



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:  
**24.05.2023 Patentblatt 2023/21**

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):  
**F01D 5/14<sup>(2006.01)</sup>**

(21) Anmeldenummer: **22203399.5**

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):  
**F01D 5/141; F05D 2240/303**

(22) Anmeldetag: **24.10.2022**

(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 ME MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR**  
Benannte Erstreckungsstaaten:  
**BA**  
Benannte Validierungsstaaten:  
**KH MA MD TN**

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

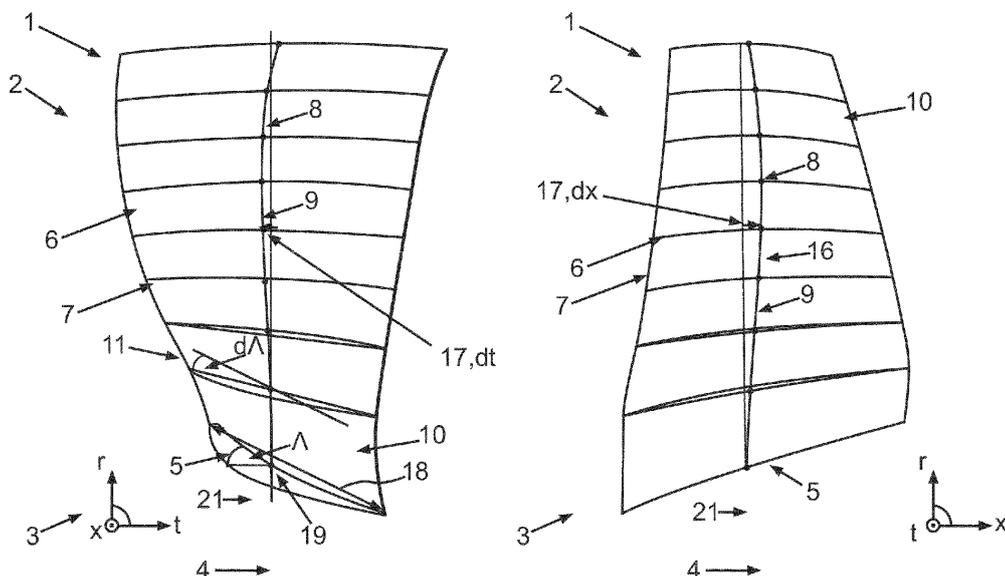
(72) Erfinder: **Hanschke, Benjamin**  
**80995 München (DE)**

(30) Priorität: **22.11.2021 DE 102021130522**

(54) **SCHAUFEL FÜR EINE STRÖMUNGSMASCHINE UND STRÖMUNGSMASCHINE, AUFWEISEND ZUMINDEST EINE SCHAUFEL**

(57) Die Erfindung betrifft eine Schaufel (1) für eine Strömungsmaschine (2), aufweisend ein Schaufelinnenprofil (5) und einen Strahlablenkungsabschnitt (6), der sich in einer Radialrichtung (r) bezüglich einer Rotorwelle (4) an das Schaufelinnenprofil (5) anschließt, wobei jeweilige, normal zur Radialrichtung (r) ausgerichtete Schaufelprofile (7) des Strahlablenkungsabschnitts (6) jeweilige Schwerpunkte (8) aufweisen, die Schwerpunkte (8) bezüglich einer linear entlang der Radialrichtung (r) verlaufenden Bezugslinie (9) um jeweilige Axialvariationswerte (dx) und/oder die um jeweilige Tangentialvariationswerte (dt) in einer Tangentialrichtung (t) verschoben sind,

wobei die jeweiligen Schwerpunkte (8) durch eine von dem Schaufelinnenprofil (5) ausgehende Fädellinie verbunden sind. Es ist vorgesehen, dass die Fädellinie (16) eine Raumlinie ist, wobei eine Gesamtabweichung (17) der Raumlinie in den Schaufelprofilen (7) zu der Bezugslinie (9) in Abhängigkeit eines jeweiligen radialen Abstands des Schaufelprofils (7) zu einem Bezugspunkt durch ein Polynom n-ter Ordnung beschrieben ist, wobei n eine natürliche Zahl größer als 1 ist, wobei die Fädellinie so gewählt und ausgelegt ist, dass sich im Betrieb im Bereich der Vorderkante der Schaufel eine Druckspannung ergibt.



