(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) EP 1 724 440 A1

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
22.11.2006 Patentblatt 2006/47

(51) Int Cl.:
F01D 5/14 *(2006.01)*

(21) Anmeldenummer: **05010100.5**

(22) Anmeldetag: **10.05.2005**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IS IT LI LT LU MC NL PL PT RO SE SI SK TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
AL BA HR LV MK YU

(71) Anmelder: **MTU Aero Engines GmbH**
80995 München (DE)

(72) Erfinder: **Fiala, Andreas, Dr.**
80339 München (DE)

(54) **Verfahren zur Strömungsoptimierung in mehrstufigen Turbomaschinen**

(57) Verfahren zur Strömungsoptimierung in mehrstufigen Turbomaschinen, bei welchem die Anströmung eines dritten von jeweils drei aufeinander folgenden Schaufelkränzen (1,2,3) optimiert wird, wobei der erste und der dritte Schaufelkranz mit gleichen Schaufelzahlen an der selben Einheit Rotor oder Stator angeordnet sind, wobei der zweite Schaufelkranz an der anderen der beiden Einheiten Rotor oder Stator angeordnet ist, und wobei ein Betriebszustand mit einem hohen Zeitanteil an der Betriebsdauer ausgewählt wird unter Ermittlung bzw. Vorgabe der jeweiligen Betriebsparameter.
Bei diesem Betriebszustand werden im Bereich der Austrittskanten (36) von Schaufelprofilen (19) des zweiten Schaufelkranzes periodisch auftretende Maxima der Versperrung (V_{max}) innerhalb eines vorgegebenen Toleranzwinkels (Δwt) auf die Eintrittskanten (27) von Schaufelprofilen (20) des dritten Schaufelkranzes gelenkt, wozu bedarfsweise die Positionen bzw. die Geometrien von Schaufelprofilen (18,19,20) wenigstens eines der drei Schaufelkränze (1,2,3) verändert werden.

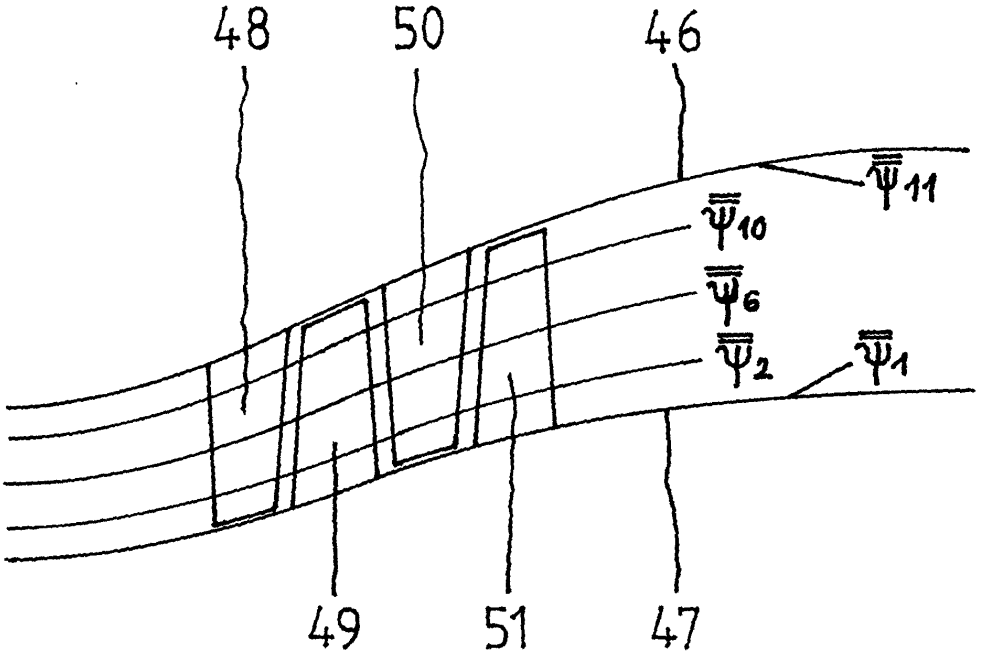


Fig. 3a

EP 1 724 440 A1

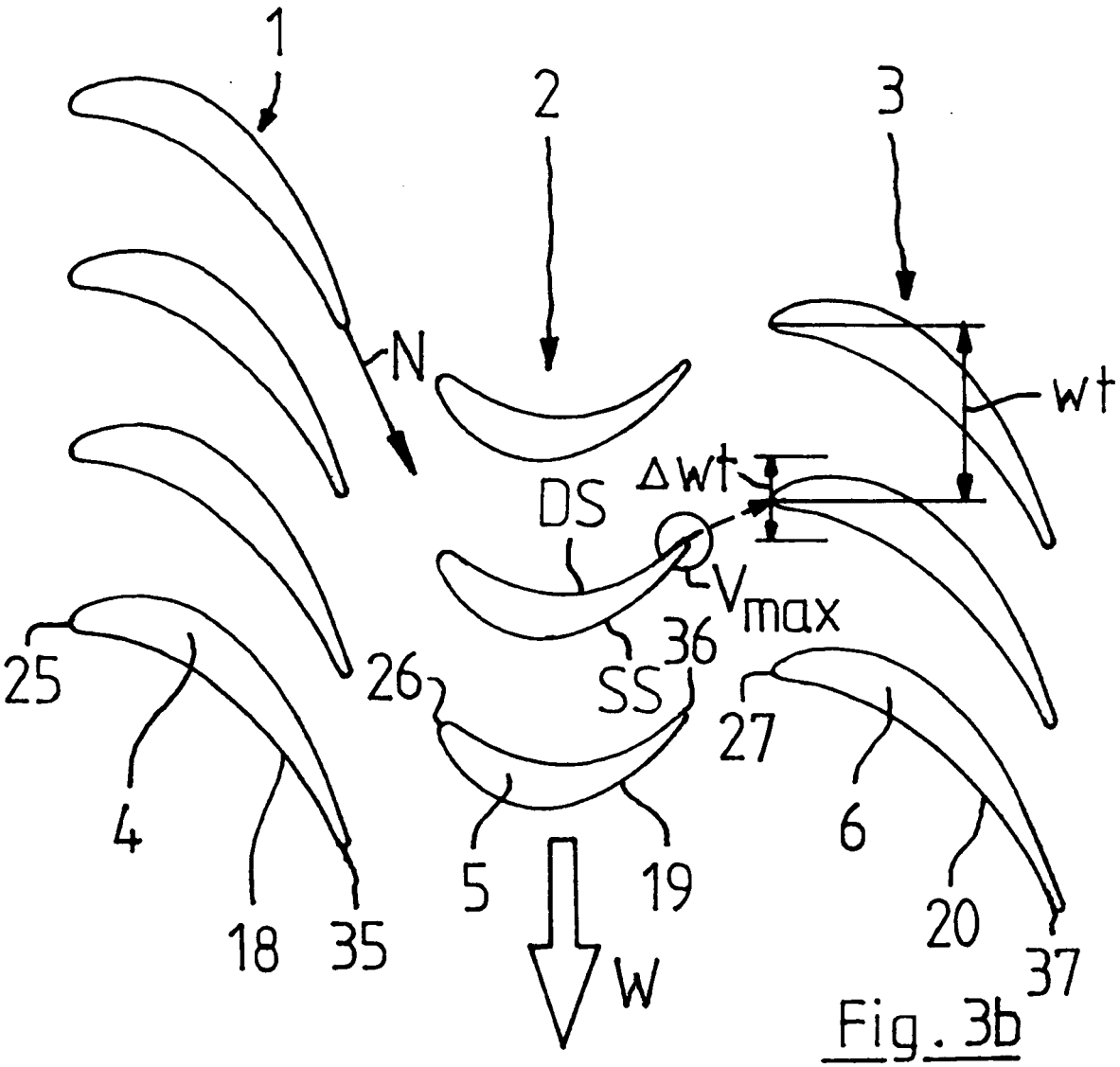


Fig. 3b

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Strömungsoptimierung in mehrstufigen Turbomaschinen, bei welchem die Anströmung eines dritten von jeweils drei aufeinander folgenden Schaufelkränzen optimiert wird, gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruches 1.

