

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
02. November 2017 (02.11.2017)

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2017/186492 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
F01D 5/16 (2006.01) **G06F 17/50 (2006.01)**

(72) Erfinder: PEEREN, Christian; Alt-Stralau 44, 10245 Berlin (DE). SCHMITT, Stefan; Erlenweg 77, 45481 Mülheim an der Ruhr (DE). STÜER, Heinrich; Antruper Str. 24, 45721 Haltern (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2017/058776

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(22) Internationales Anmeldedatum: 12. April 2017 (12.04.2017)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
16167260.5 27. April 2016 (27.04.2016) EP

(71) Anmelder: SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT [DE/DE]; Werner-von-Siemens-Straße 1, 80333 München (DE).

(54) Title: METHOD FOR PROFILING BLADES OF AN AXIAL TURBOMACHINE

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUM PROFILIEREN VON SCHAUFELN EINER AXIALSTRÖMUNGSMASCHINE

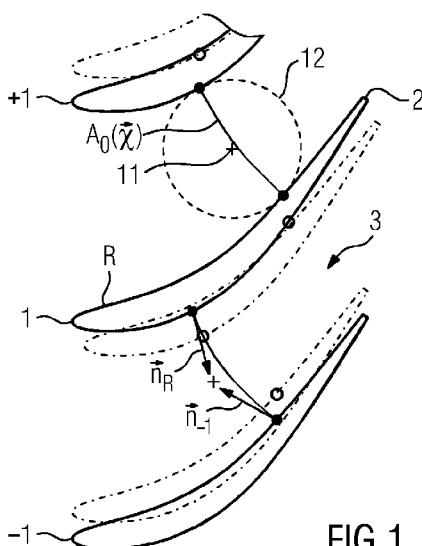


FIG 1

(AA) $p(\bar{x}, t)$

(BB) $A(\bar{x}, t)$

(CC) \bar{x}

(57) Abstract: The invention relates to a method for profiling blades of an axial turbomachine, having the steps of: a) preparing a geometric model of a blade profile (R , -1 , $+1$); b) determining an oscillation mode of the geometric model; c) calculating a time profile of a position-dependent disruptive pressure (AA) in a channel (3) between two adjacent blade profiles over an oscillation period of the oscillation belonging to the oscillation mode, wherein in order to calculate the profile it is assumed that the position-dependent disruptive pressure (AA) in the channel (3) is proportional to the magnitude of a surface (BB) which extends in the channel and is arranged perpendicular to the flow lines between blade surfaces bounding the channel (3), and perpendicular to these blade surfaces, wherein (CC) is a coordinate on the blade surface and t is time; d) determining the damping of the vibration caused by the disruptive pressure profile; d) changing the geometric model and determining a different oscillation mode for the modified geometric model, and carrying out step c) with the modified geometric model and the different vibration mode; e) determining the damping of the oscillation using the disruptive pressure profile (AA) calculated in step d) and accepting the modified geometric model for the case that the damping of the oscillation turns out to be greater than in step c), otherwise repeating steps d) and e) with another modified geometric model.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Profilieren von Schaufeln einer Axialströmungsmaschine, mit den Schritten: a) Bereitstellen eines geometrischen Modells eines Schaufelprofils (R , -1 , $+1$); b) Ermitteln einer Schwingungsform des geometrischen Modells; c) Berechnen eines zeitlichen Verlaufs eines ortsabhängigen Stördrucks (AA) in einem Kanal (3) zwischen zwei benachbart angeordneten Schaufelprofilen über eine Schwingungsperiode der zu der Schwingungsform gehörigen Schwingung, wobei zum Berechnen des Verlaufs angenommen wird, dass der ortsabhängige Stördruck (AA) in dem Kanal (3) proportional zu der Größe einer Fläche (BB) ist, die in dem Kanal sich erstreckt und auf den den Kanal (3) begrenzenden Schaufeloberflächen senkrecht zu diesen Schaufeloberflächen und

(84) **Bestimmungsstaaten** (*soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart*): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

dazwischen senkrecht zu den Strömungslinien angeordnet ist, wobei (CC) eine Koordinate auf der Schaufeloberfläche und t die Zeit ist; d) Bestimmen der durch den Stördruckverlauf hervorgerufenen Dämpfung der Schwingung; d) Verändern des geometrischen Modells und ermitteln einer veränderten Schwingungsform für das veränderte geometrische Modell sowie Durchführen von Schritt c) mit dem veränderten geometrischen Modell und der veränderten Schwingungsform; e) Bestimmen der Dämpfung der Schwingung durch den in Schritt d) berechneten Stördruckverlauf (AA) und Akzeptieren des veränderten geometrischen Modells für den Fall, dass die Dämpfung der Schwingung stärker als in Schritt c) ausfällt, ansonsten Wiederholen der Schritte d) und e) mit einem anderen veränderten geometrischen Modell.

Beschreibung

Verfahren zum Profilieren von Schaufeln einer Axialströmungsmaschine

5

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Profilieren von Schaufeln einer Axialströmungsmaschine.

