



(11)

EP 2 623 716 A1

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
07.08.2013 Patentblatt 2013/32

(51) Int Cl.:
F01D 5/16 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **12153627.0**

(22) Anmeldetag: **02.02.2012**

(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

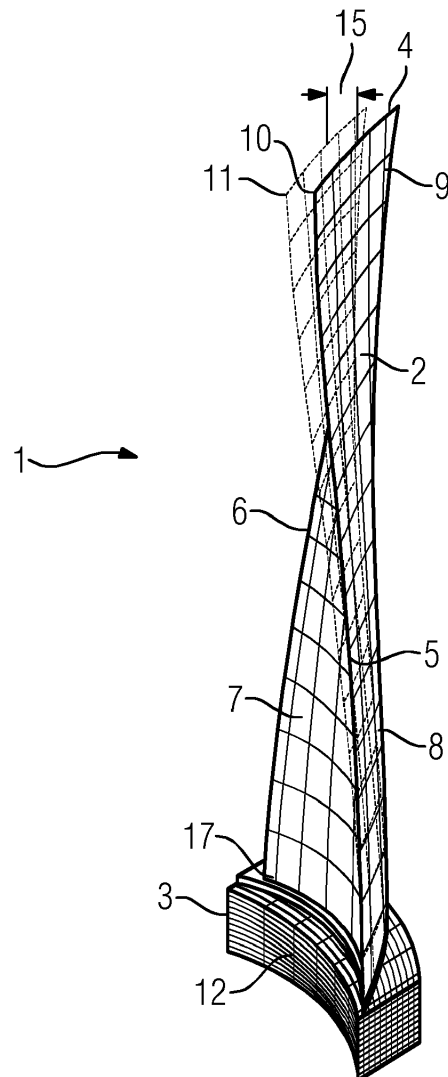
(71) Anmelder: **Siemens Aktiengesellschaft**
80333 München (DE)

(72) Erfinder:
• **Lübbe, Bertold**
45147 Essen (DE)
• **Richter, Christoph Hermann**
49477 Ibbenbüren (DE)

(54) **Verfahren zum Auslegen einer Laufschaufel**

(57) Ein Verfahren zum Auslegen einer Laufschaufel (1) für eine Axialströmungsmaschine weist die Schritte auf: Festlegen einer Schaufelgeometrie und Materialeigenschaften der Laufschaufel (1); Festlegen einer Schwingungsanregung am Schaufelfuß (3) der Laufschaufel (1) als Randbedingung und rechnerisches Bestimmen des auf die Schwingungsanregung folgenden Schwingungsvorgangs der Laufschaufel (1); Bestimmen von modalen Koordinaten durch Zerlegen des Schwingungsvorgangs in eine vorherbestimmte Anzahl der niederfrequentesten Schwingungsmoden; Rechnerisches Bestimmen von Modalspannungstensoren der Laufschaufel (1) für jede der zwei dominanten Schwingungsmoden; Rechnerisches Bestimmen von Spannungstensoren aus den modalen Koordinaten und den Modalspannungstensoren der zwei dominanten Schwingungsmoden; Verändern der Schaufelgeometrie und/oder der Materialeigenschaften derart, dass die modalen Eigenschaften der zwei dominanten Schwingungsmoden derart verändert werden, dass die Spannungen der Spannungstensoren am lebensdauerführenden Ort (15) der Laufschaufel (1) niedriger als die Spannungen der Spannungstensoren am lebensdauerführenden Ort (15) vor dem Verändern sind.

FIG 1



EP 2 623 716 A1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Auslegen einer Laufschaufel.

[0002] Zur Erzeugung von elektrischer Energie in einem Kraftwerk wird herkömmlich ein elektrischer Generator von einer Dampfturbine angetrieben. Die Dampfturbine weist eine Turbinenwelle auf, auf der eine Vielzahl an Laufschaufeln angeordnet ist. Die Turbinenwelle ist zum Antreiben mit der Generatorwelle des Generators gekuppelt. Bei elektrischen Störfällen können Störungen auf die Generatorwelle übertragen werden, die sich bis zur Turbinenwelle fortpflanzen können. Die Störungen können entweder stoßartig, wie beispielsweise bei elektrischen Kurzschlüssen, oder periodisch, wie beispielsweise bei Schiefelasten, auftreten. Die periodischen Störungen treten dabei entweder mit der Netzfrequenz oder mit einem Vielfachen der Netzfrequenz auf.