[0002] Derartige Verfahren zur Strömungsoptimierung im Bereich dreier Schaufelkränze, von denen der erste und der dritte Schaufelkranz ein Leit- oder Laufschaufelkranz sein kann, der zweite Schaufelkranz umgekehrt ein Lauf- oder Leitschaufelkranz, sind aus dem Stand der Technik bekannt.

[0003] Die europäische Patentschrift EP 0 756 667 B1 schützt ein gattungsgemäßes Verfahren zur Strömungsoptimierung, bei dem die relative Schaufelprofilpositionierung zwischen dem ersten und dem dritten Schaufelkranz als "Clocking" bezeichnet wird. Die bevorzugte Anwendung ist hier das Leitschaufel-Clocking, d. h. der erste und der dritte Schaufelkranz sind Leitschaufelkränze, wohingegen der zweite Schaufelkranz ein Laufschaufelkranz ist. Das Prinzip dieses Verfahrens besteht darin, dass die Strömungspfade der Nachläufe der Schaufelprofile des ersten Schaufelkranzes bis zum Eintritt in den dritten Schaufelkranz ermittelt werden, und die Eintrittskanten der Schaufelprofile des dritten Schaufelkranzes innerhalb eines vorgegebenen Toleranzwinkelbereichs (25 % des Schaufelteilungswinkels) relativ zu den Eintrittspositionen der Nachläufe positioniert werden. Optimal soll dabei ein direktes/mittiges Auftreffen jedes Nachlaufes auf die jeweilige Eintrittskante sein. Jeder Nachlauf geht als zusammenhängender, turbulenter Strom von der Austrittskante des Schaufelprofils des ersten Schaufelkranzes ab und wird auf seinem Weg durch den zweiten, rotierenden Schaufelkranz in separate, sich nebeneinander auf bestimmten Bahnen bewegende Stücke zerteilt. Die Anzahl der Bahnen entspricht dem Umfang der Strömungsfläche geteilt durch die Anzahl der Schaufeln des ersten Schaufelkranzes.

Auf diesen Bahnen bewegen sich so zeitlich hintereinander die bewegten Stücke benachbarter Nachläufe des ersten Schaufelkranzes. Patentgemäß werden die Nachlaufstücke über die Zeit gemittelt, so dass rechnerisch wieder ein zusammenhängender Nachlauf entsteht, der auf den dritten Schaufelkranz trifft. Eine weitere, vereinfachende Annahme des patentierten Verfahrens besteht darin, dass die Strömung der Nachläufe durch den zweiten Schaufelkranz nur auf einer Strömfläche erfolgen soll und nicht berücksichtigt wird, dass sich der Nachlauf auch radial unterschiedlich anordnet.

[0004] Unter all diesen vereinfachenden Annahmen und Näherungen leidet die Genauigkeit und damit die Treffsicherheit des Verfahrens.

Die europäische Patentschrift EP 1 201 877 B 1 schützt ebenfalls ein gattungsgemäßes Verfahren zur Strömungsoptimierung, welches auch am Beispiel zweier relativ zueinander zu positionierender Leitschaufelkränze mit einem dazwischen koaxial angeordneten Laufschaufelkranz erläutert wird. Beim Durchgang der Nachläufe des ersten Schaufelkranzes durch den bewegten, zweiten Schaufelkranz werden hier nur die thermodynamischen und fluiddynamischen Verhältnisse auf den Saugseiten der Schaufelprofile des zweiten Schaufelkranzes betrachtet. Es wird gesagt, dass die dort passierenden Nachlaufstücke mit der saugseitigen Schaufelgrenzschicht interagieren und sich in der Weise verändern, dass mindestens zwei voneinander beabstandete Zonen identifizierbar sind, die sich in wenigstens einer thermo- bzw. fluiddynamischen Eigenschaft unterscheiden. Als ein bevorzugtes Unterscheidungskriterium wird die Größe der Entropie genannt. Es wird aber auch gesagt, dass es weitere, sich in ihrer Größe unterscheidende Parameter geben kann, ohne diese näher zu spezifizieren. In jedem Fall ist eine der identifizierten Zonen auszuwählen und auf die Eintrittskanten der Schaufelprofile des dritten Schaufelkranzes zu lenken. Die wenigstens eine, nicht ausgewählte Zone kann im Schaufelprofilzwischenraum passieren. Es wird zugestanden, dass es erforderlich sein kann, verschiedene Parameter auszuwerten. Es kann auch erforderlich sein, z. B. erst die Zone größerer Entropie und dann die Zone kleinerer Entropie auf die Eintrittskanten zu lenken und dabei rechnerisch/experimentell zu ermitteln, welche Maßnahme zu einer Wirkungsgraderhöhung führt. Im Grunde lehrt dieses Patent ein Trial-and-Error-Prinzip, das den Fachmann zu mehreren, unterschiedlichen Maßnahmen zwingt.

[0005] Demgegenüber besteht die Aufgabe der vorliegenden Erfindung darin, ein klares, eindeutiges Verfahren zur Strömungsoptimierung in mehrstufigen Turbomaschinen vorzuschlagen, das eine höhere Erfolgswahrscheinlichkeit bietet, als die bekannten Verfahren.

[0006] Diese Aufgabe wird durch die in Patentanspruch 1 gekennzeichneten Merkmale gelöst, in Verbindung mit den gattungsbildenden Merkmalen in dessen Oberbegriff. Das alleinige entscheidende, fluiddynamische Kriterium ist erfindungsgemäß die sogenannte Versperrung, wobei konkret deren periodisch auftretende Maxima im Austrittsbereich des zweiten Schaufelkranzes und deren Strömungspfade bis zum Eintritt in den dritten Schaufelkranz ermittelt werden.

[0007] Diese Maxima sollen dann - innerhalb eines gewissen Toleranzwinkelbereichs - auf die Eintrittskanten der Schaufelprofile des dritten Schaufelkranzes treffen. Zur konkreten Berechnung der Versperrung wird auf die Ansprüche 7 und 8 verwiesen.

[0008] Ausgestaltungen des Verfahrens sind in den Unteransprüchen genannt.

