Erosionsbeständigkeit und damit zu einer Entschärfung des Problems der Tropfenschlagerosion im Falle des Einsatzes im Niederdruckbereich einer Kondensationsdampfturbine.

[0067] Bei der nachfolgenden Beschreibung von weiteren Ausführungsbeispielen werden für gleichwirkende Komponenten die gleichen Bezugszahlen verwendet, jeweils ergänzt durch einen kleinen Buch-

staben zur Unterscheidung der Ausführungsform. Dabei wird im Wesentlichen nur auf die Unterschiede zu dem bzw. den bereits beschriebenen Ausführungsbeispielen eingegangen und im Übrigen hiermit ausdrücklich auf die Beschreibung vorangegangener Ausführungsbeispiele verwiesen.

[0068] **Fig. 3** zeigt eine Schaufel **10a** gemäß eines weiteren Ausführungsbeispiels. Im Unterschied zu der Schaufel **10** gemäß **Fig. 2** wurde bei der Schaufel **10a** lediglich ein radial äußerster Abschnitt der Schaufeloberfläche durch ein Faserverbundmaterial **16a** der bereits beschriebenen Art ausgebildet.

[0069] Das Faserverbundmaterial **16a** bildet im dargestellten Beispiel gewissermaßen eine radial äußere Kappe der Schaufel **10**. In diesem Bereich bewirkt eine Massereduzierung eine besonders effiziente Reduzierung der Fliehkraftbeanspruchung im Turbinenbetrieb (relativ großer Abstand von der Drehachse). Außerdem unterliegt dieser Bereich im Betrieb einer relativ großen Tropfenschlagbeanspruchung (relativ große Umfangsgeschwindigkeit).

[0070] Alternativ zur Ausbildung eines auf der Schaufeloberfläche zusammenhängenden Bereiches aus dem Faserverbundmaterial **16a** kommt in Betracht, mehrere separate Bereiche der Schaufeloberfläche in dieser Art zu modifizieren.

[0071] **Fig. 4** zeigt eine Turbinenschaufel **10b**, beispielsweise der oben bereits beschriebenen Art, und veranschaulicht im rechten Teil der Figur in einer vergrößerten schematischen Darstellung eine im Rahmen der Erfindung bevorzugte ungeordnete Anordnung der Fasern in einem betreffenden Oberflächenabschnitt **16b**.

[0072] In dieser Darstellung im rechten Teil der **Fig. 4** ist außerdem eine in diesem Beispiel relativ eng um eine mittlere Faserlänge herum variierende Länge der einzelnen Fasern veranschaulicht.

[0073] Die Faserorientierung innerhalb der Oberflächenebene ist hierbei "völlig ungeordnet" bzw. stochastisch.

[0074] **Fig. 5** veranschaulicht in einer dem rechten Teil von **Fig. 4** entsprechenden Darstellung eine ebenfalls ungeordnete Faserorientierung, die jedoch eine Vorzugsrichtung (in der Figur vertikal) aufweist.

[0075] Eine bevorzugte Verwendung der oben beschriebenen Turbinenschaufeln und/oder der wie oben beschrieben hergestellten Turbinenschaufeln ergibt sich zur Bereitstellung von Laufschaufeln in einem Niederdruckbereich, insbesondere der Endstufe, einer Dampfturbine.

Patentansprüche

1. Turbinenschaufel, insbesondere Laufschaufel einer Dampfturbine, **dadurch gekennzeichnet**, dass zumindest ein Abschnitt der Turbinenschaufel (**10**) durch ein Faserverbundmaterial (**16**) mit einer Matrix und darin eingebetteten Fasern gebildet ist und die Matrix darin und/oder daran verteilt angeordnete Nanopartikel aufweist.

2. Turbinenschaufel nach Anspruch 1, wobei das Fasermaterial (**16**) zumindest einen Abschnitt der Oberfläche der Turbinenschaufel (**10**) ausbildet.

3. Turbinenschaufel nach Anspruch 1 oder 2, wobei im Wesentlichen die gesamte Oberfläche der Turbinenschaufel (**10**) durch das Faserverbundmaterial (**16**) ausgebildet ist.