**Fig.3**

## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft eine Schaufel für eine Strömungsmaschine gemäß den Merkmalen des Oberbegriffs des Anspruchs 1, insbesondere für ein Flugzeugtriebwerk sowie eine Strömungsmaschine gemäß den Merkmalen des Oberbegriffs des Anspruchs 8.

**[0002]** Schaufeln für Verdichter werden nach dem Stand der Technik hauptsächlich auf eine Maximierung des Wirkungsgrades und Einhaltung eines entsprechenden Pumpgrenzenabstands unter Berücksichtigung der strukturellen Festigkeitsanforderungen optimiert.

**[0003]** Ein Nachteil der danach optimierten Schaufeln ist deren Anfälligkeit gegenüber Schäden durch Fremdkörper, welche in die Strömungsmaschine eingesogen werden und auf den Schaufeln einschlagen. Durch diese Einschläge können insbesondere an Schaufelvorderkanten der Schaufeln Schädigungen auftreten. Ein Risiko eines Einsaugens von Fremdkörpern ist insbesondere in den Start- und Landephase eines Flugzeugs durch Vögel oder Objekte auf der Start- und Landebahn gegeben. Diese Bereiche sind im Schadensfall limitieren für den weiteren Betrieb des Triebwerks und machen außerplanmäßige Wartungen der betroffenen Komponenten notwendig.

**[0004]** Nach dem Stand der Technik ist es bei der Auslegung von Schaufeln üblich, zweidimensionale Profile zu generieren, welche für einen Strömungsverlauf optimiert sind. Diese Profile liegen in einer Mantelfläche eines auf eine Strömungsmaschine bezogenen Zylinderkoordinatensystems. Zur Generierung einer 3-dimensionalen Struktur der Schaufel ist es üblich, die einzelnen Profile normal bezüglich einer Bezugslinie ausgerichtet zu staffeln. Die Bezugslinie verläuft dabei ausgehend von einer Rotorwelle im Wesentlichen radial. Die Bezugslinie verläuft durch jeweilige charakteristische Punkte der jeweiligen Profile, wie beispielsweise den jeweiligen Schwerpunkten. Hierbei ist es verbreitet, die Schwerpunkte der einzelnen Profile durch eine Fädellinie zu verbinden, welche einen linearen Verlauf entlang der Radialrichtung aufweist.

**[0005]** Zur Optimierung bestimmter Eigenschaften ist es verbreitet, diesen Verlauf der Fädellinie derart anzupassen, dass der Verlauf der Fädellinie von dem der linearen Bezugslinie abweicht. Dabei werden die Profile verschoben, sodass die Schwerpunkte nicht auf der radial und linear verlaufenden Bezugslinie liegen. Durch die Verschiebungen der Schwerpunkte ändern sich die Spannungsverteilungen in den Schaufeln unter Betriebsbedingungen.

**[0006]** Die Optimierung von Schaufeln für Strömungsmaschinen ist exemplarisch in den folgenden Schriften offenbart.

**[0007]** In der 2015 eingereichten Masterarbeit von Pablo Rodriguez-Fernandez an der Universidad Polytechnica de Madrid mit dem Titel "Development of Shape-Optimization Tools for the Aerodynamic Design of Turboma-

chinery Blades" ist eine Entwicklung von Formoptimierungswerkzeugen für einen aerodynamischen Entwurf von Turbomaschinenschaufeln offenbart. Hierbei ist es vorgesehen, eine Schaufelgeometrie mithilfe von Parameterisierungstechniken auf der Grundlage von B-Spline-Kurven zu definieren, die eine lokale Festlegung einer Form der Schaufel ermöglichen.

