

(19)



(11)

**EP 2 762 678 A1**

(12)

**EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:  
**06.08.2014 Patentblatt 2014/32**

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

(21) Anmeldenummer: **13153956.1**

(22) Anmeldetag: **05.02.2013**

(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**

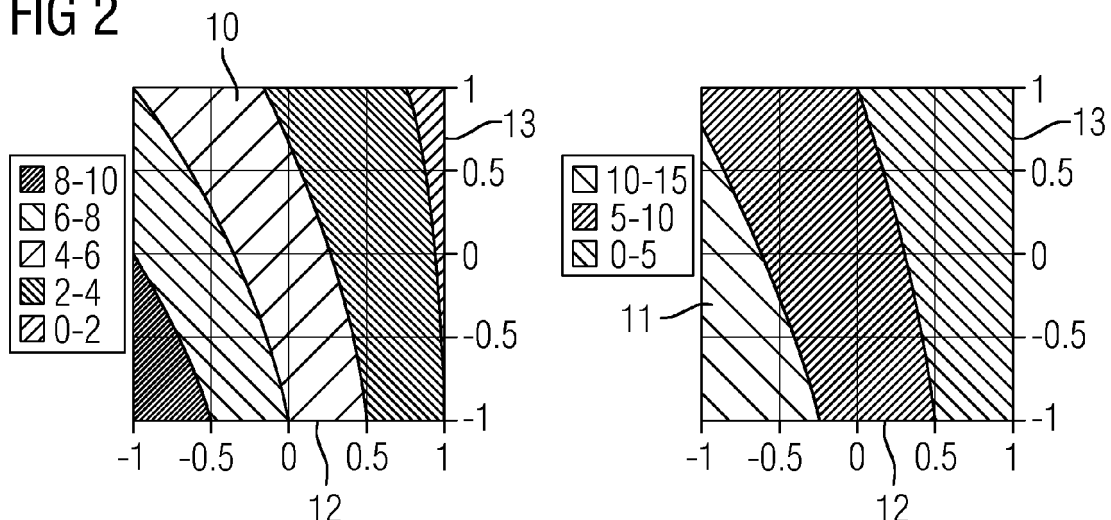
(71) Anmelder: **Siemens Aktiengesellschaft**  
**80333 München (DE)**

(72) Erfinder:  
• **Grönsfelder, Thomas**  
**45470 Mülheim an der Ruhr (DE)**  
• **Walkenhorst, Jan**  
**45478 Mülheim an der Ruhr (DE)**  
• **de Lazzer, Armin**  
**45479 Mülheim an der Ruhr (DE)**

**(54) Verfahren zum Verstimmen eines Laufschaufelgitters**

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verstimmen eines eine Mehrzahl an Laufschaufeln (1) aufweisenden Laufschaufelgitters einer Strömungsmaschine mit den Schritten: a) Festlegen (1) für jede der Laufschaufeln (1) des Laufschaufelgitters mindestens einer Soll-Eigenfrequenz  $v_{F,S}$ , die die Laufschaufel für mindestens eine vorherbestimmte Schwingungsmode im Normalbetrieb der Strömungsmaschine unter einer Fliehkrafteinwirkung hat, derart, dass die Schwingungsbelastung des Laufschaufelgitters unter der Fliehkraft unterhalb einer Toleranzgrenze liegt (14); b) Aufstellen (16) einer Wertetabelle  $v_F(m, r_S)$  mit ausgewählten diskreten Massewerten  $m$  und radialen Schwerpunktslagen  $r_S$ , die sich aus Variationen (6 bis 9) der Nenngeometrie (5) der

Laufschaufel (1) ergeben, und Ermitteln der jeweiligen Eigenfrequenz  $v_F$  unter der Fliehkraft für jedes ausgewählte Wertepaar  $m$  und  $r_S$ ; c) Messen (17) der Masse  $m_I$  und der radialen Schwerpunktslage  $r_{S,I}$  einer der Laufschaufeln (1) (19); d) Bestimmen von einer Ist-Eigenfrequenz  $v_{F,I}$  der Laufschaufel (1) unter der Fliehkraft durch Interpolieren der gemessenen Masse  $m_I$  und der gemessenen radialen Schwerpunktslage  $r_{S,I}$  in der Wertetabelle  $v_F(m, r_S)$ ; e) in dem Fall, dass  $v_{F,I}$  außerhalb einer Toleranz um  $v_{F,S}$  liegt, Auswählen aus der Wertetabelle  $v_F(m, r_S)$  eines Wertepaars  $m_S$  und  $r_{S,S}$  derart, dass sich  $v_F$  an  $v_{F,S}$  zumindest annähert, und Abtragen (24) von Material der Laufschaufel (1) derart, dass  $m_I$  und  $r_{S,I}$  dem Wertepaar  $m_S$  und  $r_{S,S}$  entsprechen.

**FIG 2****EP 2 762 678 A1**

## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verstimmen eines Laufschaufelgitters.

**[0002]** Eine Strömungsmaschine weist in Laufrädern angeordnete Laufschaufeln auf, die als an ihren Schaufelfüßen fest eingespannt angesehen werden können und im Betrieb der Strömungsmaschine schwingen können. In Abhängigkeit des Betriebszustands der Strömungsmaschine kann es dabei zu Schwingungsvorgängen kommen, bei denen Schwingungszustände mit hohen und kritischen Spannungen in der Laufschaufel auftreten. Bei einer zeitlich langen Belastung der Schaufel durch kritische Spannungszustände kommt es zu einer Materialermüdung, die letztendlich zu einer Lebensdauerreduzierung der Schaufel führen kann, welche einen Austausch der Laufschaufel notwendig macht.

**[0003]** Aufgrund von auf die Laufschaufel wirkenden Fliehkräften im Betrieb der Strömungsmaschine wird eine Vorspannung in der Laufschaufel erzeugt. Dadurch und durch die hohe Temperatur der Laufschaufel im Betrieb sind die Eigenfrequenzen der Laufschaufel im Betrieb verschieden von den Eigenfrequenzen bei der ruhenden und kalten Laufschaufel. Als qualitätssichernde Maßnahme während der Fertigung sind lediglich die Eigenfrequenzen im Stillstand der Strömungsmaschine messbar, wobei es jedoch zur Auslegung der Laufschaufel erforderlich ist, die Eigenfrequenzen unter der Fliehkraft zu kennen, damit die Schwingungsvorgänge, bei denen die Schwingungszustände mit den hohen und kritischen Spannungen in der Laufschaufel auftreten, vermieden werden können.

**[0004]** Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zum Verstimmen eines Laufschaufelgitters einer Strömungsmaschine zu schaffen, wobei die Laufschaufeln eine lange Lebensdauer im Betrieb der Strömungsmaschine haben.