[0003] Die Störungen können zu Torsionsschwingungen sowohl der Generatorwelle als auch der Turbinenwelle führen. Die Torsionsschwingungen der Turbinenwelle können wiederum Schwingungen der Laufschaufel verursachen. Aufgrund der Schwingungen unterliegt die Laufschaufel einer Spannungsbelastung, die insbesondere am Schaufelfuß groß ist und zu einer Verminderung der Lebensdauer der Laufschaufel führen kann.

[0004] Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zum Auslegen einer Laufschaufel zu schaffen, so dass die Spannungsbelastung der Laufschaufel aufgrund von Schwingungen der Laufschaufel vermindert wird und somit die Lebensdauer der Laufschaufel lang ist.

[0005] Das erfindungsgemäße Verfahren zum Auslegen einer Laufschaufel für eine Axialströmungsmaschine weist die Schritte auf: Festlegen einer Schaufelgeometrie und Materialeigenschaften der Laufschaufel; Festlegen einer Schwingungsanregung am Schaufelfuß der Laufschaufel als Randbedingung und rechnerisches Bestimmen des auf die Schwingungsanregung folgenden Schwingungsvorgangs der Laufschaufel; Bestimmen von modalen Koordinaten durch Zerlegen des Schwingungsvorgangs in eine vorherbestimmte Anzahl der niederfrequentesten Schwingungsmoden; Rechnerisches Bestimmen von Modalspannungssensoren der Laufschaufel für jede der zwei dominanten Schwingungsmoden; Rechnerisches Bestimmen von Spannungssensoren aus den modalen Koordinaten und den Modalspannungssensoren der zwei dominanten Schwingungsmoden; Verändern der Schaufelgeometrie und/oder der Materialeigenschaften derart, dass die modalen Eigenschaften der zwei dominanten Schwingungsmoden derart verändert werden, dass die Spannungen der Spannungssensoren am lebensdauerführenden Ort der Laufschaufel niedriger als die Spannungen der Spannungssensoren am lebensdauerführenden Ort vor dem Verändern sind.

[0006] Der Schwingungsvorgang lässt sich sowohl mit einer periodischen als auch mit einer stoßartigen Anregung rechnerisch bestimmen. Der rechnerisch bestimm-

te Schwingungsvorgang lässt sich durch eine Linearkombination in eine Mehrzahl von Schwingungsmoden zerlegen. Dabei weist jede der Schwingungsmoden eine charakteristische Eigenfrequenz auf. Die Koeffizienten der Linerkombination werden in den modalen Koordinaten gesammelt. Bei der Zerlegung des Schwingungsvorgangs in die Schwingungsmoden ist darauf zu achten, dass das Design der Schaufel die zwei dominanten Moden des Schwingungsvorgangs in ihren modalen Koordinaten mit entgegengesetzten Vorzeichen darstellt. Die zwei dominanten Schwingungsmoden weisen die betragsmäßig größten modalen Koordinaten auf. Gemäß der Erfindung werden die Modalspannungssensoren für jede der zwei dominanten Schwingungsmoden berechnet. In dem darauf folgenden Schritt wird die Überlagerung der Modalspannungssensoren der zwei Schwingungsmoden mit Hilfe der modalen Koordinaten rechnerisch bestimmt, wodurch die Spannungssensoren erhalten werden. Durch die entgegengesetzten Vorzeichen der zwei modalen Koordinaten heben sich die zwei Modalspannungssensoren bei der Überlagerung an gewissen Stellen der Laufschaufel zumindest teilweise auf, insbesondere am Schaufelfuß, so dass die Spannungen der Spannungssensoren gering sind.