- Der Trend bei der Auslegung von Schaufeln für eine Axialströmungsmaschine geht dahin, das Aspektverhältnis der Schaufeln zu erhöhen und die Schaufeln dünner auszuführen. Die derart ausgelegten Schaufeln neigen dazu im Betrieb der Axialströmungsmaschine zu flattern. Bei dem Flattern handelt es sich um eine selbsterregte Schwingung bei der Eigenfrequenz der Schaufel. Bei dieser Schwingung kann es sich um eine Longitudinalschwingung der Schaufel mit einem Schwingungsknoten an dem Fuß der Schaufel handeln. Dabei wird Energie von dem in der Axialströmungsmaschine strömenden Fluid auf die Schaufel übertragen. Das Flattern kann bei einem wiederholten Lastwechsel der Axialströmungsmaschine zu einer Materialermüdung der Schaufel führen (englisch: high cycle fatigue). Die Materialermüdung kann zu der Bildung eines Risses führen und einen kostenintensiven Tausch der Schaufel erforderlich machen.
- Herkömmlich wird das Flattern unterbunden, indem die auf die Schaufel wirkende Last vermindert wird. Dies führt jedoch nachteilig zu einer Verminderung des Wirkungsgrades der Axialströmungsmaschine. Außerdem werden herkömmlich Dämpfungselemente vorgesehen, wie beispielsweise ein Deckband, was das Flattern der Schaufeln dämpft. Dies stellt jedoch eine konstruktiv aufwändige Lösung dar. Daher wäre es wünschenswert die Schaufel derart auszulegen, dass sie im Betrieb der Axialströmungsmaschine nicht zum Flattern neigt.
- Herkömmlich wird die Schaufel derart ausgelegt, dass in einem Vorauslegungsverfahren zuerst ein Schaufelprofil hinsichtlich der reduzierten Frequenz und des 0D Strouhal Kriteriums bewertet wird. Nach dem Vorauslegungsverfahren werden die ak-

zeptierten Schaufelprofile in einer aufwändigen numerischen Schwingungssimulation bewertet. Die anhand der reduzierten Frequenz und des Strouhal Kriteriums bewerteten akzeptierten Schaufelprofile weisen jedoch in der Schwingungssimulation oftmais ein unakzeptables Flatterverhalten auf. Dies führt dazu, dass für viele verschiedene Schaufelprofile das Vorauslegungsverfahren und die numerische Schwingungssimulation wiederholt werden muss, was zeitaufwändig und kostenintensiv ist.

10

Aufgabe der Erfindung ist es daher, ein Verfahren zum Profilieren einer Schaufel einer Axialströmungsmaschine zu schaffen, welches wenig zeitaufwändig und wenig kostenintensiv ist.

15

Das erfindungsgemäße Verfahren zum Profilieren von Schaufeln einer Axialströmungsmaschine weist die Schritte auf: a) Bereitstellen eines geometrischen Modells eines Schaufelprofils; b) Ermitteln einer Schwingungsform des geometrischen Modells; c) Berechnen eines zeitlichen Verlaufs eines ortsabhängigen Stördrucks $p(\bar{x}, t) = p_{\text{ges}}(\bar{x}, t) - p_0(\bar{x})$ in einem Kanal zwischen zwei benachbart angeordneten Schaufelprofilen über eine Schwingungsperiode der zu der Schwingungsform gehörigen Schwingung, wobei zum Berechnen des Verlaufs angenommen wird, dass der ortsabhängige Stördruck $p(\bar{x}, t)$ in dem Kanal proportional zu der Größe einer Fläche $A(\bar{x}, t)$ ist, die in dem Kanal sich erstreckt und auf den zwei den Kanal begrenzenden Schaufeloberflächen senkrecht zu diesen Schaufeloberflächen und dazwischen senkrecht zu den Strömungslinien angeordnet ist, wobei \bar{x} eine Koordinate auf einer der zwei Schaufeloberflächen, t die Zeit, $p_0(\bar{x})$ der ortsabhängige Druck bei still stehenden Schaufelprofilen und $p_{\text{ges}}(\bar{x}, t)$ der ortsabhängige Gesamtdruck ist; d) Bestimmen der durch den Stördruckverlauf hervorgerufenen Dämpfung der Schwingung; d) Verändern des geometrischen Modells und ermitteln einer veränderten Schwingungsform für das veränderte geometrische Modell sowie Durchführen von Schritt c) mit dem veränderten geometrischen Modell und der veränderten Schwingungsform; e) Bestimmen der

Dämpfung der Schwingung durch den in Schritt d) berechneten Stördruckverlauf $p(\bar{x}, t)$ und Akzeptieren des veränderten geometrischen Modells für den Fall, dass die Dämpfung der Schwingung stärker als in Schritt c) ausfällt, ansonsten wiederholen der Schritte d) und e) mit einem anderen veränderten geometrischen Modell.

Insbesondere aufgrund der Annahme, dass der Stördruck in dem Kanal proportional zu der Fläche $A(\bar{x}, t)$ ist, ist das Verfahren wenig rechenintensiv. Die Annahme ist gültig für unendlich langsam schwingende Schaufelprofile. Überraschenderweise wurde trotz dieser Annahme gefunden, dass das akzeptierte geometrische Modell in einer anschließenden numerischen Schwingungssimulation gute Dämpfungseigenschaften zeigt. Daher ist es nicht erforderlich eine große Anzahl an den numerischen Schwingungssimulationen durchzuführen. Aufgrund des wenig rechenintensiven Verfahrens und der geringen Anzahl an den durchzuführenden numerischen Schwingungssimulationen ist das Verfahren vorteilhaft wenig aufwändig und wenig kostenintensiv.

Bevorzugt weist das Verfahren den Schritt auf: f) Numerisches Berechnen der anhand einer Strömung hervorgerufenen Schwingung des in Schritt e) akzeptierten geometrischen Modells und Berechnen der Dämpfung der Schwingung. Bei dem Verfahrensschritt f) handelt es um die vorgenannte numerische Schwingungssimulation. Die hier berechnete Dämpfung der Schwingung ist genauer als die in dem Verfahrensschritt d) bestimmte. Es ist hierbei bevorzugt, dass in dem Schritt f) die Konvektion und die Trägheit der Strömung berücksichtigt werden. Dadurch kann die Genauigkeit bei der Bestimmung der Dämpfung noch weiter gesteigert werden.

Es ist bevorzugt, dass die Schwingungsform in komplexer Form dargestellt wird: $\vec{\phi} = \vec{a}_c + i\vec{a}_s$, wobei $\vec{\phi}$ die Schwingungsform ist, \vec{a}_c und \vec{a}_s lokale Verformungen sind. Es ist hierbei bevorzugt, dass \vec{a}_c und \vec{a}_s mittels eines Finiten Elemente Strukturlösers bereitgestellt werden.