**[0005]** Das erfindungsgemäße Verfahren zum Verstimmen, insbesondere dem rotordynamischen Verstimmen, eines eine Mehrzahl an Laufschaufeln aufweisenden Laufschaufelgitters einer Strömungsmaschine weist die Schritte auf: a) Festlegen für jede der Laufschaufeln des Laufschaufelgitters mindestens einer Soll-Eigenfrequenz  $v_{F,S}$ , die die Laufschaufel für mindestens eine vorherbestimmte Schwingungsmode im Normalbetrieb der Strömungsmaschine unter einer Fliehkrafteinwirkung hat, derart, dass die Schwingungsbelastung des Laufschaufelgitters unter der Fliehkraft unterhalb einer Toleranzgrenze liegt; b) Aufstellen einer Wertetabelle  $v_F(m, r_S)$  mit ausgewählten diskreten Massewerten  $m$  und radialen Schwerpunktslagen  $r_S$ , die sich aus Variationen der Nenngeometrie der Laufschaufel ergeben, und Ermitteln der jeweiligen Eigenfrequenz  $v_F$  unter der Fliehkraft für jedes ausgewählte Wertepaar  $m$  und  $r_S$ ; c) Messen der Masse  $m_I$  und der radialen Schwerpunktslage  $r_{S,I}$  einer der Laufschaufeln; d) Bestimmen von einer Ist-Eigenfrequenz  $v_{F,I}$  der Laufschaufel unter der Fliehkraft durch Interpolieren der gemessenen Masse  $m_I$  und der

gemessenen radialen Schwerpunktslage  $r_{S,I}$  in der Wertetabelle  $v_F(m, r_S)$ ; e) in dem Fall, dass  $v_{F,I}$  außerhalb einer Toleranz um  $v_{F,S}$  liegt, Auswählen aus der Wertetabelle  $v_F(m, r_S)$  eines Wertepaars  $m_S$  und  $r_{S,S}$  derart, dass sich  $v_{F,I}$  an  $v_{F,S}$  zumindest annähert, und Abtragen von Material der Laufschaufel derart, dass  $m_I$  und  $r_{S,I}$  dem Wertepaar  $m_S$  und  $r_{S,S}$  entsprechen; f) Wiederholen der Schritte c) bis e) bis  $v_{F,I}$  innerhalb der Toleranz um  $v_{F,S}$  liegt.

**[0006]** Durch das Messen der Masse  $m_I$  und der radialen Schwerpunktslage  $r_{S,I}$  sowie durch das Interpolieren dieser Werte in der Wertetabelle  $v_F(m, r_S)$  kann die Eigenfrequenz  $v_{F,I}$  unter der Fliehkraft vorteilhaft mit einer hohen Genauigkeit bestimmt werden. Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren ist es ebenso vorteilhaft möglich, diese Eigenfrequenz  $v_{F,I}$  mit einer hohen Genauigkeit einzustellen und an die festgelegte Soll-Eigenfrequenz  $v_{F,S}$  anzunähern. Somit kann die Schwingungsbelastung der Laufschaufel im Betrieb der Strömungsmaschine vermindert werden, wodurch sich die Lebensdauer der Laufschaufel verlängert. Zudem ist das Verfahren einfach durchzuführen, weil es für eine genaue Bestimmung der Ist-Eigenfrequenz  $v_{F,I}$  überraschenderweise ausreichend ist,  $m_I$  und  $r_{S,I}$  der Laufschaufel ohne ihre vollständige Geometrie zu messen. Zudem sind  $m_I$  und  $r_{S,I}$  einfach zu messende Größen, beispielsweise kann  $m_I$  mittels einer Waage bestimmt werden.

**[0007]** Die vorherbestimmten Schwingungsmoden werden bevorzugt derart gewählt, dass die zu den Schwingungsmoden zugehörigen Eigenfrequenzen  $v_{F,S}$  gleich oder niederfrequenter als eine Vielfache Harmonische der Rotordrehfrequenz sind, insbesondere die Achtfache Harmonische, wobei jeweils eine Wertetabelle  $v_F(m, r_S)$  für eine Mehrzahl oder für alle der Schwingungsmoden aufgestellt wird, die Ist-Eigenfrequenz  $v_{F,I}$  für jede Wertetabelle bestimmt wird und das Wertepaar  $m_S$  und  $r_{S,S}$  derart ausgewählt wird, dass sich die bestimmten  $v_{F,I}$  an die festgelegten  $v_{F,S}$  zumindest annähern.

**[0008]** Das erfindungsgemäße Verfahren zum Verstimmen, insbesondere dem rotordynamischen Verstimmen, eines eine Mehrzahl an Laufschaufeln aufweisenden Laufschaufelgitters einer Strömungsmaschine weist die Schritte auf: a) Festlegen für jede der Laufschaufeln des Laufschaufelgitters mindestens einer Soll-Eigenfrequenz  $v_{F,S}$ , die die Laufschaufel für mindestens eine vorherbestimmte Schwingungsmode im Normalbetrieb der Strömungsmaschine unter einer Fliehkrafteinwirkung hat, derart, dass die Schwingungsbelastung des Laufschaufelgitters unter der Fliehkraft unterhalb einer Toleranzgrenze liegt; b) Aufstellen einer Wertetabelle  $v_F(m, r_S)$  und einer Wertetabelle  $v_S(m, r_S)$  mit ausgewählten diskreten Massewerten  $m$  und radialen Schwerpunktslagen  $r_S$ , die sich aus Variationen der Nenngeometrie der Laufschaufel ergeben, und Ermitteln der jeweiligen Eigenfrequenz  $v_F$  unter der Fliehkraft und der jeweiligen Eigenfrequenz  $v_S$  im Stillstand der Laufschaufel für jedes ausgewählte Wertepaar  $m$  und  $r_S$ ; c) Messen der Masse

$m_l$  und der radialen Schwerpunktslage  $r_{S,l}$  einer der Laufschaufeln; d) Bestimmen von einer Ist-Eigenfrequenz  $v_{F,l}$  der Laufschaufel unter der Fliehkraft durch Interpolieren der gemessenen Masse  $m_l$  und der gemessenen radialen Schwerpunktslage  $r_{S,l}$  in der Wertetabelle  $v_F(m, r_S)$ ; e) in dem Fall, dass  $v_{F,l}$  außerhalb einer Toleranz um  $v_{F,S}$  liegt, Auswählen aus der Wertetabelle  $v_F(m, r_S)$  eines Wertepaars  $m_S$  und  $r_{S,S}$  derart, dass sich  $v_{F,l}$  an  $v_{F,S}$  zumindest annähert, und Abtragen von Material der Laufschaufel derart, dass  $m_l$  und  $r_{S,l}$  dem Wertepaar  $m_S$  und  $r_{S,S}$  entsprechen; f) in dem Fall, dass Material abgetragen wurde, Messen der Eigenfrequenz  $v_{S,l}$  der Laufschaufel im Stillstand; g) Wiederholen der Schritte e) bis f) oder c) bis f) bis  $v_{F,l}$  innerhalb der Toleranz um  $v_{F,S}$  und  $v_{S,l}$  innerhalb einer der Toleranz entsprechenden Toleranz um  $v_{S,S}$  liegt.