[0007] Gemäß der Erfindung wird die Geometrie der Laufschaufel so verändert, dass die modalen Eigenschaften der zwei Schwingungsmoden derart verändert werden, dass die Abschwächung der Spannungen am lebensdauerführenden Ort der Schaufel zu geringeren Spannungen der Spannungssensoren als vor dem Verändern führt. Des Weiteren können die Materialeigenschaften, wie beispielsweise das Elastizitätsmodul, der Laufschaufel verändert werden. Denkbar ist, dass durch Wiederholen der Verfahrensschritte in einem iterativen Prozess die Schaufelgeometrie schrittweise bezüglich der im Schwingungsvorgang auftretenden Spannungen verbessert wird. Durch die Verringerung der Spannungen am lebensdauerführenden Ort ist die Lebensdauer der Laufschaufel vorteilhaft lang.

[0008] Bevorzugt sind die modalen Eigenschaften die Eigenfrequenzen, die Beteiligungsfaktoren und/oder die Modalspannungssensoren. Die Beteiligungsfaktoren geben dabei an, mit welchem Anteil die zwei Schwingungsmoden an dem Schwingungsvorgang beteiligt sind. Die wesentlichen Eigenschaften zur Verminderung der im Schwingungsvorgang auftretenden Spannungen sind die Eigenfrequenzen, weil sie leichter als die anderen Eigenschaften beeinflussbar sind.

[0009] Die Schwingungsanregung ist bevorzugt periodisch und die Eigenfrequenz der niederfrequenten Schwingungsmoden der zwei dominanten Schwingungsmoden niedriger und die Eigenfrequenz der höherfrequenten Schwingungsmoden der zwei dominanten Schwingungsmoden höher als die Frequenz der Schwingungsanregung ist. Somit ist vorteilhaft sichergestellt, dass es im Betrieb der die Laufschaufel aufweisenden Strömungsmaschine nicht zu einer Schwingungsanregung der Laufschaufel in einer ihrer Eigenfrequenzen

kommt.

[0010] Die Schwingungsanregung ist bevorzugt eine tangentielle Fußpunktbeschleunigung, wodurch eine im Betrieb der Strömungsmaschine auftretende Rotorstrangschwingung simuliert wird. Es ist bevorzugt, dass beim rechnerischen Bestimmen des Schwingungsvorgangs am Schauffelfuß ein festes Ende als Randbedingung vorgegeben wird. Bevorzugtermaßen ist der lebensdauerführende Ort der am stärksten spannungsbelastete Ort der Laufschaufel, insbesondere ein Ort am Schauffelfuß. Das rechnerische Bestimmen des Schwingungsvorgangs, der Modalspannungstensoren und/oder der Spannungstensoren erfolgt bevorzugtermaßen durch eine Finite Elemente Methode. Bevorzugtermaßen werden beim rechnerischen Bestimmen des Schwingungsvorgangs, der Modalspannungstensoren und/oder der Spannungstensoren die im Betrieb der Laufschaufel auftretenden Fliehkräfte mit berücksichtigt.

[0011] Die Zerlegung des Schwingungsvorgangs erfolgt bevorzugt in die mindestens zehn niederfrequente- sten Schwingungsmoden. Es hat sich überraschend ergeben, dass bei der Verwendung von zehn Schwingungsmoden bei der Zerlegung des Schwingungsvorgangs eine ausreichend hohe Genauigkeit beim rechnerischen Bestimmen der modalen Koordinaten erhalten wird.

[0012] Es ist bevorzugt, dass die Spannungen rechnerisch bestimmte Vergleichsspannungen sind, insbesondere Mises-Vergleichsspannungen. Vergleichsspannungen sind vorteilhaft gute Maße für die Spannungsbelastung der Laufschaufel und sind zudem anschaulichere Größen als die Spannungstensoren. Die Amplituden der Spannungen werden bevorzugt über eine oder mehrere Perioden der zwei dominanten Schwingungsmoden gemittelt.