[0009] Die Erfindung wird anschließend anhand der Zeichnungen noch näher erläutert. Dabei zeigen in vereinfachter Darstellung:

Figur 1 ein Diagramm zur Ermittlung der Veränderungsdicke δ*,

Figur 2 ein Diagramm zur Ermittlung der Versperrung V,

Figur 3a die Lage von Rotations-Stromflächen in einem beschaufelten Strömungskanal mit rotierender Nabe und stehendem Gehäuse,

Figur 3b Schaufelprofile dreier aufeinander folgender, einander definiert zugeordneter Schaufelkränze,

Figur 4 drei geometrisch unterschiedliche Schaufelkantenlinien in Ansicht mit Blick in Axialrichtung,

Figur 5 zwei geometrisch unterschiedliche Schaufeln in Ansicht mit Blick in Umfangsrichtung,

Figur 6 zwei geometrisch unterschiedliche Schaufeln in Ansicht mit Blick in Umfangsrichtung,

Figur 7 zwei gegeneinander verdrehte, ansonsten gleiche Schaufelprofile, und

Figur 8 zwei geometrisch unterschiedliche Schaufelprofile.

[0010] Bei der Durchführung des erfindergemäßen Verfahrens sind u.a. die Verdrängungsdicke δ* (Deltastar) und die Versperrung V zu ermitteln.
Figur 1 zeigt in Form eines Diagramms den qualitativen Verlauf der Stromdichte pu (y) oder im inkompressiblen Grenzfall den Verlauf der Geschwindigkeit u (y) eines strömenden, reibungsbehafteten Mediums im Bereich einer Bauteiloberfläche, wie z.B. der Oberfläche eines umströmten Schaufelprofils.

[0011] Die Koordinate y wird zumindest annähernd senkrecht zur Strömungsrichtung und somit auch annähernd senkrecht zur umströmten Bauteiloberfläche gewählt.
Bei Schaufelprofilen wird die Koordinate y bevorzugt senkrecht zu einer örtlichen Tangente der Oberfläche des Schaufelprofils definiert. Gemäß Haftbedingung ist die Geschwindigkeit u (y) an der Bauteiloberfläche "Null". Mit zunehmendem Abstand von der Bauteiloberfläche erhöht sich die Stromdichte pu (y) und die Geschwindigkeit u (y) entsprechend dem Verlauf einer stetigen, gekrümmten Kurve bis zu einem Wert $\rho_e u_e(y_e)$, wobei y_e der Wert ist, bei dem sich die Geschwindigkeit nicht mehr durch die viskose Grenzschicht ändert. Falls der Nullpunkt der Koordinate y an der Bauteiloberfläche liegt, entspricht der Wert y_e - zumindest ziemlich genau - der örtlichen Grenzschichtdicke. Für das weitere Verfahren wird der reibungsbehaftete, gekrümmte Stromdichte- oder Geschwindigkeitsverlauf durch einen reibungsfreien Verlauf mit konstanter Stromdichte $\rho_e u_e$ oder Geschwindigkeit u_e ersetzt. Hierzu wird die Bauteiloberfläche fiktiv um den Wert der Verdrängungsdicke δ* (Deltastar) verschoben, d.h. ein Schaufelprofil wird fiktiv entsprechend aufgedickt. Für das reibungsfreie Strömungsmodell muss sich der gleiche Massenstrom ergeben wie für die tatsächliche, reibungsbehaftete Strömung. Damit ergibt sich für δ* folgende Definition:

$$\delta^* = \int_0^{y_e} \left(1 - \frac{\rho u(y)}{p_e u_e(y_e)} \right) dy \quad ,$$

wobei ρ_e, u_e und y_e die entsprechenden Werte am Grenzschichtrand sind. δ* ist somit der y-Wert, dessen horizontale Linie die Stromdichte pu(y) in der Weise schneidet, dass unterhalb und oberhalb der δ*-Linie zwischen dieser und der Geschwindigkeitskurve pu(y) zwei gleich große Flächen eingeschlossen werden. Diese beiden Flächen sind in Fig. 1 diagonal entgegengesetzt schraffiert. Die Flächen werden seitlich von der vertikalen y-Achse und einer vertikalen Linie durch $\rho_e u_e$ (y_e) begrenzt. Dabei muss es sich bei der Linie nicht um eine Vertikale handeln, sondern kann durch die Änderung der Außengeschwindigkeit in der Strömung außerhalb der Grenzschichten zwischen Druck- und Saugseite diese Linie auch geneigt zur y-Achse sein. Siehe die gestrichelten Verläufe in Figur 1.
Da sich δ* bei periodisch angeordneten Schaufelprofilen des stromauf drehenden Schaufelkranzes mit der Zeit t periodisch ändert, ist Figur 1 als "Momentaufnahme" zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort zu betrachten. Für das vorliegende Verfahren muss der zeitliche Verlauf von δ* über wenigstens eine Periodendauer ermittelt werden und zwar jeweils für die Druckseite DS und die Saugseite SS des betrachteten Schaufelprofils.

[0012] Figur 2 zeigt qualitativ die Ermittlung der sogenannten Versperrung V aus der Verdrängungsdicke für die Druckseite δ^*_{DS} und der Verdrängungsdicke für die Saugseite δ^*_{SS} eines Schaufelprofils. Im Diagramm sind die Verläufe der Verdrängungsdicken jeweils positiv oberhalb der Zeitachse t aufgetragen. Man erkennt, dass die Maxima von δ^*_{DS} und δ^*_{SS} hier unterschiedlich groß (hoch) und zeitlich gegeneinander versetzt sind. Der zeitliche Verlauf der Versperrung V ergibt sich durch additive Überlagerung der Verläufe der Verdrängungsdicken von δ^*_{DS} und δ^*_{SS}. Dementsprechend liegt das Maximum der Versperrung V_{max} zeitlich zwischen den zeitversetzten Maxima der Verdrängungsdicken. Es sei erwähnt, dass die Verläufe tatsächlich selten so stetig und "harmonisch" sind, wie dargestellt, was jedoch nichts am Verfahrensprinzip ändert. Das Maximum der Versperrung V_{max} ist vorliegend im Bereich der Austrittskante eines Schaufelprofils zu bestimmen und kann alternativ aus der Verteilung senkrecht zum Nachlauf N des Schaufelprofils im Bereich stromab der Austrittskante bestimmt werden. Im ersten Fall kommt als weitere additive Größe zu den Verdrängungsdicken δ^*_{DS} und δ^*_{SS} die örtliche Schaufelprofildicke D hinzu.

Dadurch erhöht sich zwar die Größe des Maximums der Versperrung V_{max} um einen zumindest näherungsweise konstanten Summanden, der Zeitpunkt des Auftretens des Maximums bleibt aber unverändert, was für die Treffsicherheit des Verfahrens letztlich ausschlaggebend ist. Der Ausdruck "im Bereich der Austrittskante eines Schaufelprofils" soll bedeuten, dass der Ort zur Ermittlung des Maximums der Versperrung nahe der Austrittskante innerhalb des Schaufelprofils, direkt an der Austrittskante oder auch nahe der Austrittskante stromabwärts des Schaufelprofils gewählt werden kann. Letztlich kommt es darauf an, dass die weitere Bahn des Maximums der Versperrung richtig bestimmt wird.