**[0009]** Durch das zusätzliche Messen der Eigenfrequenz  $v_{S,l}$  kann die Ist-Eigenfrequenz  $v_{F,l}$  unter der Fliehkraft vorteilhaft mit einer noch höheren Genauigkeit bestimmt werden. Es ist auch möglich, zur Kontrolle des Abtragens lediglich die Messung der Eigenfrequenz  $v_{S,l}$  im Stillstand heranzuziehen, ohne die Messung von  $m_l$  und  $r_{S,l}$  zu wiederholen.

**[0010]** Die vorherbestimmten Schwingungsmoden werden bevorzugt derart gewählt, dass die zu den Schwingungsmoden zugehörigen Eigenfrequenzen  $v_{F,S}$  gleich oder niederfrequenter als eine Vielfache Harmonische der Rotordrehfrequenz sind, insbesondere die Achtfache Harmonische, wobei jeweils eine Wertetabelle  $v_F(m, r_S)$  und jeweils eine Wertetabelle  $v_S(m, r_S)$  für eine Mehrzahl oder für alle der Schwingungsmoden aufgestellt wird, die Ist-Eigenfrequenz  $v_{F,l}$  und die Ist-Eigenfrequenz  $v_{S,l}$  für jede Wertetabelle bestimmt wird, das Wertepaar  $m_S$  und  $r_{S,S}$  derart ausgewählt wird, dass sich die bestimmten  $v_{F,l}$  an die festgelegten  $v_{F,S}$  zumindest annähern und die Eigenfrequenzen  $v_{S,l}$  für die vorherbestimmten Schwingungsmoden gemessen werden.

**[0011]** Die Variationen der Nenngeometrie weisen bevorzugt ein Verdicken und/oder ein Verdünnen der Laufschaufel in jedem radialen Schnitt oder in radialen Abschnitten auf. Es ist bevorzugt, dass die Variationen der Nenngeometrie ein lineares Variieren der Dicke der Laufschaufel über den Radius aufweisen. Es ist vorteilhaft möglich, die Wertetabelle durch das Verdicken und das Verdünnen der Nenngeometrie mit einer zur Bestimmung der Eigenfrequenzen  $v_F$  und  $v_S$  ausreichenden Genauigkeit aufzustellen.

**[0012]** Die Soll-Eigenfrequenzen  $v_{F,S}$  werden bevorzugt derart festgelegt, dass in dem Laufschaufelgitter benachbart angeordnete Laufschaufeln ungleiche Soll-Eigenfrequenzen  $v_{F,S}$  haben und dass die Soll-Eigenfrequenzen  $v_{F,S}$  verschieden sind von der Rotordrehfrequenz im Normalbetrieb der Strömungsmaschine bis einschließlich einer Vielfachen Harmonischen der Rotordrehfrequenz, insbesondere der Achtfachen Harmonischen der Rotordrehfrequenz. Dadurch ist es unterbunden, dass eine schwingende Laufschaufel eine ihr benachbarte Laufschaufel zu einer Schwingung anregen

kann und dass es zu einer Kopplung der Rotation des Laufschaufelgitters mit den Schwingungen der Laufschaufeln kommt. Somit sind die Schwingungsbelastungen der Laufschaufeln gering und ihre Lebensdauern lang.

**[0013]** Es ist bevorzugt, dass das Messen der Masse  $m_l$  und der radialen Schwerpunktslage  $r_{S,l}$  relativ als Differenzmessung zu einer Referenzschaufel erfolgt, die dreidimensional vermessen wurde, insbesondere mittels eines Koordinatenmessgeräts und/oder mittels eines optischen Verfahrens. Die Genauigkeit einer Messung hängt von der Größe des Messbereichs ab, wobei ein größerer Messbereich in einer geringeren Genauigkeit resultiert. Indem das Messen von  $m_l$  und  $r_{S,l}$  relativ zu der Referenzschaufel erfolgt, kann ein kleiner Messbereich mit einer hohen Genauigkeit verwendet werden. Es ist daher nur erforderlich eine einzige Laufschaufel als die Referenzschaufel zu nehmen und sie einmalig mit einem kostenintensiven dreidimensionalen Verfahren zu charakterisieren, wodurch auch  $m_l$  und  $r_{S,l}$  aller anderen Laufschaufeln mit der hohen Genauigkeit gemessen werden können.

**[0014]** Es ist bevorzugt, dass das Wertepaar  $m_S$  und  $r_{S,S}$  derart ausgewählt wird, dass die Unwucht des Rotors verringert wird und/oder dass der Aufwand zum Abtragen minimal wird. Die Kenntnis des Wertepaares  $m_S$  und  $r_{S,S}$  ist für ein Auswuchten des Rotors ausreichend, so dass vorteilhaft durch das Abtragen des Materials ein Verstimmen und ein Auswuchten des Laufschaufelgitters in einem gemeinsamen Verfahrensschritt erfolgen kann. Das Abtragen des Materials kann auch derart erfolgen, dass die Menge des abzutragenden Materials minimiert wird.

**[0015]** Die vorherbestimmte Schwingungsmoden wird bevorzugt derart gewählt, dass die Eigenfrequenz  $v_{F,S}$  der vorherbestimmten Schwingungsmoden gleich oder niederfrequenter ist als die Vielfache Harmonische der Rotordrehfrequenz, insbesondere die Achtfache Harmonische der Rotordrehfrequenz. Die Eigenfrequenzen  $v_F$  und/oder  $v_l$  werden bevorzugt rechnerisch bestimmt, insbesondere mittels einer Finiten Elemente Methode.

**[0016]** Es ist bevorzugt, dass beim Messen der Eigenfrequenz  $v_{S,l}$  die Laufschaufel an ihrem Schaufelfuß eingespannt wird, die Schwingung der Laufschaufel angeregt wird und die Schwingung gemessen wird. Die Schwingung wird bevorzugt mittels Schwingungsaufnehmer, Beschleunigungssensoren, Dehnmessstreifen, piezoelektrischer Sensoren und/oder optischer Verfahren gemessen. Hierbei handelt es sich um eine einfache Methode zur Bestimmung der Eigenfrequenz.