[0013] Im Folgenden wird anhand der beigefügten schematischen Zeichnungen die Erfindung näher erläutert. Die Figuren zeigen eine perspektivische Ansicht einer Laufschaufel. Es zeigt

Figur 1 die Laufschaufel im Ruhezustand sowie in einem Zustand während des Schwingungsvorgangs in der ersten Schwingungsmoden und

Figur 2 die Laufschaufel im Ruhezustand sowie in einem Zustand während des Schwingungsvorgangs in der zweiten Schwingungsmoden.

[0014] Wie es aus Figuren 1 und 2 ersichtlich ist, weist eine Laufschaufel 1 ein Schaufelblatt 2 auf, welches an einem Schauffelfuß 3 fest angebracht ist und eine Vorderkante 5, eine Hinterkante 6 sowie eine vom Schauffelfuß 3 abgewandte Schauffelspitze 4 aufweist. Die zwei Seitenflächen der Laufschaufel 1 sind als eine Druckseite 7 und als eine Saugseite 8 bezeichnet. Im Betrieb ist die Laufschaufel 1 mit ihrem Schauffelfuß 3 fest an einer Welle (in den Figuren nicht gezeigt) einer Strömungsmaschine angebracht. Durch Torsionsschwingungen der Welle

kann die Laufschaufel 1 in einen Schwingungsvorgang versetzt werden.

[0015] Zum Berechnen des Schwingungsvorgangs ist die Laufschaufel 1 in eine Vielzahl von Finiten Elementen 9 unterteilt. Als Randbedingung zum Berechnen des Schwingungsvorgangs ist der Schauffelfuß 3 als ein festes Ende vorgegeben, wohingegen die Schauffelspitze 4 als ein loses Ende vorgegeben ist. Als Schwingungsanregung ist eine Beschleunigung vorgegeben, die an einem Punkt des Schauffelfußes 3 angreift und tangential zur Oberfläche der Welle gerichtet ist. Die Schwingungsanregung kann sowohl stoßartig, d.h. als einmaliges Ereignis, als auch periodisch als Randbedingung zum Berechnen des Schwingungsvorgangs vorgegeben werden. Im Falle der periodischen Schwingungsanregung ist die Frequenz der Schwingungsanregung die Netzfrequenz oder ein ganzzahliges Vielfaches der Netzfrequenz.

[0016] In Figur 1 ist der Schwingungsvorgang der Laufschaufel 1 nach der ersten Schwingungsmoden dargestellt. Die erste Schwingungsmoden ist durch die niederfrequente Eigenfrequenz der Laufschaufel 1 charakterisiert. Figur 1 zeigt die Laufschaufel 1 in ihrer Ruhelage 10 (durchgezogene Linien) sowie eine ausgelenkte Laufschaufel 11 (gestrichelte Linien). Der Schwingungsvorgang gemäß der ersten Schwingungsmoden ist durch einen Schwingungsknoten 12 am Schauffelfuß 3 charakterisiert. Die Auslenkung 15 der Laufschaufel 1 ist an der Schauffelspitze 4 maximal.

[0017] In Figur 2 ist der Schwingungsvorgang der Laufschaufel 1 nach der zweiten Schwingungsmoden dargestellt. Die zweite Schwingungsmoden ist dabei die Schwingungsmoden mit der zweitniedrigsten Eigenfrequenz der Laufschaufel 1. Ebenfalls dargestellt ist die Ruhelage 10 (durchgezogene Linien) der Laufschaufel 1 sowie eine ausgelenkte Laufschaufel 11 (gestrichelte Linien). Der Schwingungsvorgang nach der zweiten Schwingungsmoden ist durch zwei Schwingungsknoten charakterisiert, nämlich einen ersten Schwingungsknoten 12 am Schauffelfuß 3 und einen zweiten Schwingungsknoten 14, der radial etwas außenseitig von der Mitte des Schaufelblatts 2 in radialer Richtung angeordnet ist. Zwischen dem ersten Schwingungsknoten 13 und dem zweiten Schwingungsknoten 14 ist ein Schwingungsbauch 16 ausgebildet. In dem hier dargestellten Beispiel sind die erste und die zweite Schwingungsmoden die dominanten Schwingungsmoden.