[0013] Figur 3a zeigt einen Längsschnitt durch einen beschaufelten Strömungskanal mit einem statischen Gehäuse 46 und mit einer rotierenden Nabe 47. Am Gehäuse 46 sind Leitschaufelkränze 48, 50 angeordnet, mit der Nabe 47 rotieren Laufschaufelkränze 49,51. Vom Gehäuse 46 und der Nabe 47 ist jeweils nur die den Strömungskanal begrenzende, gekrümmt verlaufende Kontur dargestellt. Innerhalb des Strömungskanals sind drei weitere, gekrümmte Linien zu erkennen. Dabei handelt es sich um die Schnittlinien dreier Rotations-Stromflächen $\overline{\overline{\psi_2}}$, $\overline{\overline{\psi_6}}$ und $\overline{\overline{\psi_{10}}}$ mit der gewählten, axial-radialen Schnittebene. Die Stromflächen entsprechen den räumlichen Bewegungsbahnen ausgewählter "Fluidteilchen".

[0014] Da es sich in der Regel um instationäre Strömungen handelt, kann es sinnvoll bzw. erforderlich sein, die Verhältnisse durch Mitteln zu vereinfachen. In diesem Sinne ist vorliegend die Lage mehrerer Rotations-Stromflächen $\overline{\overline{\psi(z)}}$ der zeit- und umfangsgemittelten 3D-RANS-Strömungsfeldlösung wiedergegeben. RANS steht hierbei für **R**eynolds-**A**veraged-**N**avier-**S**tokes. Am Rand des Strömungskanals entsprechen die Konturen von Gehäuse 46 und Nabe 47 den jeweiligen Rotations-Stromflächen $\overline{\overline{\psi_1}}$ und $\overline{\overline{\psi_{11}}}$. Für die weiteren Betrachtungen bilden ausgewählte Rotations-Stromflächen die Schnittflächen, welche die Schaufeln in definierter Höhe (z) schneiden und Schaufelprofilschnitte erzeugen.

[0015] Figur 3b zeigt die Umsetzung des Verfahrensprinzips an der Hardware, d.h. an strömungstechnisch in Reihe angeordneten Schaufelkränzen. Die Durchströmung erfolgt hier von links nach rechts, d.h. vom Schaufelkranz 1 zum Schaufelkranz 3. Es werden also jeweils drei benachbarte Schaufelkränze 1 bis 3 betrachtet, wovon der erste Schaufelkranz 1 und der dritte Schaufelkranz 3 zu derselben Einheit "Stator" oder "Rotor" gehören. Der zweite Schaufelkranz 2 gehört zur jeweils komplementären Einheit "Rotor" oder "Stator".

Zwischen dem Schaufelkranz 1 und dem Schaufelkranz 3 gibt es somit im Betrieb keine Relativbewegung, wohingegen zwischen dem Schaufelkranz 2 und den beiden anderen Schaufelkränzen 1 und 3 im Betrieb eine Relativrotation mit konstanter Geschwindigkeit W gegeben ist. Im Beispiel gemäß Figur 3b sollen die Schaufelkränze 1 und 3 dem Stator zugehören, d.h. Leitschaufelkränze sein. Der Schaufelkranz 2 soll dem Rotor zugehören, d.h. ein Laufschaufelkranz sein. Die Darstellung gemäß Figur 3b zeigt der besseren Übersichtlichkeit wegen von den Schaufeln 4,5,6 nur die Schaufelprofile 18,19,20 auf einer bestimmten Stromfläche, d.h. in einem Stromflächenschnitt. Die Eintrittskanten der Schaufelprofile 18,19,20 tragen die Bezugszeichen 25,26,27, die Austrittskanten die Bezugszeichen 35,36,37. Die stromaufwärtigen Schaufelprofile 18 erzeugen reibungsbedingt sogenannte Nachläufe N, d.h. Strömungsgebiete mit Verwirbelung und mit reduzierter Geschwindigkeit in der gewünschten Strömungsrichtung. Die Bewegungsrichtung jedes Nachlaufs N weist eine Umfangs- und eine Meridionalkomponente auf, die sich wiederum aus einer Axial- und einer Radialkomponente zusammensetzten kann, so dass jeder Nachlauf N in den Bereich des bewegten, zweiten Schaufelkranzes 2 gelangt und von dessen aufeinander folgenden Schaufelprofilen 19 in separate Stücke zerteilt wird, welche sich durch die Strömungskanäle zwischen den Schaufeln 5 bewegen und mit den druck- und saugseitigen Grenzschichten der Schaufelprofile 19 in Wechselbeziehung treten.

Erfindungsgemäß sind im Bereich der Austrittskanten 36 der Schaufelprofile 19 dort periodisch auftretende Maxima der Versperrung V_{max} örtlich und zeitlich zu erfassen in der Vorgehensweise gemäß Figur 1 und 2. Nach Abgang von der Austrittskante 36 ist die weitere Bahn des jeweiligen Maximums der Versperrung V_{max} bis in den Bereich der Eintritts-

kanten 27 der Schaufelprofile 20 des dritten, statischen Schaufelkranzes 3 zu verfolgen.
Das Maximum der Versperrung V_{max} soll innerhalb eines vorgegebenen Toleranzwinkels Δwt auf eine Eintrittskante 27 treffen. Dieser Toleranzwinkel beträgt z.B. $\pm$ 15% des Schaufelteilungswinkels wt des dritten Schaufelkranzes 3, d.h. er erstreckt sich beiderseits der Eintrittskante 27 um jeweils 15% in Umfangsrichtung. Der gesamte Winkelbereich beträgt somit 30% des Schaufelteilungswinkels wt des dritten Schaufelkranzes 3. Falls die Messungen bzw. Berechnungen ergeben, dass die Maxima der Versperrung V_{max} tatsächlich innerhalb des vorgegebenen Toleranzwinkels Δwt auf die Eintrittskanten des dritten Schaufelkranzes 3 treffen, ist die gewünschte Strömungsoptimierung erreicht.

[0016] Falls dies nicht der Fall ist, sind an wenigstens einem der Schaufelkränze 1,2,3 geometrische Veränderungen vorzunehmen, bis das vorgenannte Kriterium erfüllt ist.

[0017] Die nächstliegende Maßnahme dürfte wohl eine relative Verdrehung der Schaufelkränze 1 und 3 sein, d.h. eine relative, begrenzte Winkelbewegung in Umfangsrichtung um die Längsmittelachse der Schaufelkränze.
Nach Optimierung ist sicherzustellen, dass die Relativpositionierung bei Aus- und Einbau bzw. im Betrieb nicht ungewollt veränderbar ist. Eine weitere, naheliegende Maßnahme ist die axiale Verschiebung wenigstens eines der Schaufelkränze 1,2,3, bevorzugt ist jedoch der Schaufelkranz 1 relativ zum Schaufelkranz 2 axial zu verschieben. Der gleiche Effekt wird durch axiale Verschiebung der Schaufelprofile relativ zu ihrem Träger erzielt, d.h. relativ zur Scheibe, zur Nabe, zum Deckband etc.. Dies ist in der Regel bereits mit weitergehenden konstruktiven Veränderungen verbunden.

[0018] Dem Fachmann ist klar, dass das vorliegende Optimierungsverfahren in der Regel nicht nur auf einer radialen Stromfläche, d.h. in einem Stromflächenschnitt, sondern in mehreren, über die radiale Erstreckung des Schaufelblattes verteilten Stromflächenschnitten durchzuführen ist.

[0019] Dies gilt insbesondere für ausgeprägt "dreidimensionale" Schaufeln mit stark variierenden Stromflächenschnitten sowie mit großer radialer Erstreckung.