Es ist bevorzugt, dass $A(\vec{x}, t)$ dargestellt wird gemäß $A(\vec{x}, t) = A_0(\vec{x}) + \operatorname{Re}[(\hat{A}_l e^{i\beta_l} e^{i\sigma} + \hat{A}_R e^{i\beta_R}) e^{i\omega t}]$, wobei $A_0(\vec{x})$ die Fläche $A(\vec{x}, t)$ bei still stehenden Schaufelprofilen, $\hat{A}_R = |\vec{n}_R \cdot \vec{\phi}|_R$ die Projektion der Schwingungsform auf die Normale \vec{n}_R der Schaufeloberfläche bei der Koordinate \vec{x} für das eine Schaufelprofil,

$\hat{A}_l = |\vec{n}_l \cdot \vec{\phi}|_l$ die Projektion der Schwingungsform auf die Normale \vec{n}_l der Schaufeloberfläche bei einem Punkt auf der Schaufeloberfläche des anderen Schaufelprofils, β_l und β_R der jeweilige Phasenversatz zwischen dem Imaginärteil und dem Realteil, σ der Phasenversatz der Schwingungen der beiden Schaufelprofile und ω die Kreisfrequenz ist. Dies beinhaltet als Näherung, dass sich das Schaufelprofil während der Schwingung senkrecht zu seiner Schaufeloberfläche bewegt. Diese Näherung ist insbesondere gültig bei kleinen Auslenkungen der Schaufel während ihrer Schwingung. Durch diese Näherung ist das Verfahren vorteilhaft wenig rechenintensiv. Trotz dieser Näherung hat das akzeptierte geometrische Modell vorteilhaft gute Dämpfungseigenschaften.

Es ist bevorzugt, dass $A_0(\vec{x})$ bestimmt wird, indem bei der Koordinate \vec{x} auf der Schaufeloberfläche des einen Schaufelprofils ein Kreis gefunden wird, der die Schaufeloberfläche des einen Schaufelprofils bei der Koordinate \vec{x} und die

Schaufeloberfläche des anderen Schaufelprofils in dem Punkt tangiert, und $A_0(\vec{x})$ derart gewählt wird, dass $A_0(\vec{x})$ von der Normalen \vec{n}_R bei der Koordinate \vec{x} und von der Normalen \vec{n}_l an dem Punkt tangiert wird. Dies stellt vorteilhaft einen einfachen Verfahrensschritt zum Bestimmen der Fläche $A_0(\vec{x})$ dar.

Zusammen mit der Annahme, dass die Schaufelprofile sich während der Schwingung normal zur Schaufeloberfläche bewegen, ist die zeitliche Änderung der Fläche $A_0(\vec{x}, t)$ genau definiert. $A_0(\vec{x})$ wird bevorzugt bestimmt durch Interpolieren einer Funktion, insbesondere ein Polynom zweiten Grades, zwischen der Koordinate \vec{x} und dem Punkt. Dies stellt ein besonders einfaches Verfahren zum Bestimmen der Fläche $A_0(\vec{x})$ dar. Beispielsweise ist es dadurch nicht erforderlich eine Strö-

nungssimulation zum Bestimmen der Strömungslinien durchzuführen. Trotz dieses einfachen Verfahrens zum Bestimmen der Fläche $A_0(\vec{x})$ hat das akzeptierte geometrische Modell vorteilhaft gute Dämpfungseigenschaften.

5

Es ist bevorzugt, dass in Schritt d) die Dämpfung der Schwingung für verschiedene Werte für β_1 , β_R und σ bestimmt wird. Dadurch lässt sich die Zeitabhängigkeit der Fläche $A_0(\vec{x}, t)$ bestimmen. Ferner ist es bevorzugt, dass in Schritt d) eine Integration des ortsabhängigen Stördrucks entlang des vollständigen Kanals vorgenommen wird.

Im Folgenden wird anhand der beigefügten schematischen Zeichnungen die Erfindung näher erläutert. Es zeigen

15

Figur 1 einen Querschnitt durch drei benachbart angeordnete Schaufeln,

Figur 2 ein Detail aus Figur 1,

20

Figur 3 eine Darstellung eines Kanals zwischen zwei benachbart angeordneten Schaufeln,

Figur 4 eine Darstellung einer Schwingungsform einer Schaufel und

Figur 5 einen Dämpfungsverlauf über eine Schwingungsperiode für verschiedene reduzierte Frequenzen.

30

Eine Axialströmungsmaschine, wie beispielsweise eine Gasturbine oder eine Dampfturbine, weist Reihen von Schaufeln auf. Bei den Schaufeln kann es sich um Leitschaufeln und/oder Laufschaufeln handeln, die in einem Verdichter und/oder in einer Turbine angeordnet sind. Figur 1 zeigt drei in einer Reihe benachbart angeordnete Schaufeln. Dargestellt ist jeweils ein geometrisches Modell eines Schaufelprofils für jede der drei Schaufeln. Das mittlere Schaufelprofil ist als ein Referenzschaufelprofil R und die beiden zu dem Referenzschauf-

35

felprofil R benachbarten Schaufelprofile sind als ein erstes benachbartes Schaufelprofil +1 und als ein zweites benachbartes Schaufelprofil -1 bezeichnet. Jedes der Schaufelprofile R, -1, +1 weist jeweils eine Vorderkante 1 und eine Hinterkante 2 auf. Zwischen zwei benachbart angeordneten Schaufelprofilen ist jeweils ein Kanal 3 angeordnet, in dem im Betrieb der Axialströmungsmaschine ein Arbeitsfluid strömt. Die durchgezogenen Linien in Figur 1 stellen die Schaufelprofile R, +1, -1 in ihrem still stehenden Zustand dar. Die gestrichelten Linien stellen die Schwingung der Schaufelprofile R, +1, -1 dar, wobei das erste benachbarte Schaufelprofil +1 und das zweite benachbarte Schaufelprofil -1 eine gleiche Schwingungsphase haben, die zu der Schwingungsphase des Referenzschaufelprofils R versetzt ist.