[0018] Die ausgelenkten Laufschaufeln 11 aus Figuren 1 und 2 sind zu einem gleichen Zeitpunkt des Schwingungsvorgangs aufgenommen. Bei einem Vergleich der ausgelenkten Laufschaufeln 11 aus Figuren 1 und 2 fällt auf, dass die Auslenkungen 15 der Laufschaufeln 1 an der Schauffelspitze 4 nach entgegengesetzten Seiten zur Ruhelage 10 erfolgen. Die Spannungen der ersten und der zweiten Schwingungsmoden führen bei einer Überlagerung der beiden Schwingungsmoden zumindest zu einer teilweisen Aufhebung der Spannungen an der Vorderkante 5 und/oder an der Hinterkante 6 im Bereich des

Schauelfußes 3. Die Vorderkante 5 und die Hinterkante 6 im Bereich des Schauelfußes 3 sind die Stellen der Laufschaufel 1, die bei einem Schwingungsvorgang am stärksten spannungsbelastet sind, d.h. es handelt sich hier um die lebensdauerführenden Orte 17 der Laufschaufel 1.

[0019] Das Verfahren zum Auslegen der Laufschaufel 1 ist wie folgt durchzuführen: Festlegen einer Schaufelgeometrie und Materialeigenschaften der Laufschaufel 1; Festlegen der Schwingungsanregung am Schauelfuß 3 der Laufschaufel 1 als eine periodisch auftretende tangentiale Fußpunktbeschleunigung als Randbedingung und rechnerisches Bestimmen des auf die Schwingungsanregung folgenden Schwingungsvorgangs der Laufschaufel 1 durch eine Finite Elemente 9 Methode, wobei als weitere Randbedingung der Schauelfuß als ein festes Ende vorgegeben wird; Bestimmen von modalen Koordinaten durch Zerlegen des Schwingungsvorgangs in die zehn niederfrequentesten Schwingungsmoden; Rechnerisches Bestimmen von Modalspannungssensoren der Laufschaufel 1 für jede der zwei niederfrequentesten Schwingungsmoden; Rechnerisches Bestimmen von Spannungssensoren aus den modalen Koordinaten und den Modalspannungssensoren der zwei niederfrequentesten Schwingungsmoden; Verändern der Schaufelgeometrie und/oder der Materialeigenschaften derart, dass die Eigenfrequenzen der zwei niederfrequentesten Schwingungsmoden derart verändert werden, dass die Spannungen der Spannungssensoren am Schauelfuß 3 der Laufschaufel 1 niedriger als die Spannungen der Spannungssensoren am Schauelfuß 3 vor dem Verändern sind, wobei die Spannungen rechnerisch bestimmte Vergleichsspannungen, insbesondere Mises-Vergleichsspannungen sind, die über eine Periode der niederfrequentesten Schwingungsmoden gemittelt sind.

[0020] Obwohl die Erfindung im Detail durch das bevorzugte Ausführungsbeispiel näher illustriert und beschrieben wurde, so ist die Erfindung nicht durch die offenbarten Beispiele eingeschränkt und andere Variationen können vom Fachmann hieraus abgeleitet werden, ohne den Schutzzumfang der Erfindung zu verlassen.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Auslegen einer Laufschaufel (1) für eine Axialströmungsmaschine mit den Schritten:

- Festlegen einer Schaufelgeometrie und Materialeigenschaften der Laufschaufel (1);
- Festlegen einer Schwingungsanregung am Schauelfuß (3) der Laufschaufel (1) als Randbedingung und rechnerisches Bestimmen des auf die Schwingungsanregung folgenden Schwingungsvorgangs der Laufschaufel (1);
- Bestimmen von modalen Koordinaten durch Zerlegen des Schwingungsvorgangs in eine vorherbestimmte Anzahl der niederfrequentesten

sten Schwingungsmoden;

- Rechnerisches Bestimmen von Modalspannungssensoren der Laufschaufel (1) für jede der zwei dominanten Schwingungsmoden;
- Rechnerisches Bestimmen von Spannungssensoren aus den modalen Koordinaten und den Modalspannungssensoren der zwei dominanten Schwingungsmoden;
- Verändern der Schaufelgeometrie und/oder der Materialeigenschaften derart, dass die modalen Eigenschaften der zwei dominanten Schwingungsmoden derart verändert werden, dass die Spannungen der Spannungssensoren am lebensdauerführenden Ort (15) der Laufschaufel (1) niedriger als die Spannungen der Spannungssensoren am lebensdauerführenden Ort (15) vor dem Verändern sind.