4. Turbinenschaufel nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei das Faserverbundmaterial (**16**) eine äußere Faserverbundschicht auf einem Kern (**18**) der Turbinenschaufel (**10**) ist.

5. Turbinenschaufel nach Anspruch 4, wobei der Kern (**18**) aus einem von dem Faserverbundmaterial (**16**) sich unterscheidenden weiteren Faserverbundmaterial besteht.

6. Turbinenschaufel nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Fasern des Faserverbundmaterials (**16**) jeweils eine Länge im Bereich von 1 bis 10 cm, insbesondere 1 bis 5 cm besitzen.

7. Turbinenschaufel nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Fasern des Faserverbundmaterials (**16**) ungeordnet in der Matrix eingebettet sind.

8. Turbinenschaufel nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei der Anteil der Fasern im Faserverbundmaterial (**16**) im Bereich von 20 bis 70 Vol.-%, insbesondere 30 bis 60 Vol.-% liegt.

9. Turbinenschaufel nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei Glasfasern in der Matrix des Faserverbundmaterials (**16**) eingebettet sind.

10. Turbinenschaufel nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Nanopartikel im Wesentlichen homogen in der Matrix des Faserverbundmaterials (**16**) verteilt angeordnet sind und/oder im Wesentlichen homogen an einer Oberfläche der Matrix des Faserverbundmaterials (**16**) verteilt angeordnet sind.

11. Turbinenschaufel nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei der Anteil der Nanopartikel in der Matrix des Faserverbundmaterials (**16**) kleiner als 30 Gew.-% ist, insbesondere im Bereich von

5 bis 20 Gew.-% liegt.

12. Turbinenschaufel nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei der Anteil der Nanopartikel an einer Oberfläche der Matrix größer als 70 Gew.-% ist, insbesondere im Bereich von 90 bis 100 Gew.-% liegt.

13. Turbinenschaufel nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei das Material der Nanopartikel gewählt ist aus der Gruppe bestehend aus Aluminiumoxid, Siliziumcarbid, Siliziumoxid, Zirkonoxid und Titanoxid.

14. Dampfturbine mit wenigstens einer Turbinenschaufel (**10**) nach einem der vorangehenden Ansprüche.

15. Verfahren zur Herstellung einer Turbinenschaufel (**10**), insbesondere Laufschaufel einer Dampfturbine, dadurch gekennzeichnet, dass hierbei zumindest ein Abschnitt der Turbinenschaufel (**10**) durch ein Faserverbundmaterial (**16**) mit einer Matrix und darin eingebetteten Fasern gebildet wird, wobei die Matrix mit darin und/oder daran verteilt angeordneten Nanopartikeln gebildet wird.

16. Verwendung einer Turbinenschaufel (**10**) nach einem der Ansprüche 1 bis 13 und/oder eines Herstellungsverfahrens nach Anspruch 15 für eine Laufschaufel in der Endstufe (**1-2**) einer Dampfturbine (**1**).