15

In dem Verfahren zum Profilieren der Schaufel wird in einem Schritt a) das geometrische Modell des Schaufelprofils R, -1, +1 bereitgestellt, wobei die Schaufelprofile R, -1, +1 in einer Reihe von Schaufeln identisch sind.

20

In einem Schritt b) wird die Schwingungsform $\vec{\phi}$ des geometrischen Modells ermittelt. Wie es aus Figur 4 ersichtlich ist, kann die Schwingungsform $\vec{\phi}$ in komplexer Form gemäß $\vec{\phi} = \vec{a}_c + i\vec{a}_s$ dargestellt werden, wobei \vec{a}_c und \vec{a}_s lokale Verformungen sind.

25

Die Schwingungsform ergibt sich dann als Überlagerung dieser beiden Formen. In Figur 4 ist diese Überlagerung in einem Zeigerdiagramm 4 dargestellt, wobei der Phasenversatz zwischen Realteil und Imaginärteil mit β bezeichnet ist. \vec{a}_c und \vec{a}_s können mittels eines Finite Elemente Strukturlösers bestimmt werden, wobei der Finite Elemente Strukturlöser als eine Eingabe das Schaufelprofil erhält.

35

In einem Schritt c) wird ein zeitlicher Verlauf eines ortsabhängigen Stördrucks $p(\bar{x}, t)$ in dem Kanal 3 über eine Schwingungsperiode der zu der Schwingungsform gehörigen Schwingung berechnet. \bar{x} ist dabei eine Koordinate auf der Oberfläche einer der beiden benachbarten Schaufelprofilen und t ist die Zeit. Zum Berechnen des Stördrucks $p(\bar{x}, t)$ wird angenommen,

dass der ortsabhängige Stördruck $p(\bar{x}, t)$ in dem Kanal 3 proportional zu der Größe einer Fläche $A(\bar{x}, t)$ ist, die in dem Kanal sich erstreckt und auf den den Kanal 3 begrenzenden Schaufeloberflächen senkrecht zu diesen Schaufeloberflächen 5 und dazwischen senkrecht zu den Strömungslinien angeordnet ist.

Die Näherung, dass der Stördruck $p(\bar{x}, t)$ als proportional zu der Fläche $A(\bar{x}, t)$ angenommen wird, ist in Figur 3 illustriert. Die durchgezogenen Linien in Figur 3 stellen die zwei 10 den Kanal 3 begrenzenden Schaufeloberflächen in ihrem still stehenden Zustand dar. Die gestrichelten Linien stellen die zwei den Kanal 3 begrenzenden Schaufeloberflächen mit einer Auslenkung während ihrer Schwingung dar. Bei einer kleinen 15 Fläche $A(\bar{x}, t)$ ist im Betrieb der Axialströmungsmaschine die Geschwindigkeit des Arbeitsfluids hoch, wodurch ein niedriger Stördruck $p(\bar{x}, t)$ herrscht. Umgekehrt gilt analog, dass bei einer großen Fläche $A(\bar{x}, t)$ im Betrieb der Axialströmungsma- 20 schine die Geschwindigkeit des Arbeitsfluids niedrig ist, wo- durch ein hoher Stördruck $p(\bar{x}, t)$ herrscht.

$A(\bar{x}, t)$ wird dargestellt gemäß $A(\bar{x}, t) = A_0(\bar{x}) + \text{Re} \left[(\hat{A}_L e^{i\beta_L} e^{i\sigma} + \hat{A}_R e^{i\beta_R}) e^{i\alpha\bar{x}} \right]$, wobei $A_0(\bar{x})$ die Fläche $A(\bar{x}, t)$ bei still 25 stehenden Schaufelprofilen ist. $A_0(\bar{x})$ kann, wie in Figur 1 gezeigt, bestimmt werden, indem bei der Koordinate \bar{x} auf der Schaufeloberfläche des einen Schaufelprofils ein Kreis 12 gefunden wird, der die Schaufeloberfläche des einen Schaufel- profils bei der Koordinate \bar{x} und die Schaufeloberfläche des anderen Schaufelprofils in einem Punkt tangiert. Für den 30 Fall, dass mehrere der Kreise 12 gefunden werden können, so wird der Kreis 12 mit dem kürzesten Durchmesser ausgewählt. $A_0(\bar{x})$ wird anschließend derart gewählt, dass $A_0(\bar{x})$ von der Normalen \vec{n}_R auf der Oberfläche des einen Schaufelprofils bei der Koordinate \bar{x} und von der Normalen \vec{n}_L auf der Oberfläche 35 des anderen Schaufelprofils an dem Punkt tangiert wird. Dazu wird $A_0(\bar{x})$ bestimmt durch Interpolieren einer Funktion zwischen der Koordinate \bar{x} und dem Punkt. Beispielsweise kann die Funktion ein Polynom zweiten Grades sein. Wie es aus Fi-

gur 1 ersichtlich ist, weisen beide Normale \vec{n}_R und \vec{n}_l auf den Kreismittelpunkt 11 des Kreises 12, was eine Konsequenz davon ist, dass der Kreis 12 die beiden Schaufeloberflächen in der Koordinate \bar{x} und dem Punkt tangiert.