[0020] Anhand der Figuren 4 bis 8 werden geometrische Schaufeländerungen erläutert, welche beim vorliegenden Optimierungsverfahren zur Anwendung kommen können.

[0021] Figur 4 zeigt in axialer Ansicht auf Statorhinterkanten die drei Schaufeln 7,8,9, welche von einem gemeinsamen Fußbereich ausgehen, aber über ihre radiale Höhe unterschiedlich verlaufen. Die durchgezogen dargestellte Schaufel 7 verläuft gerade und radial, d.h. eher konventionell "gefädelt", d.h. die Profilschnitte sind an jeder Hinterkante auf die gleiche Umfangsposition gelegt.
Die gestrichelt dargestellte Schaufel 8 verläuft gerade, aber mit einer Neigung in Umfangsrichtung. Dies wird auch als "Lean" bezeichnet. Die strichpunktiert dargestellte Schaufel 9 weist eine Krümmung in Umfangsrichtung, einen sogenannten "Bow" auf. De facto wird mit solchen Veränderungen eine Relativumfangsverschiebung der radial übereinander liegenden Profilschnitte erreicht.

[0022] Figur 5 zeigt eine Ansicht zweier Rotorschaufeln 10,11 in Umfangsrichtung. Die durchgezogen dargestellte Schaufel 10 mit Eintrittskante 28 und Austrittskante 38 besitzt einen trapezförmigen, eher konventionellen Umriss. Die gestrichelt dargestellte Schaufel 11 weist eine axial gekrümmte Eintrittskante und eine gleichsinnig axial gekrümmte Austrittskante 39 auf. Dies wird auch als "Axial Bow" oder "Sweep" bezeichnet und bewirkt primär eine Relativverschiebung der Profilschnitte in Axialrichtung.

[0023] Figur 6 zeigt eine Ansicht zweier Schaufeln 12,13 in Umfangsrichtung. Die durchgezogen dargestellte Schaufel 12 mit Eintrittskante 30 und Austrittskante 40 entspricht in ihrem trapezförmigen, konventionellen Umriss der Schaufel 10 aus Figur 5. Die gestrichelt dargestellte Schaufel 13 hat mit der Schaufel 12 den Schaufelfuß und die Schaufelspitze gemeinsam. Ihre Eintrittskante 31 und ihre Austrittskante 41 sind jedoch gegensinnig nach außen gebogen, so dass ein bauchiger Schaufelumriss entsteht. Diese Maßnahme wird auch als "Barrelling" bezeichnet. Dadurch wird primär die axiale Länge der Profilschnitte vergrößert, wobei die Vergrößerung im Bereich der mittleren radialen Höhe am ausgeprägtesten ist. Neben Schaufelfuß und Schaufelspitze kann auch nur ein anderer beliebiger Profilschnitt gemeinsam sein.

[0024] Figur 7 zeigt einen Profilschnitt durch zwei Schaufeln 14,15 mit gleichen Schaufelprofilen 21,22 in unterschiedlicher Lage. Die Eintrittskanten sind mit 32,33, die Austrittskanten mit 42,43 bezeichnet.
Das gestrichelt dargestellte Schaufelprofil 22 soll gegenüber dem durchgezogen dargestellten Schaufelprofil 21 um die hier nicht wiedergegebene Fädelachse verdreht sein. Somit sind die Eintrittskante 32 und die Austrittskante 42 der Schaufel 21 in Umfangsrichtung stärker versetzt, als die Eintrittskante 33 und die Austrittskante 43 der Schaufel 22. Diese Maßnahme wird auch als "Twist" bezeichnet. Mit der Verdrehung ändert sich sowohl die Zuströmung als auch die Abströmung eines solchen Schaufelgitters richtungsmäßig.

[0025] Figur 8 schließlich zeigt einen Profilschnitt durch zwei Schaufeln 16,17 mit gleicher Zuströmung und unterschiedlicher Abströmung. Die beiden Schaufelprofile 23 und 24 weisen eine gemeinsame Eintrittskante 34 und eine gemeinsame "Nasenkontur" auf. Das durchgezogen dargestellte Schaufelprofil 23 bewirkt durch eine stärkere Profilkrümmung auch eine stärkere Strömungsumlenkung bis zu seiner Austrittskante 44. Das gestrichelt dargestellte Schaufelprofil 24 lenkt die Strömung bis hin zu seiner Austrittskante weniger stark um. Diese Maßnahme wird auch als "Vortexing" bezeichnet.

[0026] Ohne Anspruch auf Vollständigkeit sind die vorgenannten Maßnahmen zur Strömungsveränderung einzeln

oder in vielen Kombinationen geeignet, das erfindungsgemäße Optimierungskriterium zu realisieren.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Strömungsoptimierung in mehrstufigen Turbomaschinen, insbesondere in Gasturbinen, bei welchem die Anströmung eines dritten von jeweils drei aufeinander folgenden Schaufelkränzen optimiert wird, wobei der erste und der dritte Schaufelkranz gleiche Schaufelzahlen und somit den gleichen Schaufelteilungswinkel aufweisen sowie beide koaxial an der selben Einheit Rotor oder Stator angeordnet sind, wobei zwischen dem ersten und dem dritten Schaufelkranz der zweite Schaufelkranz koaxial an der anderen der beiden Einheiten Rotor oder Stator angeordnet ist, so dass im Betrieb zwischen dem zweiten Schaufelkranz und den beiden anderen Schaufelkränzen eine Relativrotation erfolgt, und wobei ein Betriebszustand (Betriebspunkt) mit einem hohen Zeitanteil an der Betriebsdauer der Turbomaschine ausgewählt wird unter Ermittlung und/oder Vorgabe der jeweiligen Betriebsparameter, **dadurch gekennzeichnet dass** bei diesem Betriebszustand periodisch auftretende Maxima der Versperrung (V_{max}), welche im Bereich der Austrittskanten (36) von - sich in einer bestimmten Schaufelhöhe befindenden - Schaufelprofilen (19) des zweiten Schaufelkranzes (2) durch von Schaufelprofilen (18) des ersten Schaufelkranzes (1) ausgehende Nachläufe (N) induziert werden und sich vom Bereich der Austrittskanten (36) der Schaufelprofile (19) des zweiten Schaufelkranzes (2) zum Bereich der Eintrittskanten (27) von Schaufelprofilen (20) des dritten Schaufelkranzes (3) bewegen, innerhalb eines vorgegebenen Toleranzwinkels (Δwt) auf die Eintrittskanten (27) der Schaufelprofile (20) des dritten Schaufelkranzes (3) gelenkt werden, wozu bedarfsweise die Positionen und/oder die Geometrien von - sich in einer bestimmten Schaufelhöhe befindenden - Schaufelprofilen (18,19,20) wenigstens eines der drei Schaufelkränze (1,2,3) verändert werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Toleranzwinkel (Δwt) $\pm$ 15 % des Schaufelteilungswinkels (wt) des dritten Schaufelkranzes (3) beträgt.

3. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Toleranzwinkel (Δwt) $\pm$ 10 % des Schaufelteilungswinkels (wt) des dritten Schaufelkranzes (3) beträgt.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** es für unterschiedliche Schaufelhöhen, d. h. für mehrere Stromflächenschnitte vom Schaufelfuß bis zur Schaufelspitze, wiederholt durchgeführt wird.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** es so oft wiederholt wird, bis die Schaufelprofile aller Lauf- und/oder Leitschaufelkränze einer Turbomaschinenkomponente, z. B. eines Hochdruckverdichters oder einer Niederdruckturbine einer Gasturbine, in einem oder mehreren Stromflächenschnitten strömungsoptimal positioniert und/oder konturiert sind.