**[0008]** Die Veröffentlichung Dow, E. A., & Wang, Q. (2015). "The implications of tolerance optimization on compressor blade design. Journal of Turbomachinery", 137(10), 101008. beschreibt die Auswirkungen der Toleranzoptimierung auf die Konstruktion von Verdichterschaufeln. Die Veröffentlichung befasst sich mit den Auswirkungen der geometrischen Variabilität von Schaufeln auf die Leistungsfähigkeit der Schaufeln. Die geometrische Variabilität erhöht die Leistungsvariabilität und verschlechtert die mittlere Leistung von Verdichterschaufeln für Turbomaschinen. Diese nachteiligen Auswirkungen können durch eine robuste Optimierung der Schaufelgeometrie oder durch strengere Fertigungsvorschriften verringert werden. Die Veröffentlichung beschreibt die Strömungsablösung an der Vorderkante, die bei einigen Schaufeln auftritt, wenn der Krümmungsradius der Vorderkante über einen kritischen Wert hinaus reduziert wird, wodurch die Schaufelverluste drastisch ansteigen. Die optimale Vorderkantengeometrie hängt daher vom Grad des Fertigungsrauschens ab, was die möglichen Wechselwirkungen zwischen Geometrie- und Toleranzoptimierung verdeutlicht.

**[0009]** Die 2011 an der Concordia University eingereichte Dissertation "Three dimensional aero-structural shape optimization of turbomachinery blades" von Sivashanmugam, V. K. beschreibt die Entwicklung und Implementierung eines Moduls zur strukturellen Formoptimierung und dessen Integration mit einem Modul zur aerodynamischen Formoptimierung zu einem automatisierten aero-strukturellen Optimierungsverfahren.

**[0010]** Die von Dow, E. A. 2015 am Massachusetts Institute of Technology eingereichte Dissertation zu dem Thema "Robust design and tolerancing of compressor blades" befasst sich mit der robusten Auslegung von Verdichterschaufeln.

**[0011]** Die Dissertation "Robust design methodologies: Application to compressor blades", eingereicht 2006 an der University of Southampton von Kumar, A. befasst sich mit der Anwendung robuster Entwurfsmethoden auf Verdichterschaufeln. In der Dissertation ist die Ermittlung von Verdichterschaufelgeometrien offenbart, die auch bei geometrischen Abweichungen von einer vorgegebenen Form eine robuste Leistung erbringen.

**[0012]** Die Veröffentlichung Fagan, E. M., De La Torre, O., Leen, S. B., & Goggins, J. (2018). Validation of the multi-objective structural optimisation of a composite wind turbine blade. Composite structures, 204, 567-5t; betrifft eine Validierung der multikriteriellen Strukturoptimierung eines Windturbinenblattes. In der Veröffentlichung werden strukturelle Merkmale der Schaufel wie Masse, Schwerpunkt und Ergebnisse aus statischen und

modalen Tests zur Validierung von Vorhersagen aus Finite-Elemente-Verfahren für die maßgeschneiderte Schaufel verwendet

**[0013]** In dem Kapitel Köller U., Van den Toorn B. (2010) Konstruktion, Berechnung und Fertigung von Verdichterschaukeln, erschienen in: Lechner C., Seume J. (eds) Stationäre Strömungsmaschinen. VDI-Buch. Springer, Berlin, Heidelberg. ist die Veredelung von Schaufelprofilen einer Laufschaufel offenbart.

**[0014]** Es ist eine Aufgabe der Erfindung, eine Schaufel bereitzustellen, welche eine geringere Anfälligkeit gegenüber fremdkörperverursachten Schäden aufweist als Schaufeln nach dem Stand der Technik.