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

FIG 1

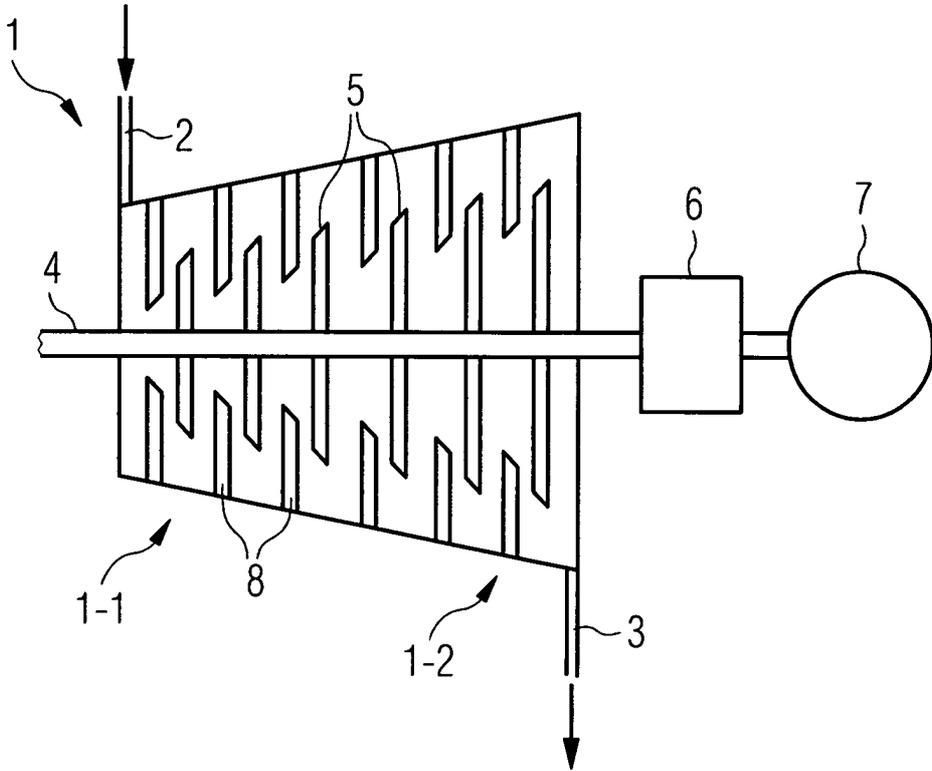


FIG 2

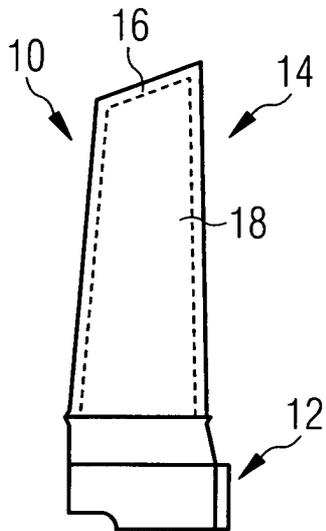


FIG 3

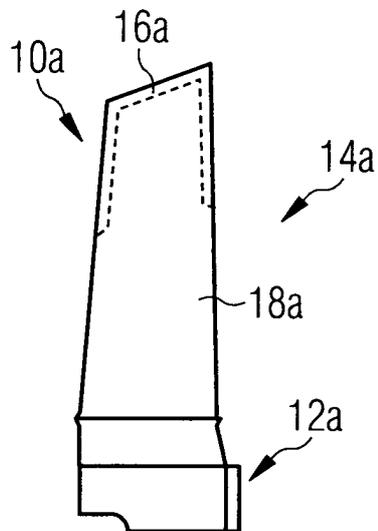


FIG 4

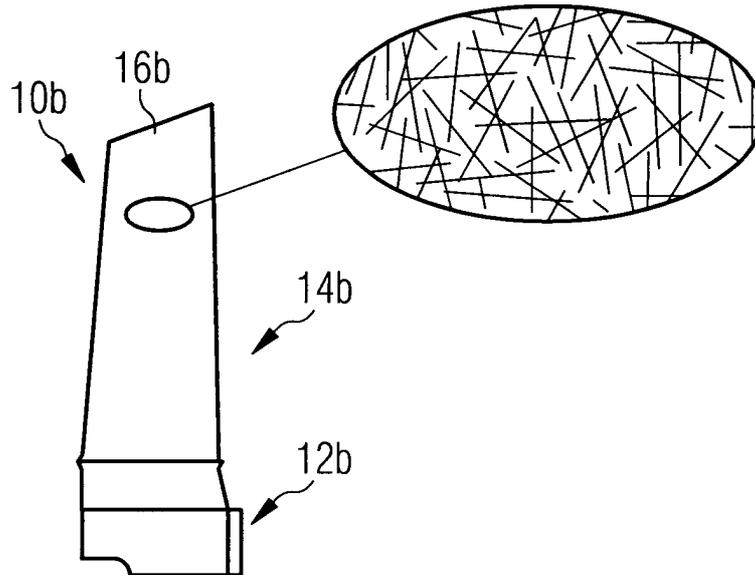


FIG 5