6. Verfahren nach einem der vorgehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** bei Gasturbinenkomponenten als maßgeblicher Betriebszustand der sogenannte Aerodynamic Design Point (ADP) mit Nenndrehzahl (100%) und mit definierten Totaldruck- und Totaltemperaturverhältnissen verwendet wird.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur Ermittlung der Größe der Versperrung (V) im Bereich der Austrittskante (36) eines Schaufelprofils (19) des zweiten Schaufelkranzes (2) die Verdrängungsdicke δ^* (Deltastar) für die Druckseite (DS) und die Saugseite (SS) des Schaufelprofils jeweils nach der Formel

$$\delta^* = \int_0^{y_e} \left(1 - \frac{\rho u(y)}{\rho_e u_e(y_e)} \right) dy$$

berechnet wird, wobei ρ die Dichte des strömenden Mediums, u die Geschwindigkeit des strömenden Mediums, y eine Koordinate senkrecht zu einer Bezugslinie, insbesondere einer Tangente der Oberfläche des Schaufelprofils (19) im Bereich der Austrittskante (36) und e ein Index für die Grenze zwischen der durch die Grenzschicht gestörten und der ungestörten Strömung ist.

8. Verfahren nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Größe der Versperrung (V) als Summe der momentanen druck- und saugseitigen Verdrängungsdicken δ^*_{DS} und δ^*_{SS} sowie gegebenenfalls zusätzlich der Schaufelprofildicke (D) im Bereich der Austrittskante (36) des Schaufelprofils (19) nach der Formel berechnet wird.

$$V = \delta^*_{DS} + \delta^*_{SS} \qquad \text{oder} \qquad V = D + \delta^*_{DS} + \delta^*_{SS}$$

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** an wenigstens einem Schaufelkranz über zumindest einen Teil der Schaufelhöhe Schaufelprofile verändert und/oder relativ zueinander verschoben und/oder verdreht werden im Sinne einer Neigung der Schaufel (8) in Umfangsrichtung (Lean), einer Krümmung der Schaufel (9) in Umfangsrichtung (Bow), einer Krümmung der Eintritts- und/oder Austrittskante (29,39/31,41) der Schaufel (11,13) (Axial Bow, Sweep, Barrelling) und/oder einer geänderten Verdrillung der Schaufel (15) (Twist) und/oder eines geänderten Abströmungswinkels der Schaufel (17) (Vortexing) bei gleich gebliebener Anströmung, d. h. bei geänderter Strömungsumlenkung.