**[0017]** Mittels eines Vergleichs der gemessenen Eigenfrequenz  $v_{S,l}$  mit einer durch Interpolieren von  $m_l$  und  $r_{S,l}$  in der Wertetabelle  $v_S(m, r_S)$  ermittelten Ist-Eigenfrequenz wird bevorzugt eine Anpassung des Modells zum Ermitteln der Eigenfrequenzen  $v_F$  und  $v_S$  durchgeführt. Dadurch können vorteilhaft Einflüsse des Werkstoffes auf die Eigenfrequenzen mit berücksichtigt werden.

**[0018]** Im Folgenden wird anhand der beigefügten schematischen Zeichnungen die Erfindung näher erläutert.

tert. Es zeigen:

Figur 1 Längsschnitte von drei Laufschaufeln mit einer Nenngeometrie der Laufschaufel und Variationen der Nenngeometrie,

Figur 2 eine zweidimensionale Auftragung von Eigenfrequenzen  $\nu_S$  der Laufschaufel im Stillstand und eine zweidimensionale Auftragung von Eigenfrequenzen  $\nu_F$  der Laufschaufel unter Fliehkraft als Funktion der Masse  $m$  und der radialen Schwerpunktslage  $r_S$  der Laufschaufel und

Figur 3 ein Ablaufschema des erfindungsgemäßen Verfahrens.

**[0019]** Figur 1 zeigt drei Laufschaufeln 1 einer Strömungsmaschine, wobei die erste Laufschaufel in ihrer Nenngeometrie 5, die zweite Laufschaufel sowohl in ihrer Nenngeometrie 5 als auch in einer ersten Variation 6 und einer zweiten Variation 7 und die dritte Laufschaufel sowohl in ihrer Nenngeometrie 5 als auch in einer dritten Variation 8 und einer vierten Variation 9 dargestellt sind. Die Laufschaufeln 1 weisen einen Schauffelfuß 2, der an einer Rotorwelle 4 der Strömungsmaschine fest angebracht ist, und eine dem Schauffelfuß 2 abgewandte Schauffelspitze 3 auf. Bei einer Schwingung der Laufschaufel 1 im Betrieb der Strömungsmaschine ist an dem Schauffelfuß 2 ein Schwingungsknoten angeordnet. Der Radius  $r$  der Laufschaufel 1 ist von dem Schauffelfuß 2 zu der Schauffelspitze 3 gerichtet.

**[0020]** Die zweite Laufschaufel zeigt Variationen 6, 7 der Nenngeometrie 5 auf, bei denen ausgehend von der Nenngeometrie 5 die Masse  $m$  jedoch nicht die radiale Schwerpunktslage  $r_S$  der Laufschaufel verändert wird. In der ersten Variation 6 wird die Masse  $m$  vergrößert, indem die zweite Laufschaufel in jedem radialen Abstand  $r$  zur Rotationsachse gleichmäßig verdickt wird und in der zweiten Variation 7 wird die Masse  $m$  verringert, indem die zweite Laufschaufel in jedem radialen Abstand  $r$  gleichmäßig verdünnt wird.

**[0021]** Bei den Variationen 8, 9 der dritten Laufschaufel wird ausgehend von der Nenngeometrie 5 die Dicke der Laufschaufel in der Umfangsrichtung und/oder der Axialrichtung linear über den Radius  $r$  variiert. Gemäß der dritten Variation 8 wird ausgehend von der Nenngeometrie 5 die Laufschaufel an ihrem Schauffelfuß 2 verdickt und an ihrer Schauffelspitze 3 verdünnt und gemäß der vierten Variation 9 wird ausgehend von der Nenngeometrie 5 die Laufschaufel an ihrem Schauffelfuß 2 verdünnt und an ihrer Schauffelspitze 3 verdickt. Dadurch wird in der dritten Variation 8 die radiale Schwerpunktslage  $r_S$  nach radial innen und in der vierten Variation 9 nach radial außen verschoben, wohingegen sich die Masse  $m$  nicht verändert. Die Variationen 8, 9 können jedoch auch derart durchgeführt werden, dass sowohl die Masse  $m$  als auch die radiale Schwerpunktslage  $r_S$  verändert wer-

den. Zudem ist es möglich, die Masse  $m$  und die radiale Schwerpunktslage  $r_S$  durch Verdicken und/oder Verdünnen der Laufschaufel 1 in ausgewählten radialen Abschnitten durchzuführen.

**[0022]** Es wird eine Vielzahl von Variationen der Nenngeometrie 5 durchgeführt und für jede Variation wird eine Eigenfrequenz  $\nu_S$  der niederfrequentesten Biegeschwingung der an ihrem Schauffelfuß 2 eingespannten und sich im Stillstand befindlichen Laufschaufel 1 mittels einer Finiten Elemente Methode berechnet. Weiterhin wird für jede Variation die Eigenfrequenz  $\nu_F$  der gleichen Biegeschwingung berechnet, wobei die auf die Laufschaufel 1 im Normalbetrieb der Strömungsmaschine wirkende Fliehkraft berücksichtigt wird. Optional können bei der Berechnung von  $\nu_F$  auch eine erhöhte Temperatur und sich damit verändernde Werkstoffeigenschaften mit berücksichtigt werden. Für ein gegebenes Laufschaufelgitter ist es vorteilhaft lediglich erforderlich, die Variationen der Nenngeometrie einmalig durchzuführen.

**[0023]** Es wird anschließend für jede Variation der Nenngeometrie 5 die Masse  $m$  und die radiale Schwerpunktslage  $r_S$  der Laufschaufel 1 bestimmt und eine Wertetabelle  $\nu_S(m, r_S)$  mit Wertetripeln  $\nu_S, m, r_S$  und eine Wertetabelle  $\nu_F(m, r_S)$  mit Wertetripeln  $\nu_F, m, r_S$  aufgestellt. In der linken Auftragung in Figur 2 ist die Wertetabelle  $\nu_S(m, r_S)$  und in der rechten Auftragung in Figur 2 die Wertetabelle  $\nu_F(m, r_S)$  dargestellt, indem die jeweilige Eigenfrequenz  $\nu_S$  10 und  $\nu_F$  11 gegen die Masse  $m$  12 und die radiale Schwerpunktslage  $r_S$  13 aufgetragen ist. Die Eigenfrequenzen  $\nu_S$  10 und  $\nu_F$  11 sind dabei in willkürlichen Einheiten und die Nenngeometrie 5 ist jeweils bei  $m=0$  und  $r_S=0$  aufgetragen. Aus Figur 2 ist ersichtlich, dass eine Verringerung der Masse  $m$  und eine Verschiebung der radialen Schwerpunktslage  $r_S$  nach innen mit einer Erhöhung der Eigenfrequenzen  $\nu_S$  10 und  $\nu_F$  11 einhergehen.