5

$\hat{A}_R = \left| \vec{n}_R \cdot \vec{\phi} \right|_R$ ist die Projektion der Schwingungsform $\vec{\phi}$ auf die Normale \vec{n}_R der Schaufeloberfläche bei der Koordinate \bar{x} für das eine Schaufelprofil. $\hat{A}_l = \left| \vec{n}_l \cdot \vec{\phi} \right|_l$ ist die Projektion der Schwingungsform $\vec{\phi}$ auf die Normale \vec{n}_l der Schaufeloberfläche bei dem Punkt auf der Schaufeloberfläche des anderen Schaufelprofils. Die jeweiligen Projektionen \hat{A}_R und \hat{A}_l sind in Figur 2 als die Linien von dem jeweiligen Punkt bis zum jeweiligen Ende der Linien dargestellt. β_l und β_R sind der jeweilige Phasenversatz zwischen dem Imaginärteil und dem Realteil. σ ist der Phasenversatz der Schwingungen der beiden Schaufelprofile und ω ist die Kreisfrequenz.

10

15

15

In einem Schritt d) wird die durch den Stördrukverlauf hervorgerufenen Dämpfung der Schwingung bestimmt. Dazu wird der Stördruk mit der Projektion der Schwingungsform auf die Normale der Schaufeloberfläche multipliziert. Das dabei erhaltene Produkt wird über den gesamten Kanal 3 integriert, wodurch sich die Dämpfung ergibt.

25

20

30

In einem Schritt d) wird das geometrische Modell verändert und eine veränderte Schwingungsform für das veränderte geometrische Modell ermittelt. In dem Schritt d) wird zudem Schritt c) mit dem veränderten geometrischen Modell und der veränderten Schwingungsform durchgeführt.

35

In einem Schritt e) wird die Dämpfung der Schwingung durch den in Schritt d) berechneten Stördrukverlauf $p(\bar{x}, t)$ bestimmt. Das veränderte geometrische Modell wird akzeptiert für den Fall, dass die Dämpfung der Schwingung stärker als in Schritt c) ausfällt, ansonsten werden die Schritte d) und e) mit einem anderen veränderten geometrischen Modell wiederholt.

In Schritt d) kann die Dämpfung der Schwingung für verschiedene Werte für β_1 , β_R und σ bestimmt wird, so dass die Zeitabhängigkeit der Fläche $A(\bar{x}, t)$ erhalten.

5

In einem Schritt f) erfolgt ein numerisches Berechnen der anhand einer Strömung hervorgerufenen Schwingung des in Schritt e) akzeptierten geometrischen Modells und ein Berechnen der Dämpfung der Schwingung.

10

Der in Schritt c) berechnete Stördruck $p(\bar{x}, t)$ und die in Schritt d) berechnete Dämpfung stellen eine Näherung für den Fall $k \rightarrow 0$ dar, wobei k die reduzierte Frequenz ist. Die reduzierte Frequenz kann bestimmt werden gemäß $k = \frac{2 * \Pi * c * f}{U}$,

15

wobei f die Frequenz der Schwingung, c die Sehnenlänge des Schaufelprofils und U die Geschwindigkeit des Arbeitsfluids in einer Axialposition der Strömungsmaschine, in der die Vorderkanten 1 der Schaufelprofile liegen, ist. In Figur 5 ist der in Schritt f) berechnete Dämpfungsverlauf über eine

20

Schwingungsperiode für verschiedene reduzierte Frequenzen k dargestellt. Das dem Schritt f) zugrunde liegende geometrische Modell ist ein in dem Schritt e) akzeptiertes geometrisches Modell. Über der Abszisse 5 ist der Phasenwinkel σ und über der Ordinate 6 ist die Dämpfung aufgetragen. Ebenfalls

25

ist in Figur 5 eine Nulllinie 7 der Dämpfung eingetragen, wobei negative Werte für die Dämpfung eine Anregung der Schwingung bedeuten und positive Werte für die Dämpfung eine Dämpfung der Schwingung bedeuten.

30

Figur 5 weist einen Dämpfungswertverlauf 8 bei $k=0,001$, einen Dämpfungswertverlauf 9 bei $k=0,1$ und einen Dämpfungswertverlauf 10 bei $k=0,21$ auf. Der Dämpfungswertverlauf 8 ist aufgrund dessen geringer reduzierter Frequenz vergleichbar mit dem in dem Schritt d) bestimmten. Erkennbar ist, dass mit zunehmender reduzierter Frequenz die Dämpfung der Schwingung zunimmt. Das in Schritt e) akzeptierte geometrische Modell

stellt damit einen guten Ausgangspunkt für die anschließende numerische Simulation der Schwingung dar.

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 Schutzmfang der Erfindung zu verlassen.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Profilieren von Schaufeln einer Axialströmungsmaschine, mit den Schritten:
 - 5 a) Bereitstellen eines geometrischen Modells eines Schaufelprofils ($R, -1, +1$);
 - b) Ermitteln einer Schwingungsform des geometrischen Modells;
 - c) Berechnen eines zeitlichen Verlaufs eines ortsabhängigen Stördrucks $p(\bar{x}, t) = p_{\text{ges}}(\bar{x}, t) - p_0(\bar{x})$ in einem Kanal (3) zwischen
 - 10 zwei benachbart angeordneten Schaufelprofilen über eine Schwingungsperiode der zu der Schwingungsform gehörigen Schwingung, wobei zum Berechnen des Verlaufs angenommen wird, dass der ortsabhängige Stördruck $p(\bar{x}, t)$ in dem Kanal (3) proportional zu der Größe einer Fläche $A(\bar{x}, t)$ ist, die in
 - 15 dem Kanal sich erstreckt und auf den zwei den Kanal (3) begrenzenden Schaufeloberflächen senkrecht zu diesen Schaufeloberflächen und dazwischen senkrecht zu den Strömungslinien angeordnet ist, wobei \bar{x} eine Koordinate auf einer der zwei Schaufeloberflächen, t die Zeit, $p_0(\bar{x})$ der ortsabhängige
 - 20 Druck bei still stehenden Schaufelprofilen und $p_{\text{ges}}(\bar{x}, t)$ der ortsabhängige Gesamtdruck ist;
 - d) Verändern des geometrischen Modells und ermitteln einer veränderten Schwingungsform für das veränderte geometrische Modell sowie Durchführen von Schritt c) mit dem veränderten
 - 25 geometrischen Modell und der veränderten Schwingungsform;
 - e) Bestimmen der Dämpfung der Schwingung durch den in Schritt
 - d) berechneten Stördruckverlauf $p(\bar{x}, t)$ und Akzeptieren des veränderten geometrischen Modells für den Fall, dass die Dämpfung der Schwingung stärker als in Schritt c) ausfällt,
 - 30 ansonsten Wiederholen der Schritte d) und e) mit einem anderen veränderten geometrischen Modell.