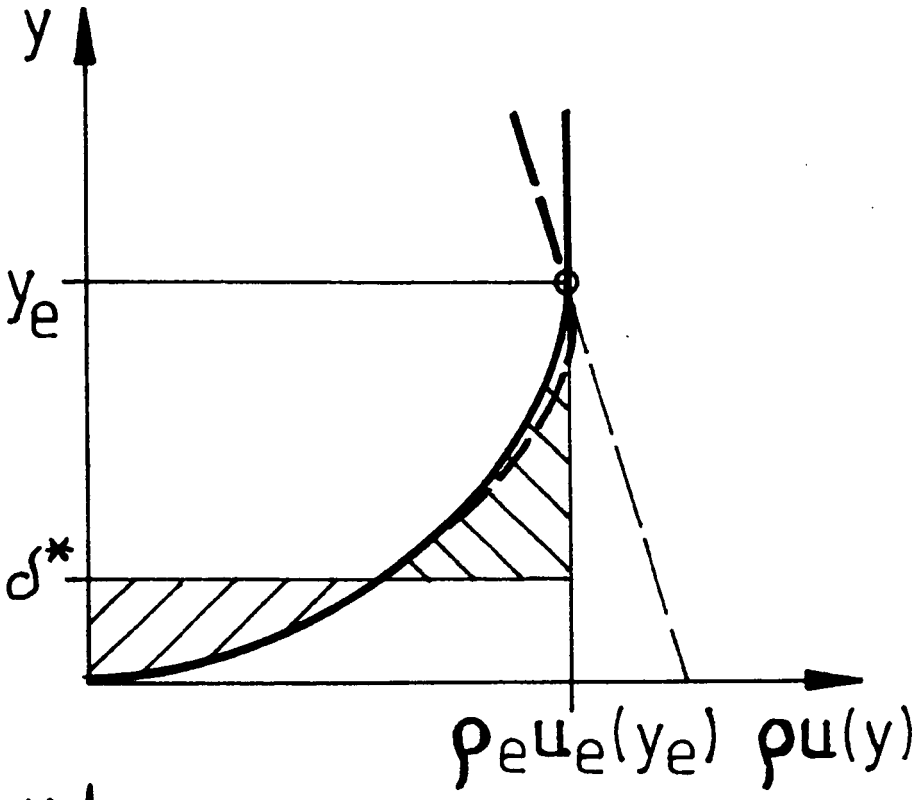


Fig.1

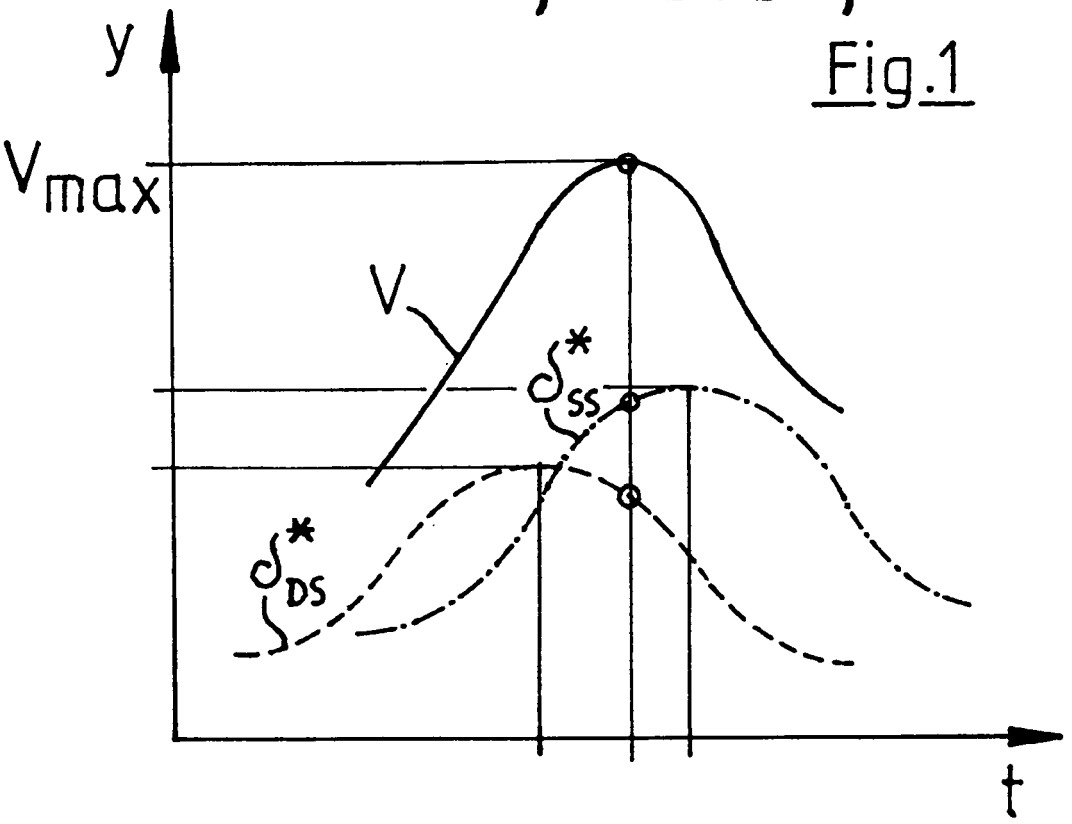


Fig.2

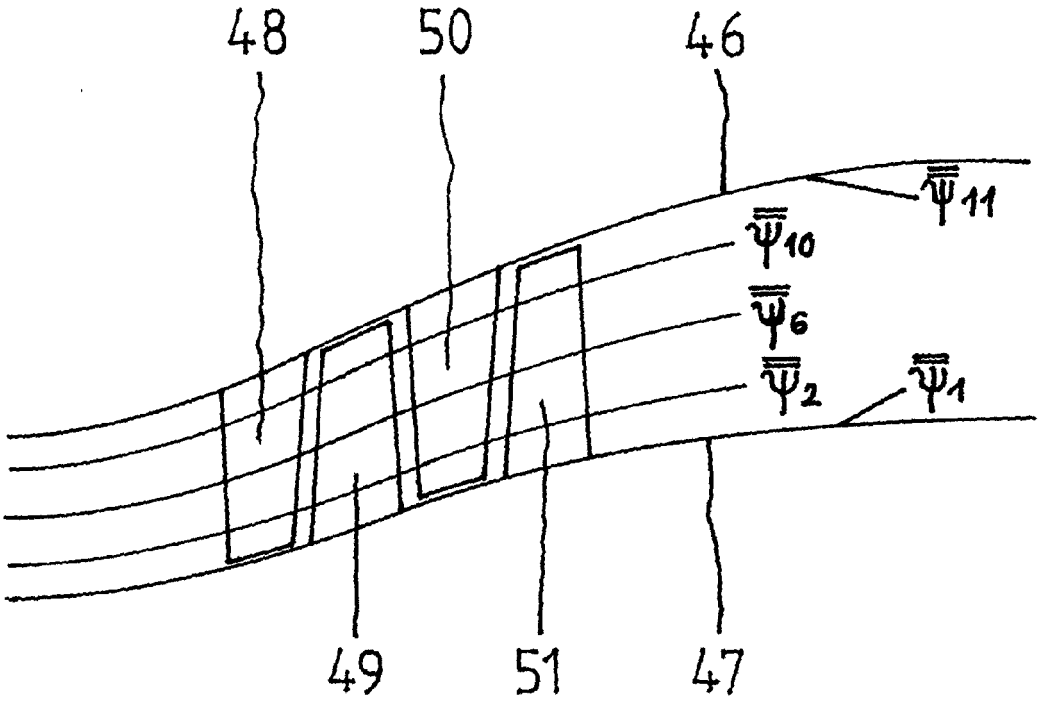

48
50
46
$\overline{\overline{\Psi}}_{11}$
$\overline{\overline{\Psi}}_{10}$
$\overline{\overline{\Psi}}_{6}$
$\overline{\overline{\Psi}}_{2}$
$\overline{\overline{\Psi}}_{1}$
49
51
47