**[0015]** Die Aufgabe wird erfindungsgemäß durch eine Schaufel gemäß den Merkmalen des Anspruchs 1 sowie eine Strömungsmaschine gemäß den Merkmalen des Anspruchs 8 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen mit zweckmäßigen Weiterbildungen der Erfindung sind in den jeweiligen Unteransprüchen angegeben, wobei vorteilhafte Ausgestaltungen jedes Erfindungsaspekts als vorteilhafte Ausgestaltungen der jeweils anderen Erfindungsaspekte anzusehen sind.

**[0016]** Ein erster Aspekt der Erfindung betrifft eine Schaufel für eine Strömungsmaschine. Die Schaufel weist ein Schaufelinnenprofil, welches an einem Rotorelement anliegen kann und einen Schaufelblattabschnitt auf, der sich in einer Radialrichtung bezüglich einer Rotorwelle an das Schaufelinnenprofil anschließt. Bei dem Schaufelinnenprofil kann es sich beispielsweise um ein Profil einer Nabe, eines Schaufelfußelements oder ein erstes Profil des Schaufelblattabschnitts handeln, an welches sich der Schaufelblattabschnitt der Schaufel in eine radial äußere Richtung anschließt. Die Koordinaten der Strömungsmaschine können bezüglich der Rotorwelle der Strömungsmaschine definiert sein, wobei die Axialrichtung parallel zu einer Längsrichtung der Rotorwelle verlaufen kann. Die Schaufel kann auch an einer Scheibe eines Blisks angeordnet sein. Eine Radialrichtung kann senkrecht von der Rotorwelle ausgehend verlaufen. Eine Tangentialrichtung kann in einer Umlaufrichtung um die Rotorwelle verlaufen. Der Schaufelblattabschnitt kann in der Radialrichtung von der Rotorwelle abgewandt an dem Schaufelinnenprofil angeordnet sein. Der Schaufelblattabschnitt kann einen Strahlablungsabschnitt der Schaufel umfassen. Jeweilige, normal zur Radialrichtung ausgerichtete Schaufelprofile des Schaufelblattabschnitts können jeweilige Schwerpunkte aufweisen. Mit anderen Worten weist die Schaufel in dem Schaufelblattabschnitt Schaufelprofile als Querschnitte auf, welche senkrecht zu der Radialrichtung ausgerichtet sind. Jedes der Schaufelprofile weist den jeweiligen Schwerpunkt auf. Es ist vorgesehen, dass die Schwerpunkte gegenüber einer linear entlang der Radialrichtung verlaufenden Bezugslinie um jeweilige Axialvariationswerte in einer Axialrichtung parallel zur Rotorwelle verschoben sind. Zusätzlich oder alternativ dazu sind die Schwerpunkte bezüglich der Bezugslinie um jeweilige Tangentialvariationswerte in einer Tangentialrichtung

verschoben. Mit anderen Worten ist es vorgesehen, dass die Schwerpunkte der jeweiligen Schaufelprofile bezüglich der Bezugslinie in die Axialrichtung und/oder die Tangentialrichtung um die jeweiligen Axialvariationswerte, beziehungsweise die jeweiligen Tangentialvariationswerte, verschoben sind. Die Verschiebungen der jeweiligen Schwerpunkte in die Axialrichtung sind durch die jeweiligen Axialvariationswerte beschrieben, welche in Bezug auf die linear entlang der Radialrichtung verlaufende Bezugslinie definiert sind. Die Verschiebungen der jeweiligen Schwerpunkte in die Tangentialrichtung sind durch jeweilige Tangentialvariationswerte beschrieben, welche in Bezug auf die linear entlang der Radialrichtung verlaufende Bezugslinie definiert sind. Die jeweiligen Schwerpunkte der jeweiligen Schaufelprofile sind durch eine von dem Schaufelinnenprofil ausgehende Fädellinie verbunden. Mit anderen Worten ist es vorgesehen, dass die Schwerpunkte der jeweiligen Schaufelprofile auf der Fädellinie angeordnet sind, welche ausgehend von dem Schaufelinnenprofil verläuft. Die Fädellinie kann beispielsweise ausgehend von einem Schwerpunkt des Schaufelinnenprofils verlaufen.