2. Verfahren gemäß Anspruch 1, mit dem Schritt:

f) Numerisches Berechnen der anhand einer Strömung hervorge-

rufenen Schwingung des in Schritt e) akzeptierten geometri-

5 schen Modells und Berechnen der Dämpfung der Schwingung.

3. Verfahren gemäß Anspruch 2,

wobei in Schritt f) die Konvektion und die Trägheit der Strö-
mung berücksichtigt werden.

10

4. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 3,

wobei die Schwingungsform in komplexer Form dargestellt wird:

$\vec{\phi} = \vec{a}_c + i\vec{a}_s$, wobei $\vec{\phi}$ die Schwingungsform ist, \vec{a}_c und \vec{a}_s lokale
Verformungen sind.

15

5. Verfahren gemäß Anspruch 4,

wobei \vec{a}_c und \vec{a}_s mittels eines Finiten Elemente Strukturlösers
bereitgestellt werden.

20 6. Verfahren gemäß Anspruch 4 oder 5,

wobei $A(\vec{x}, t)$ dargestellt wird gemäß $A(\vec{x}, t) = A_0(\vec{x}) + \operatorname{Re} \left[(\hat{A}_l e^{i\beta_l} e^{i\sigma} + \hat{A}_R e^{i\beta_R}) e^{i\omega t} \right]$, wobei $A_0(\vec{x})$ die Fläche $A(\vec{x}, t)$ bei still
stehenden Schaufelprofilen, $\hat{A}_R = |\vec{n}_R \cdot \vec{\phi}|_R$ die Projektion der
Schwingungsform auf die Normale \vec{n}_R der Schaufeloberfläche

25 bei der Koordinate \vec{x} für das eine Schaufelprofil, $\hat{A}_l = |\vec{n}_l \cdot \vec{\phi}|_l$
die Projektion der Schwingungsform auf die Normale \vec{n}_l der
Schaufeloberfläche bei einem Punkt auf der Schaufeloberfläche
des anderen Schaufelprofils, β_l und β_R der jeweilige Phasen-
versatz zwischen dem Imaginärteil und dem Realteil, σ der
30 Phasenversatz der Schwingungen der beiden Schaufelprofile und
 ω die Kreisfrequenz ist.

7. Verfahren gemäß Anspruch 6,
wobei $A_0(\vec{x})$ bestimmt wird, indem bei der Koordinate \vec{x} auf
der Schaufeloberfläche des einen Schaufelprofils ein Kreis
5 (12) gefunden wird, der die Schaufeloberfläche des einen
Schaufelprofils bei der Koordinate \vec{x} und die Schaufelober-
fläche des anderen Schaufelprofils in dem Punkt tangiert, und
 $A_0(\vec{x})$ derart gewählt wird, dass $A_0(\vec{x})$ von der Normalen \vec{n}_R
bei der Koordinate \vec{x} und von der Normalen \vec{n}_1 an dem Punkt
10 tangiert wird.

8. Verfahren gemäß Anspruch 7,
wobei $A_0(\vec{x})$ bestimmt wird durch Interpolieren einer Funkti-
on, insbesondere ein Polynom zweiten Grades, zwischen der Ko-
15ordinate \vec{x} und dem Punkt.

9. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 6 bis 8,
wobei in Schritt d) die Dämpfung der Schwingung für verschie-
dene Werte für β_1 , β_R und σ bestimmt wird.

20 10. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 9,
wobei in Schritt d) eine Integration des ortsabhängigen Stör-
drucks entlang des vollständigen Kanals (3) vorgenommen wird.