Fig. 3a

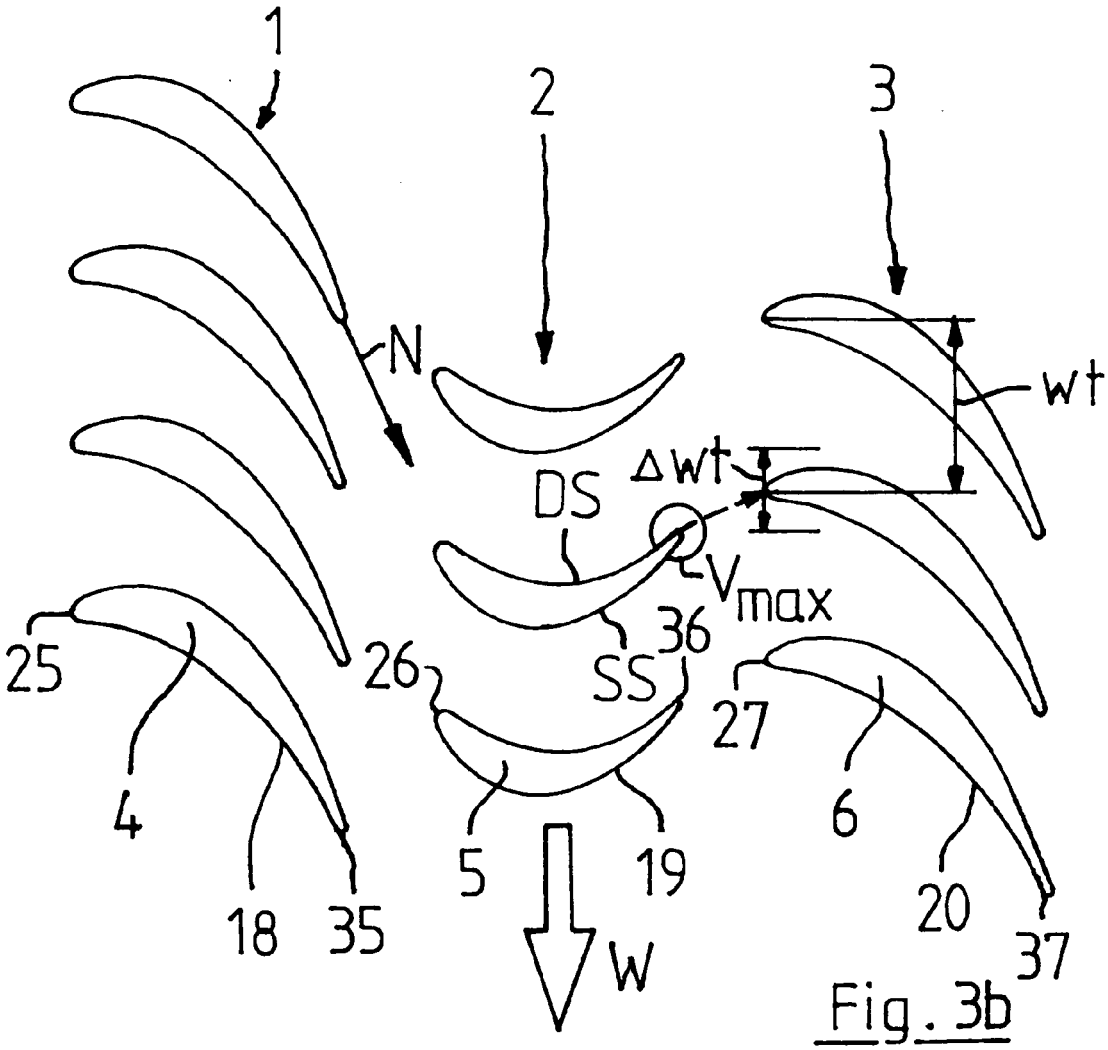


Fig. 3b

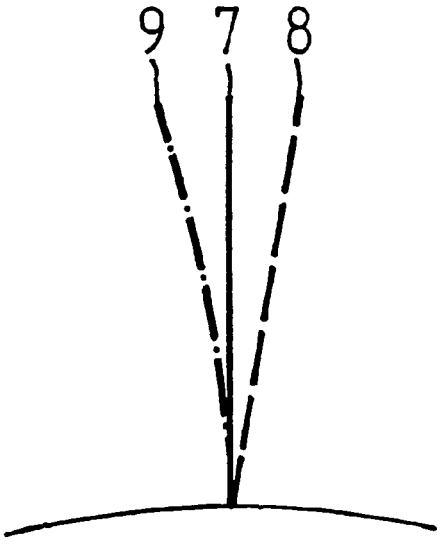


Fig. 4

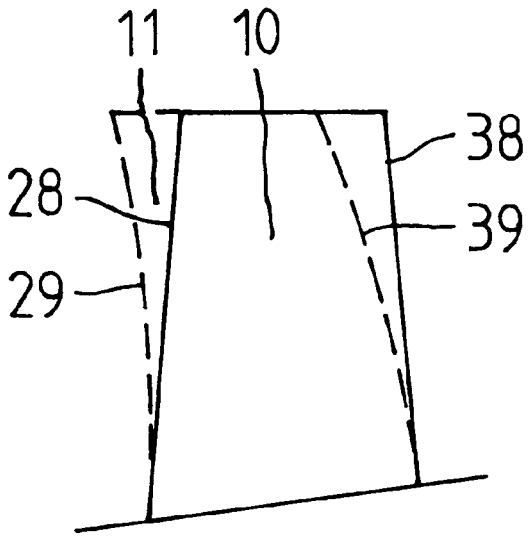


Fig.5

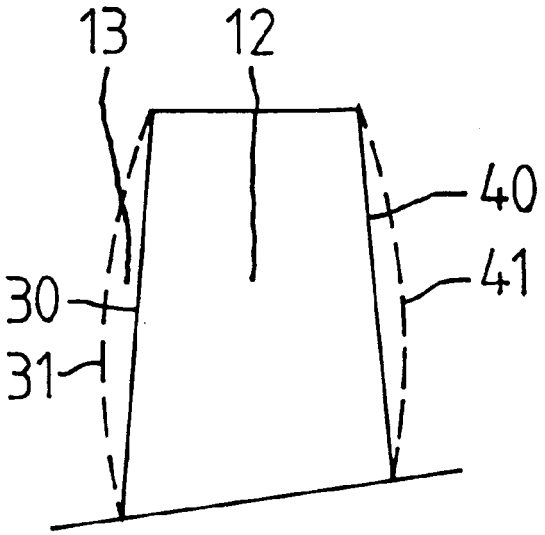


Fig.6

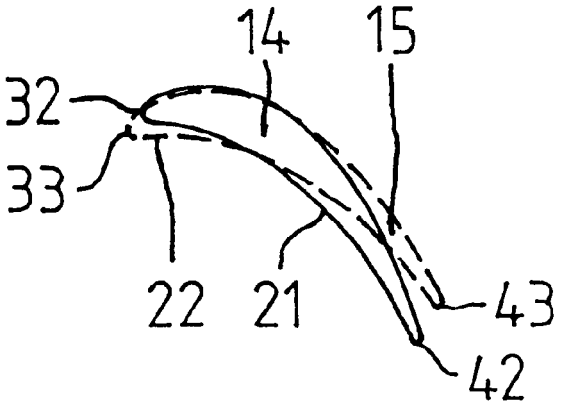


Fig.7

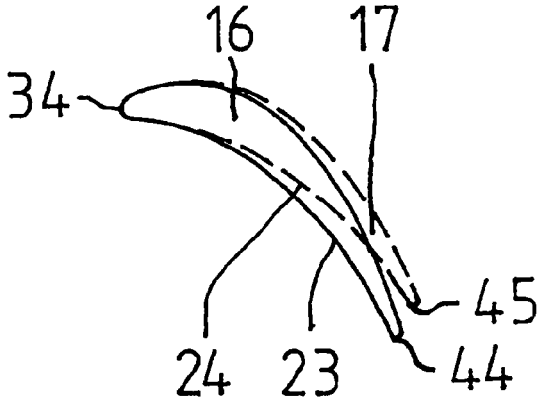


Fig.8

Europäisches Patentamt

EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung
EP 05 01 0100

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE

Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
D,X	EP 0 756 667 B (UNITED TECHNOLOGIES CORPORATION) 24. Juni 1998 (1998-06-24) * das ganze Dokument * -----	1-6,9	F01D5/14
D,X	EP 1 201 877 A (FIATAVIO S.P.A; AVIO S.P.A) 2. Mai 2002 (2002-05-02) * das ganze Dokument * -----	1,4-6,9	
X	DE 102 37 341 A1 (SIEMENS AG) 26. Februar 2004 (2004-02-26) * Absatz [05.2]; Abbildung 6 * -----	1,4-6,9	
X	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN Bd. 003, Nr. 137 (M-080), 14. November 1979 (1979-11-14) & JP 54 114618 A (TOSHIBA CORP), 6. September 1979 (1979-09-06) * Zusammenfassung * -----	1,4-6,9	
A	EP 1 201 880 A (MTU AERO ENGINES GMBH) 2. Mai 2002 (2002-05-02) * das ganze Dokument * -----	1,4-6,9	
A	HUMMEL F: "WAKE-WAKE INTERACTIONS AND ITS POTENTIAL FOR CLOCKING IN A TRANSONIC HIGH PRESSURE TURBINE" ASME PAPER, XX, XX, Nr. 2001-GT-302, 2001, Seiten 1-9, XP009053708 -----	4-6,9	

RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)

F01D
F04D
F15D
G05B
G06F

Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt

Recherchenort	Abschlußdatum der Recherche	Prüfer
München	10. Februar 2006	Koch, R

KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE

X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet
Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie
A : technologischer Hintergrund
O : nichtschriftliche Offenbarung
P : Zwischenliteratur

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

3

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR. EP 05 01 0100

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.

10-02-2006

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
EP 0756667 B	24-06-1998	DE 69503122 D1	30-07-1998
		DE 69503122 T2	18-02-1999
		EP 0756667 A1	05-02-1997
		JP 9512320 T	09-12-1997
		WO 9529331 A2	02-11-1995
		US 5486091 A	23-01-1996
EP 1201877 A	02-05-2002	AT 277276 T	15-10-2004
		CA 2352432 A1	23-04-2002
		DE 60105737 D1	28-10-2004
		DE 60105737 T2	10-11-2005
		IT TO20001001 A1	23-04-2002
		US 2002048510 A1	25-04-2002
DE 10237341 A1	26-02-2004	CN 1668853 A	14-09-2005
		WO 2004020841 A1	11-03-2004
		EP 1529169 A1	11-05-2005
JP 54114618 A	06-09-1979	KEINE	
EP 1201880 A	02-05-2002	AT 277277 T	15-10-2004
		CA 2360395 A1	27-04-2002
		DE 10053361 C1	06-06-2002
		US 2002057966 A1	16-05-2002

EPO FORM P0461

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

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- EP 0756667 B1 **[0003]**
- EP 1201877 A **[0004]**