**[0024]** In Figur 3 ist das erfindungsgemäße Verfahren in einem Ablaufschema dargestellt. Es wird für jede der Laufschaufeln 1 des Laufschaufelgitters eine Soll-Eigenfrequenz  $\nu_{F,S}$  festgelegt 14, die die Laufschaufel 1 für die niederfrequenteste Biegeschwingung der an ihrem Schauffelfuß 2 fest eingespannten Laufschaufel 1 im Normalbetrieb der Strömungsmaschine unter einer Fliehkrafteinwirkung hat, derart, dass die Schwingungsbelastung des Laufschaufelgitters unter der Fliehkraft unterhalb einer Toleranzgrenze liegt. Dies wird dadurch erreicht, dass indem Laufschaufelgitter benachbart angeordnete Laufschaufeln ungleiche Soll-Eigenfrequenzen  $\nu_{F,S}$  haben und dass die Soll-Eigenfrequenzen  $\nu_{F,S}$  verschieden sind von der Rotordrehfrequenz im Normalbetrieb der Strömungsmaschine bis einschließlich der Achtfachen Harmonischen der Rotordrehfrequenz.

**[0025]** Anschließend wird zu jeder Soll-Eigenfrequenz  $\nu_{F,S}$  eine entsprechende Soll-Eigenfrequenz  $\nu_{S,S}$  ermittelt 15, die die Laufschaufel 1 für die niederfrequenteste Biegeschwingung der an ihrem Schauffelfuß 2 fest eingespannten Laufschaufel 1 im Stillstand hat. Darauf folgend werden, wie oben beschrieben, durch die Variati-

onen der Nenngeometrie 5 die Wertetabelle  $v_S(m, r_S)$  und die Wertetabelle  $v_F(m, r_S)$  aufgestellt 16.

**[0026]** Nach der Fertigung 18 der Laufschaufel 1 werden ihre Masse  $m$  und radiale Schwerpunktslage  $r_S$  gemessen 19. Anschließend wird eine Ist-Eigenfrequenz  $v_{F,I}$  der Laufschaufel 1 unter der Fliehkraft durch Interpolieren der gemessenen Masse  $m_I$  und der gemessenen radialen Schwerpunktslage  $r_{S,I}$  in der Wertetabelle  $v_F(m, r_S)$  bestimmt 17.

**[0027]** Es wird ein Ist-Soll Abgleich 21 durchgeführt, indem  $v_{F,I}$  mit  $v_{F,S}$  verglichen wird. In dem Fall, dass  $v_{F,I}$  außerhalb einer Toleranz um  $v_{F,S}$  liegt, wird aus der Wertetabelle  $v_F(m, r_S)$  ein Wertepaar  $m_S$  und  $r_{S,S}$  derart ausgewählt, dass sich  $v_{F,I}$  an  $v_{F,S}$  zumindest annähert, und Material von der Laufschaufel 1 derart abgetragen 24 wird, dass  $m_I$  und  $r_{S,I}$  dem Wertepaar  $m_S$  und  $r_{S,S}$  entsprechen. Wie es aus der rechten Auftragung aus Figur 2 ersichtlich ist, stehen in der Regel eine Mehrzahl an Wertepaaren  $m_S$  und  $r_{S,S}$  zur Verfügung, um eine gewisse Eigenfrequenz  $v_{F,S}$  zu erreichen. Aus der Mehrzahl an den Wertepaaren kann ein Wertepaar  $m_S$  und  $r_{S,S}$  derart ausgewählt werden, dass der Rotor der Strömungsmaschine ausgewuchtet ist und/oder dass der Aufwand zum Abtragen minimal ist. Das Abtragen 24 kann beispielsweise durch ein Schleifen erfolgen.

**[0028]** Zur Kontrolle des Abtragens 24 kann die Eigenfrequenz  $v_{S,I}$  der Laufschaufel 1 im Stillstand gemessen 20 werden. Dazu wird die Laufschaufel 1 an ihrem Schaufelfuß 2 eingespannt, die Schwingung der Laufschaufel 1 angeregt, beispielsweise durch einen Schlag, und der von der Laufschaufel 1 emittierte Schall gemessen. Alternativ kann zur Kontrolle des Abtragens 24 auch die Masse  $m$  und radiale Schwerpunktslage  $r_S$  der Laufschaufel 1 gemessen werden 19. Mit einer besonders hohen Genauigkeit kann die Kontrolle durchgeführt werden, indem sowohl die Eigenfrequenz  $v_{S,I}$  20 als auch die Masse  $m$  und radiale Schwerpunktslage  $r_S$  19 gemessen werden.

**[0029]** Es ist auch möglich, bereits vor dem Abtragen 24 des Materials sowohl die Masse  $m$  und die radiale Schwerpunktslage  $r_S$  19 als auch die Eigenfrequenz  $v_{S,I}$  20 zu messen, um damit die Ist-Eigenfrequenz  $v_{F,I}$  mit einer besonders hohen Genauigkeit zu messen. Mittels eines Vergleichs der gemessenen Eigenfrequenz  $v_{S,I}$  mit einer durch Interpolieren von  $m_I$  und  $r_{S,I}$  in der Wertetabelle  $v_S(m, r_S)$  ermittelten Ist-Eigenfrequenz kann eine Anpassung des Modells zum Ermitteln der Eigenfrequenzen  $v_F$  und  $v_S$  durchgeführt werden.

**[0030]** In dem Fall, dass  $v_{F,I}$  innerhalb einer Toleranz um  $v_{F,S}$  liegt, können optionale Verfahrensschritte 22 an der Laufschaufel 1 durchgeführt werden, wie beispielsweise ein Auftragen einer Beschichtung. Anschließend wird die Laufschaufel 1 in das Laufschaufelgitter eingebaut 23.

**[0031]** Obwohl die Erfindung im Detail durch die bevorzugten Ausführungsbeispiele näher illustriert und beschrieben wurde, so ist die Erfindung nicht durch die offenbarten Beispiele eingeschränkt und andere Variatio-

nen können vom Fachmann hieraus abgeleitet werden, ohne den Schutzzumfang der Erfindung zu verlassen.