2. Verfahren gemäß Anspruch 1, wobei die modalen Eigenschaften die Eigenfrequenzen, die Beteiligungsfaktoren und/oder die Modalspannungssensoren sind.
3. Verfahren gemäß Anspruch 1 oder 2, wobei die Schwingungsanregung periodisch ist und die Eigenfrequenz der niederfrequenten Schwingungsmoden niedriger und die Eigenfrequenz der höherfrequenten Schwingungsmoden höher als die Frequenz der Schwingungsanregung ist.
4. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei die Schwingungsanregung eine tangentiale Fußpunktbeschleunigung ist.
5. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei beim rechnerischen Bestimmen des Schwingungsvorgangs am Schauelfuß (3) ein festes Ende als Randbedingung vorgegeben wird.
6. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei der lebensdauerführende Ort (15) der am stärksten spannungsbelastete Ort der Laufschaufel (1) ist, insbesondere ein Ort am Schauelfuß (3).
7. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei das rechnerische Bestimmen des Schwingungsvorgangs, der Modalspannungssensoren und/oder der Spannungssensoren durch eine Finite Elemente (9) Methode erfolgt.
8. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei beim rechnerischen Bestimmen des Schwingungsvorgangs, der Modalspannungssensoren und/oder der Spannungssensoren die im Betrieb der Laufschaufel auftretenden Fliehkräfte mit berücksichtigt werden.

9. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei die Zerlegung des Schwingungsvorgangs in die mindestens zehn niederfrequentesten Schwingungsmoden erfolgt.
- 5
10. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei die Spannungen rechnerisch bestimmte Vergleichsspannungen sind, insbesondere Mises-Vergleichsspannungen.
- 10
11. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei die Amplituden der Spannungen über eine oder mehrere Perioden der zwei dominanten Schwingungsmoden gemittelt werden.
- 15
- 20
- 25
- 30
- 35
- 40
- 45
- 50
- 55