FIG 1

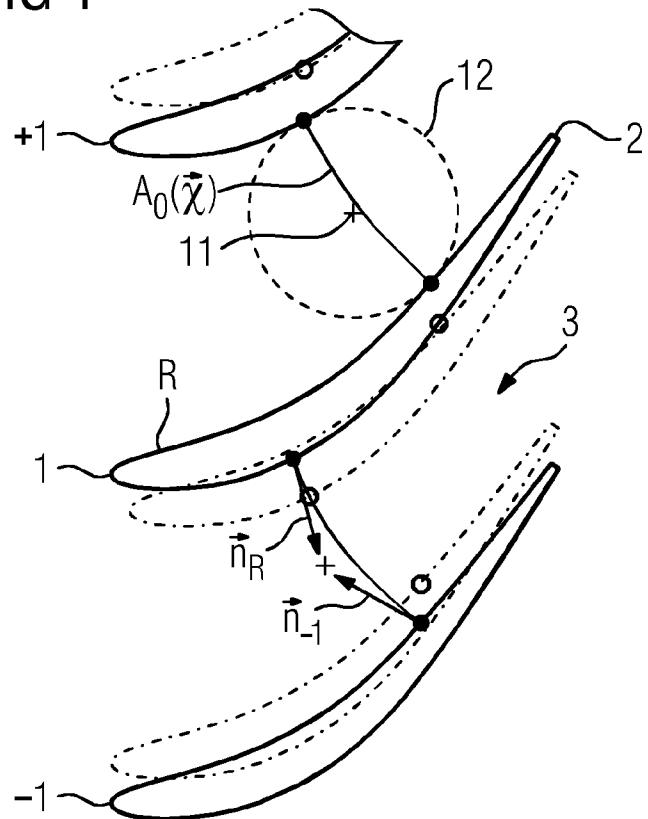


FIG 2

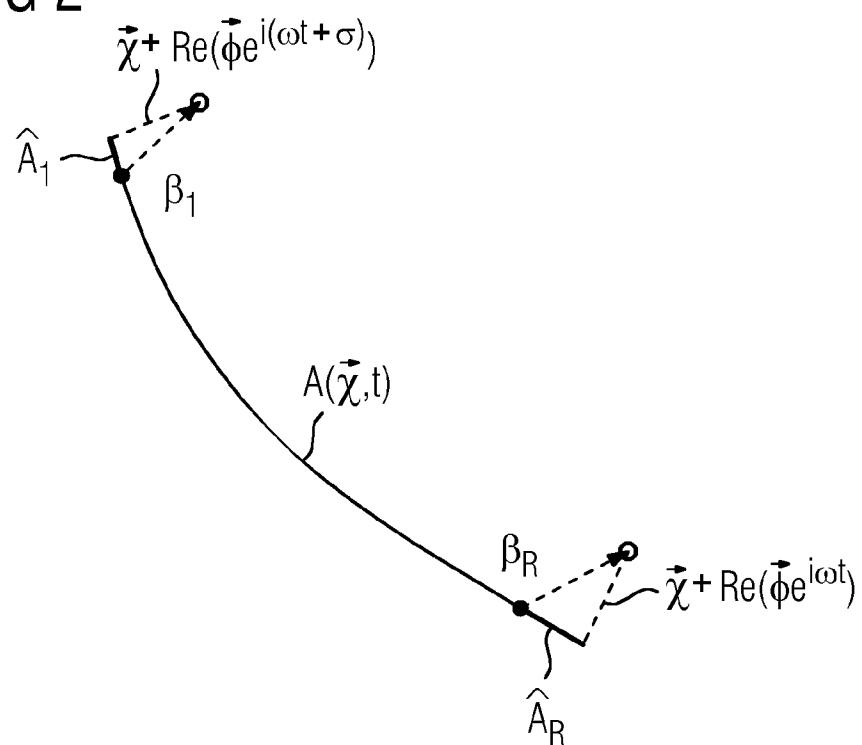


FIG 3

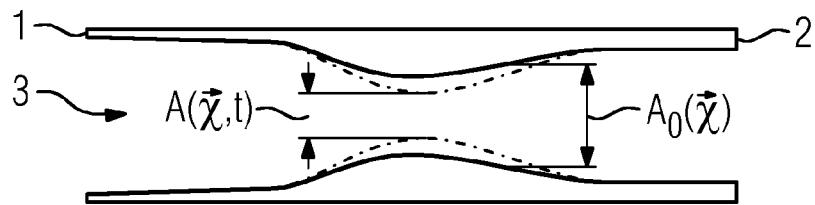


FIG 4

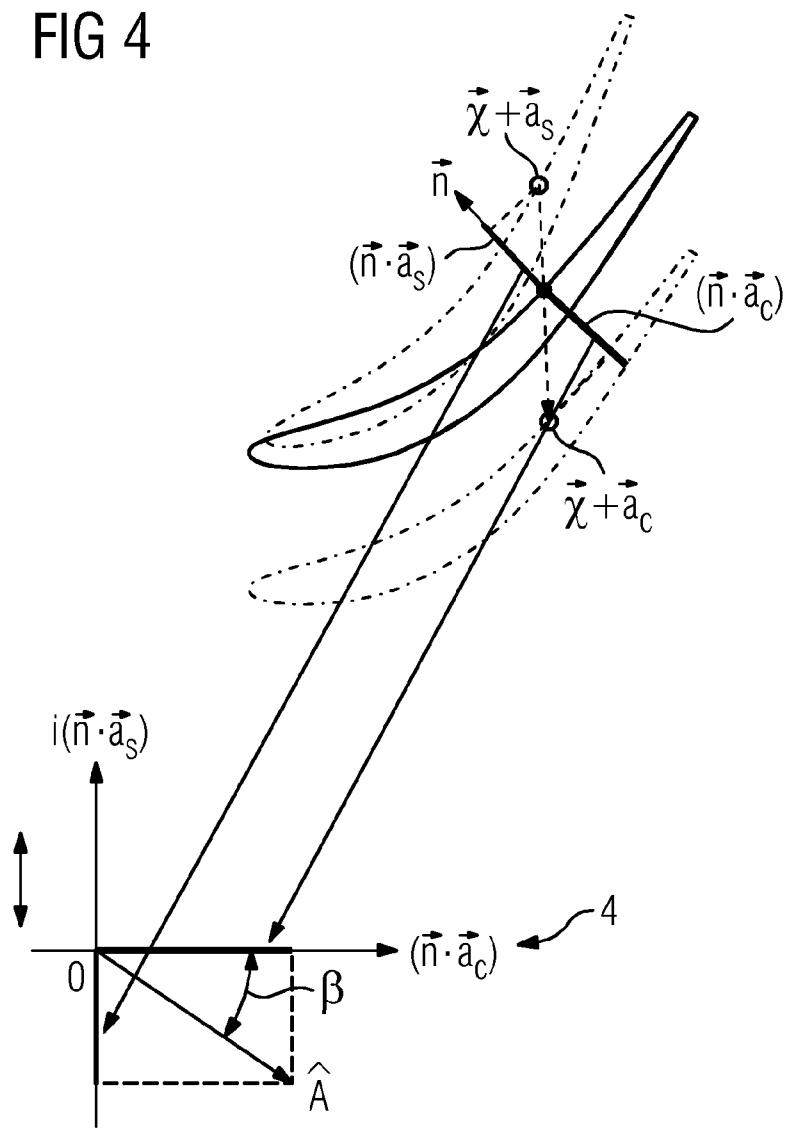
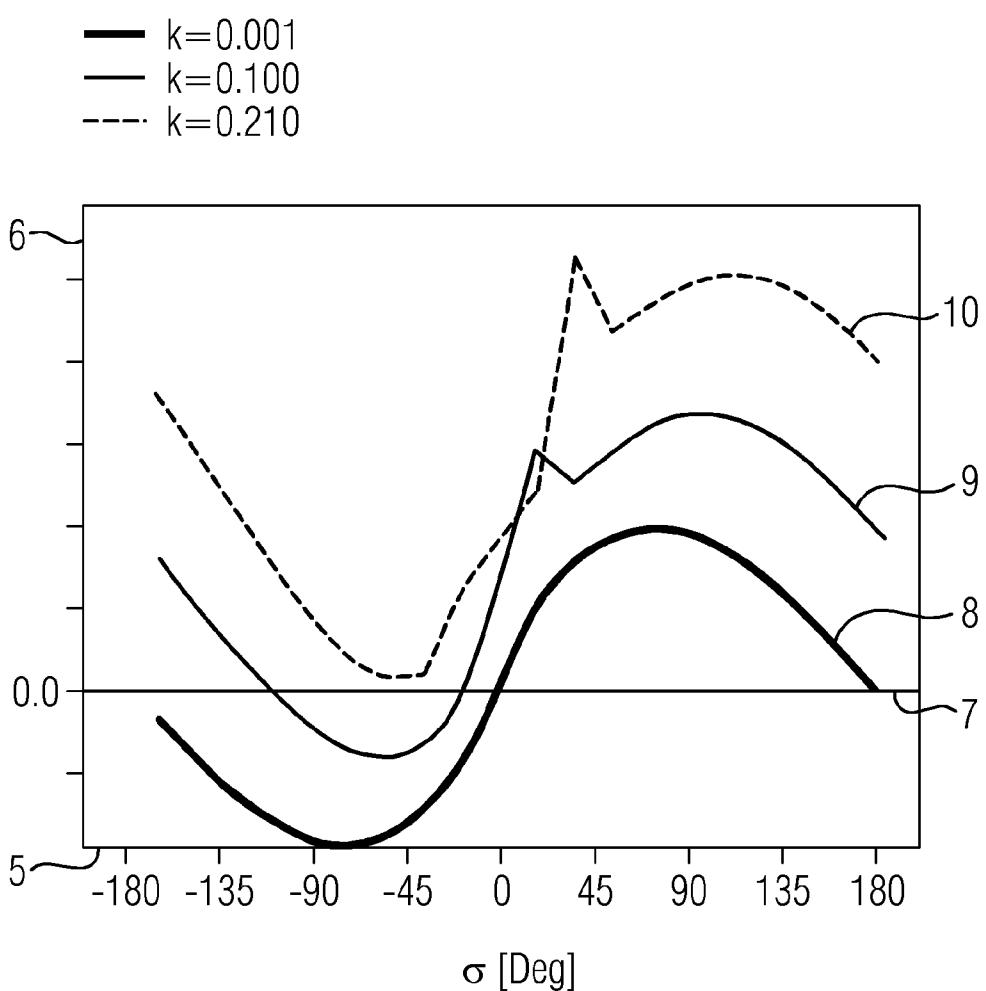