## 5 Patentansprüche

1. Verfahren zum Verstimmen eines eine Mehrzahl an Laufschaufeln (1) aufweisenden Laufschaufelgitters einer Strömungsmaschine mit den Schritten:

a) Festlegen (14) für jede der Laufschaufeln (1) des Laufschaufelgitters mindestens einer Soll-Eigenfrequenz  $v_{F,S}$ , die die Laufschaufel (1) für mindestens eine vorherbestimmte Schwingungsmoden im Normalbetrieb der Strömungsmaschine unter einer Fliehkrafteinwirkung hat, derart, dass die Schwingungsbelastung des Laufschaufelgitters unter der Fliehkraft unterhalb einer Toleranzgrenze liegt;

b) Aufstellen (16) einer Wertetabelle  $v_F(m, r_S)$  mit ausgewählten diskreten Massewerten  $m$  und radialen Schwerpunktslagen  $r_S$ , die sich aus Variationen (6 bis 9) der Nenngeometrie (5) der Laufschaufel (1) ergeben, und Ermitteln der jeweiligen Eigenfrequenz  $v_F$  der vorherbestimmten Schwingungsmoden unter der Fliehkraft für jedes ausgewählte Wertepaar  $m$  und  $r_S$ ;

c) Messen (19) der Masse  $m_I$  und der radialen Schwerpunktslage  $r_{S,I}$  einer der Laufschaufeln (1);

d) Bestimmen (17) von einer Ist-Eigenfrequenz  $v_{F,I}$  der Laufschaufel (1) unter der Fliehkraft durch Interpolieren der gemessenen Masse  $m_I$  und der gemessenen radialen Schwerpunktslage  $r_{S,I}$  in der Wertetabelle  $v_F(m, r_S)$ ;

e) in dem Fall, dass  $v_{F,I}$  außerhalb einer Toleranz um  $v_{F,S}$  liegt, Auswählen aus der Wertetabelle  $v_F(m, r_S)$  eines Wertepaars  $m_S$  und  $r_{S,S}$  derart, dass sich  $v_{F,I}$  an  $v_{F,S}$  zumindest annähert, und Abtragen (24) von Material der Laufschaufel (1) derart, dass  $m_I$  und  $r_{S,I}$  dem Wertepaar  $m_S$  und  $r_{S,S}$  entsprechen;

f) Wiederholen der Schritte c) bis e) bis  $v_{F,I}$  innerhalb der Toleranz um  $v_{F,S}$  liegt.

2. Verfahren zum Verstimmen eines eine Mehrzahl an Laufschaufeln (1) aufweisenden Laufschaufelgitters einer Strömungsmaschine mit den Schritten:

a) Festlegen (14) für jede der Laufschaufeln (1) des Laufschaufelgitters mindestens einer Soll-Eigenfrequenz  $v_{F,S}$ , die die Laufschaufel (1) für mindestens eine vorherbestimmte Schwingungsmoden im Normalbetrieb der Strömungsmaschine unter einer Fliehkrafteinwirkung hat, derart, dass die Schwingungsbelastung des Laufschaufelgitters unter der Fliehkraft unterhalb einer Toleranzgrenze liegt;

- b) Aufstellen (16) einer Wertetabelle  $v_F(m, r_S)$  und einer Wertetabelle  $v_S(m, r_S)$  mit ausgewählten diskreten Massewerten  $m$  und radialen Schwerpunktslagen  $r_S$ , die sich aus Variationen (6 bis 9) der Nenngeometrie (5) der Laufschaufel (1) ergeben, und Ermitteln der jeweiligen Eigenfrequenz  $v_F$  der vorherbestimmten Schwingungsmoden unter der Fliehkraft und der jeweiligen Eigenfrequenz  $v_S$  der vorherbestimmten Schwingungsmoden im Stillstand der Laufschaufel (1) für jedes ausgewählte Wertepaar  $m$  und  $r_S$ ;
- c) Messen (19) der Masse  $m_l$  und der radialen Schwerpunktslage  $r_{S,l}$  einer der Laufschaufeln (1);
- d) Bestimmen (17) von einer Ist-Eigenfrequenz  $v_{F,l}$  der Laufschaufel (1) unter der Fliehkraft durch Interpolieren der gemessenen Masse  $m_l$  und der gemessenen radialen Schwerpunktslage  $r_{S,l}$  in der Wertetabelle  $v_F(m, r_S)$ ;
- e) in dem Fall, dass  $v_{F,l}$  außerhalb einer Toleranz um  $v_{F,S}$  liegt, Auswählen aus der Wertetabelle  $v_F(m, r_S)$  eines Wertepaars  $m_S$  und  $r_{S,S}$  derart, dass sich  $v_{F,l}$  an  $v_{F,S}$  zumindest annähert, und Abtragen (24) von Material der Laufschaufel (1) derart, dass  $m_l$  und  $r_{S,l}$  dem Wertepaar  $m_S$  und  $r_{S,S}$  entsprechen;
- f) in dem Fall, dass Material abgetragen wurde, Messen (20) der Eigenfrequenz  $v_{S,l}$  der Laufschaufel (1) im Stillstand;
- g) Wiederholen der Schritte e) bis f) oder c) bis f) bis  $v_{F,l}$  innerhalb der Toleranz um  $v_{F,S}$  und  $v_{S,l}$  innerhalb einer der Toleranz entsprechenden Toleranz um  $v_{S,S}$  liegt.
3. Verfahren gemäß Anspruch 1, wobei die vorherbestimmten Schwingungsmoden derart gewählt werden, dass die zu den Schwingungsmoden zugehörigen Eigenfrequenzen  $v_{F,S}$  gleich oder niederfrequenter als eine Vielfache Harmonische der Rotordrehfrequenz sind, insbesondere die Achtfache Harmonische, wobei jeweils eine Wertetabelle  $v_F(m, r_S)$  für eine Mehrzahl oder für alle der Schwingungsmoden aufgestellt (16) wird, die Ist-Eigenfrequenz  $v_{F,l}$  für jede Wertetabelle bestimmt (17) wird und das Wertepaar  $m_S$  und  $r_{S,S}$  derart ausgewählt wird, dass sich die bestimmten  $v_{F,l}$  an die festgelegten  $v_{F,S}$  zumindest annähern.
4. Verfahren gemäß Anspruch 2, wobei die vorherbestimmten Schwingungsmoden derart gewählt werden, dass die zu den Schwingungsmoden zugehörigen Eigenfrequenzen  $v_{F,S}$  gleich oder niederfrequenter als eine Vielfache Harmonische der Rotordrehfrequenz sind, insbesondere die Achtfache Harmonische, wobei jeweils eine Wertetabelle  $v_F(m, r_S)$  und jeweils eine Wertetabelle  $v_S(m, r_S)$  für eine Mehrzahl oder für alle der Schwingungsmoden aufgestellt (16) wird, die Ist-Eigenfrequenz  $v_{F,l}$  und die Ist-Eigenfrequenz  $v_{S,l}$  für jede Wertetabelle bestimmt (17) wird, das Wertepaar  $m_S$  und  $r_{S,S}$  derart ausgewählt wird, dass sich die bestimmten  $v_{F,l}$  an die festgelegten  $v_{F,S}$  zumindest annähern und die Eigenfrequenzen  $v_{S,l}$  für die vorherbestimmten Schwingungsmoden gemessen (20) werden.
5. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei die Variationen (6 bis 9) der Nenngeometrie (5) ein Verdicken und/oder ein Verdünnen der Laufschaufel (1) in jedem radialen Schnitt oder in radialen Abschnitten aufweisen.
6. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die Variationen (6 bis 9) der Nenngeometrie (5) ein lineares Variieren (8, 9) der Dicke der Laufschaufel (1) über den Radius aufweisen.
7. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei die Soll-Eigenfrequenzen  $v_{F,S}$  derart festgelegt werden, dass in dem Laufschaufelgitter benachbart angeordnete Laufschaufeln ungleiche Soll-Eigenfrequenzen  $v_{F,S}$  haben und dass die Soll-Eigenfrequenzen  $v_{F,S}$  verschieden sind von der Rotordrehfrequenz im Normalbetrieb der Strömungsmaschine bis einschließlich einer Vielfachen Harmonischen der Rotordrehfrequenz, insbesondere der Achtfachen Harmonischen der Rotordrehfrequenz.
8. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei das Messen der Masse  $m_l$  und der radialen Schwerpunktslage  $r_{S,l}$  relativ als Differenzmessung zu einer Referenzschaufel erfolgt, die dreidimensional vermessen wurde, insbesondere mittels eines Koordinatenmessgeräts und/oder mittels eines optischen Verfahrens.
9. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei das Wertepaar  $m_S$  und  $r_{S,S}$  derart ausgewählt wird, dass die Unwucht des Rotors verringert wird und/oder dass der Aufwand zum Abtragen minimal wird.
10. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei die vorherbestimmte Schwingungsmoden derart gewählt wird, dass die Eigenfrequenz  $v_{F,S}$  der vorherbestimmten Schwingungsmoden gleich oder niederfrequenter als eine Vielfache Harmonische der Rotordrehfrequenz ist, insbesondere die Achtfache Harmonische der Rotordrehfrequenz.
11. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei die Eigenfrequenzen  $v_F$  und/oder  $v_l$  rechnerisch bestimmt werden,