FIG 1

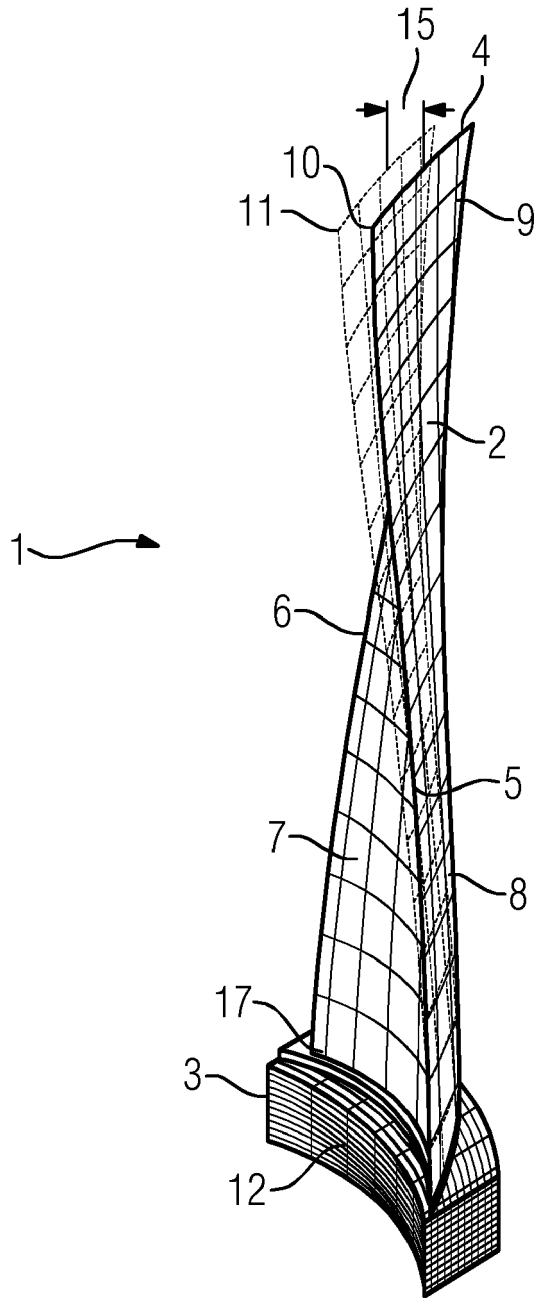
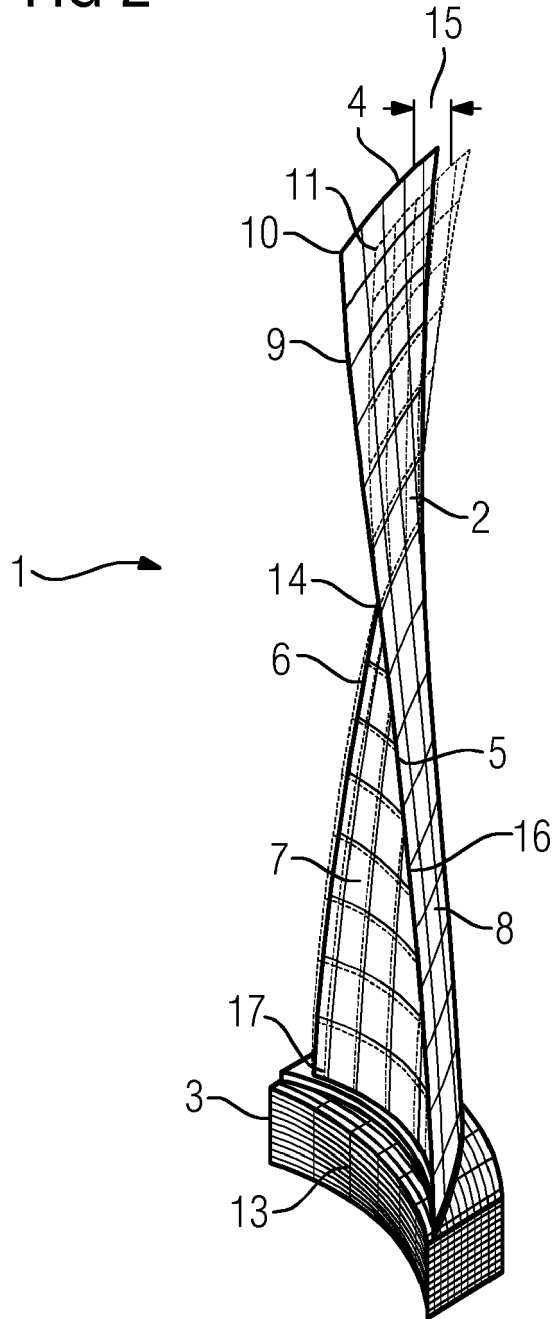


FIG 2





EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung
EP 12 15 3627

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	EP 1 528 223 A2 (ROLLS ROYCE PLC [GB]) 4. Mai 2005 (2005-05-04) * Spalte 9, Absatz 55 - Spalte 16, Absatz 87; Abbildungen 5-9 *	1-11	INV. F01D5/16
X	PANNING ET AL: "Auslegung von Reibelementen zur Schwingungsdämpfung von Turbinenschaufeln", DISSERTATION UNIVERSITÄT HANNOVER,, 1. Januar 2005 (2005-01-01), Seiten 1-226, XP007921084, * Seite 32 - Seite 35 *	1-11	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
			F01D
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
2	Recherchenort München	Abschlußdatum der Recherche 28. September 2012	Prüfer Rau, Guido
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	
X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur			

EPO FORM 1503 03.82 (POAC03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 12 15 3627

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

28-09-2012

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
EP 1528223 A2	04-05-2005	EP 1528223 A2	04-05-2005
		US 2005096891 A1	05-05-2005
		US 2009055146 A1	26-02-2009

EPO FORM P0461

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