FIG 5



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2017/058776

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
 INV. F01D5/16 G06F17/50
 ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
F01D F04D G06F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	EP 1 528 223 A2 (ROLLS ROYCE PLC [GB]) 4 May 2005 (2005-05-04) paragraphs [0082] - [0086] figure 9 ----- A US 2010/050594 A1 (LOMBARD JEAN-PIERRE FRANCOIS [FR] ET AL) 4 March 2010 (2010-03-04) paragraphs [0036] - [0061] figures 1-5 ----- A US 2014/112760 A1 (DUONG LOC QUANG [US] ET AL) 24 April 2014 (2014-04-24) the whole document -----	1-10 1-10 1-10



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

- "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
- "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
7 June 2017	11/07/2017
Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer de la Loma, Andrés

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2017/058776

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)		Publication date
EP 1528223	A2	04-05-2005	EP 1528223 A2 US 2005096891 A1 US 2009055146 A1	04-05-2005 05-05-2005 26-02-2009
US 2010050594	A1	04-03-2010	FR 2935427 A1 GB 2462921 A US 2010050594 A1	05-03-2010 03-03-2010 04-03-2010
US 2014112760	A1	24-04-2014	CA 2888919 A1 EP 2912278 A1 US 2014112760 A1 WO 2014066199 A1	01-05-2014 02-09-2015 24-04-2014 01-05-2014

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2017/058776

A. KLASIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
 INV. F01D5/16 G06F17/50
 ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierte Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
F01D F04D G06F

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	EP 1 528 223 A2 (ROLLS ROYCE PLC [GB]) 4. Mai 2005 (2005-05-04) Absätze [0082] - [0086] Abbildung 9 -----	1-10
A	US 2010/050594 A1 (LOMBARD JEAN-PIERRE FRANCOIS [FR] ET AL) 4. März 2010 (2010-03-04) Absätze [0036] - [0061] Abbildungen 1-5 -----	1-10
A	US 2014/112760 A1 (DUONG LOC QUANG [US] ET AL) 24. April 2014 (2014-04-24) das ganze Dokument -----	1-10

Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
7. Juni 2017	11/07/2017

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde

Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
 NL - 2280 HV Rijswijk
 Tel. (+31-70) 340-2040,
 Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

de la Loma, Andrés

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2017/058776

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
EP 1528223	A2 04-05-2005	EP 1528223 A2 US 2005096891 A1 US 2009055146 A1	04-05-2005 05-05-2005 26-02-2009
US 2010050594	A1 04-03-2010	FR 2935427 A1 GB 2462921 A US 2010050594 A1	05-03-2010 03-03-2010 04-03-2010
US 2014112760	A1 24-04-2014	CA 2888919 A1 EP 2912278 A1 US 2014112760 A1 WO 2014066199 A1	01-05-2014 02-09-2015 24-04-2014 01-05-2014