insbesondere mittels einer Finite Elemente Methode.

12. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 2, 4 bis 11, wobei beim Messen der Eigenfrequenz  $\nu_{S,l}$  die Laufschaufel (1) an ihrem Schaufelfuß (2) eingespannt wird, die Schwingung der Laufschaufel (1) angeregt wird und gemessen wird. 5
13. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 2, 4 bis 12, wobei mittels eines Vergleichs der gemessenen Eigenfrequenz  $\nu_{S,l}$  mit einer durch Interpolieren von  $m_l$  und  $r_{S,l}$  in der Wertetabelle  $\nu_S(m, r_S)$  ermittelten Ist-Eigenfrequenz eine Anpassung des Modells zum Ermitteln der Eigenfrequenzen  $\nu_F$  und  $\nu_S$  durchgeführt wird. 10 15

20

25

30

35

40

45

50

55

FIG 1

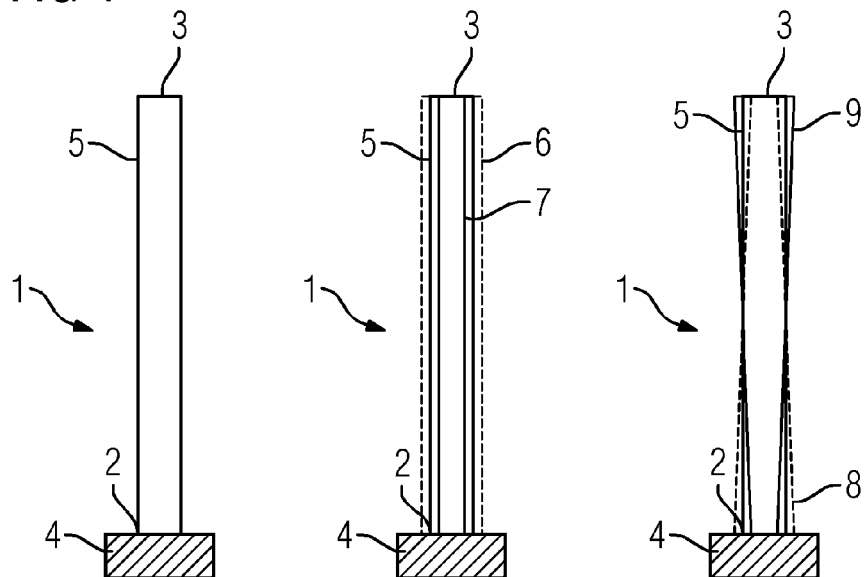


FIG 2

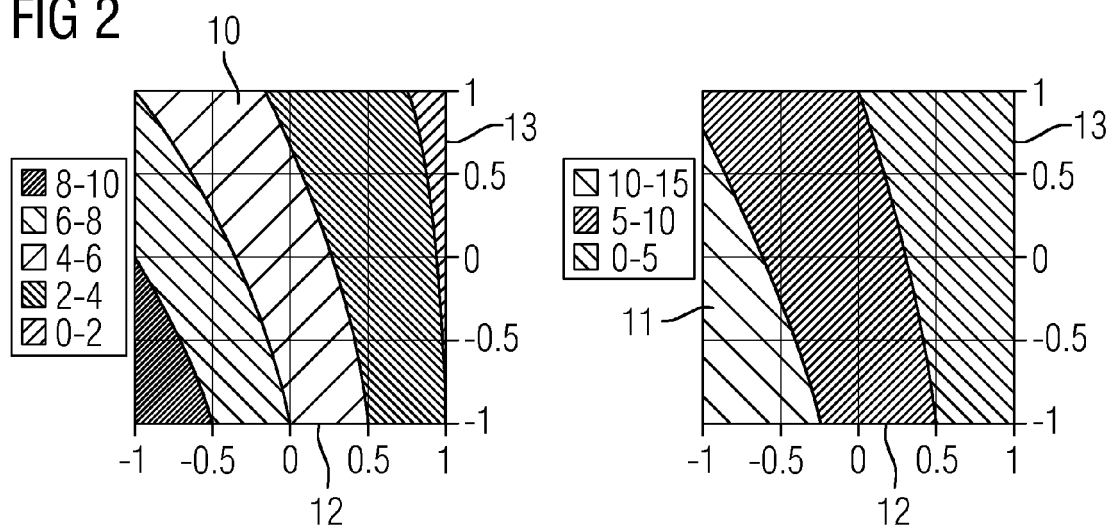
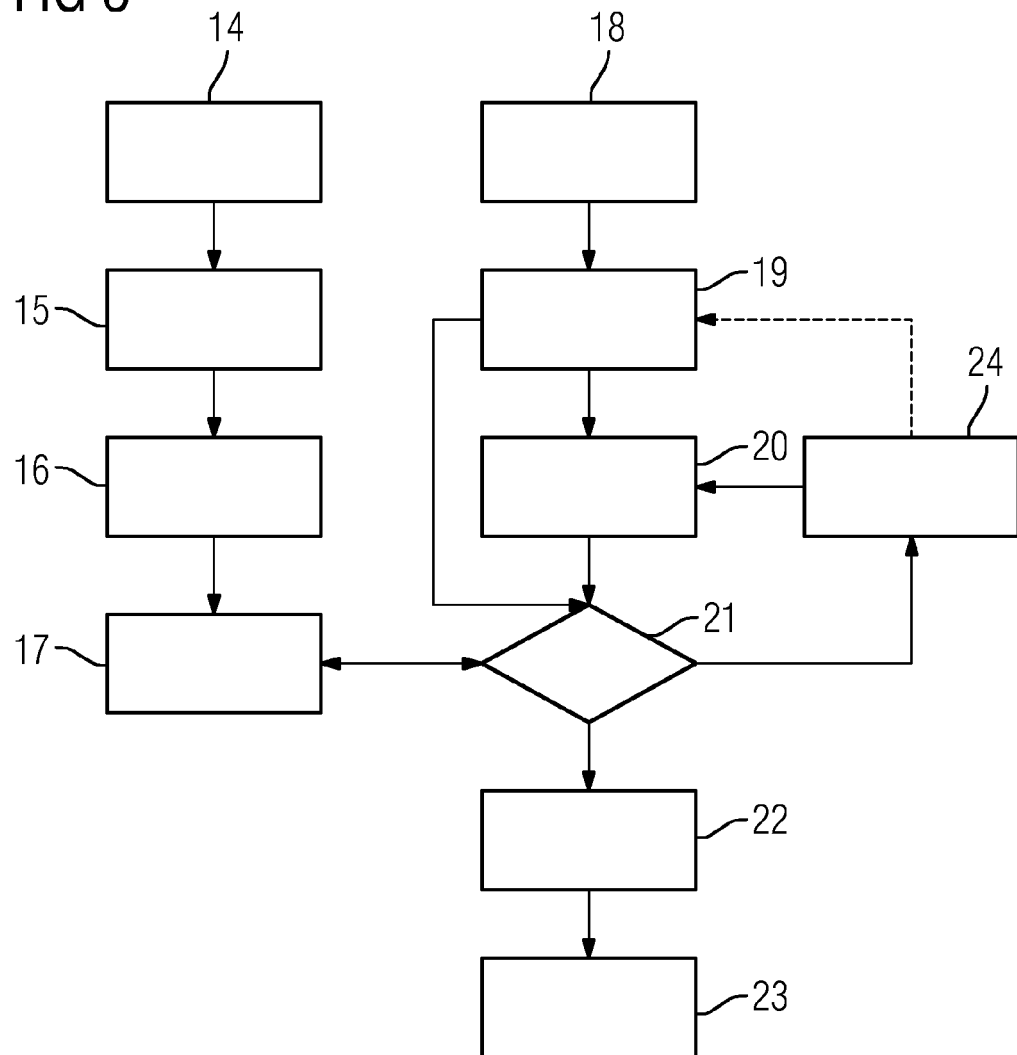




FIG 3





## EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

 Nummer der Anmeldung  
 EP 13 15 3956

| EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE  |   |   |                                    |
|---|---|---|------------------------------------|
| Kategorie   | Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile   | Betrifft Anspruch   | KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC) |
| A   | EP 1 589 191 A1 (SNECMA [FR])<br>26. Oktober 2005 (2005-10-26)<br>* Absatz [0042] - Absatz [0072];<br>Abbildungen *                 | 1-13  | INV.<br>F01D5/16                   |
| A   | DE 10 2009 033618 A1 (MTU AERO ENGINES GMBH [DE]) 20. Januar 2011 (2011-01-20)<br>* Absatz [0026] - Absatz [0030];<br>Abbildungen * | 1-13  |                                    |
| A   | EP 1 640 562 A1 (SIEMENS AG [DE])<br>29. März 2006 (2006-03-29)<br>* das ganze Dokument *   | 1-13  |                                    |
| A   | US 6 042 338 A (BRAFFORD PERRY W [US] ET AL) 28. März 2000 (2000-03-28)<br>* das ganze Dokument *                                   | 1-13  |                                    |
|   |   |   | RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)    |
|   |   |   | F01D                               |
| Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt   |   |   |                                    |
| Recherchenort<br>München  |   | Abschlußdatum der Recherche<br>11. Juli 2013  | Prüfer<br>Teissier, Damien         |
| KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE<br>X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet<br>Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie<br>A : technologischer Hintergrund<br>O : mündliche Offenbarung<br>P : Zwischenliteratur |   | T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze<br>E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist<br>D : in der Anmeldung angeführtes Dokument<br>L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument<br>& : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument |                                    |

 1  
 EPO FORM 1503 03/82 (P04C03)

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

EP 13 15 3956

In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patendokumente 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.

11-07-2013

| Im Recherchenbericht<br>angeführtes Patendokument | Datum der<br>Veröffentlichung | Mitglied(er) der<br>Patentfamilie | Datum der<br>Veröffentlichung |
|---|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| EP 1589191 A1                                     | 26-10-2005                    | CA 2503659 A1                     | 20-10-2005                    |
|   |                               | EP 1589191 A1                     | 26-10-2005                    |
|   |                               | ES 2351507 T3                     | 07-02-2011                    |
|   |                               | FR 2869069 A1                     | 21-10-2005                    |
|   |                               | RU 2372492 C2                     | 10-11-2009                    |
|   |                               | US 2005249586 A1                  | 10-11-2005                    |
| -----   |                               |                                   |                               |
| DE 102009033618 A1                                | 20-01-2011                    | KEINE                             |                               |
| -----   |                               |                                   |                               |
| EP 1640562 A1                                     | 29-03-2006                    | KEINE                             |                               |
| -----   |                               |                                   |                               |
| US 6042338 A                                      | 28-03-2000                    | KEINE                             |                               |
| -----   |                               |                                   |                               |

EPO FORM P0461

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