**[0017]** Es ist vorgesehen, dass die Fädellinie eine Raumlinie ist, wobei eine Gesamtabweichung der Raumlinie in den Schaufelprofilen zu der Bezugslinie in Abhängigkeit eines jeweiligen radialen Abstands des jeweiligen Schaufelprofils von dem Schaufelinnenprofil durch ein Polynom n-ter Ordnung mit  $n > 1$  beschrieben ist.  $n$  ist dabei eine natürliche Zahl. Mit anderen Worten beschreibt die Fädellinie einen Verlauf der Lagen der Schwerpunkte der Schaufelprofile in Abhängigkeit des radialen Abstands der Schaufelprofile von dem Schaufelinnenprofil. Die Fädellinie beschreibt die Lage der jeweiligen Schwerpunkte in Abhängigkeit von dem radialen Abstand der Schwerpunkte zu einem Ursprung, welcher ein Schwerpunkt eines Schaufelprofils, dem Schaufelinnenprofil, sein kann. Dabei ist die Fädellinie durch ein Polynom der Ordnung  $n$  definiert, welches einen Grad größer als 1 aufweist. Die Fädellinie ist erfindungsgemäß so angeordnet, dass unter Betriebsbedingungen eine Konfiguration verwirklicht wird, welche eine Druckspannung an einer Vorderkante der Schaufel bewerkstelligt. Mit anderen Worten kann durch den besagten Verlauf der Fädellinie eine negative Spannung an der Vorderkante der Schaufel im Betrieb bereitgestellt werden. Dadurch ergibt sich der Vorteil, dass eine Rissausbreitung in der Vorderkante unterbunden wird, weil Druckspannungen einer Rissausbreitung entgegenwirken. Somit weist der Bereich der Schaufel, welcher primär durch Fremdkörperanschlag (FOD) gefährdet ist eine geringere Schadensanfälligkeit auf, als dies bei Schaufeln nach dem Stand der Technik der Fall ist.

**[0018]** Die Erfindung umfasst auch Weiterbildungen, durch die sich weitere Vorteile ergeben.

**[0019]** Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung kann mindestens ein Maximum der Polynomform der Fädellinie relativ zu einer rein radial ausgerichteten Bezugslinie axial nach hinten, d.h. stromabwärts, versetzt sein.

Bevorzugt können alle Maxima der Fädellinie gegenüber der Bezugslinie radial nach hinten versetzt sein.

**[0020]** Eine Weiterbildung der Erfindung sieht vor, dass die jeweiligen Tangentialvariationswerte in einem Bereich zwischen -5 Grad und +5 liegen. Mit anderen Worten ist es vorgesehen, dass die Schwerpunkte der jeweiligen Schaufelprofile zwischen -5 Grad und 5 Grad von der Bezugslinie abweichen. Die Abweichung kann somit in einem Bereich von -5 Grad bis +5 Grad liegen. Mit anderen Worten kann die Tangentialabweichung zwischen den Schwerpunkten und der Bezugslinie -5,0°, -4,9°, -4,8°, -4,7°, -4,6°, -4,5°, -4,4°, -4,3°, -4,2°, -4,1°, -4,0°, -3,9°, -3,8°, -3,7°, -3,6°, -3,5°, -3,4°, -3,3°, -3,2°, -3,1°, -3,0°, -2,9°, -2,8°, -2,7°, -2,6°, -2,5°, -2,4°, -2,3°, -2,2°, -2,1°, -2,0°, -1,9°, -1,8°, -1,7°, -1,6°, -1,5°, -1,4°, -1,3°, -1,2°, -1,1°, -1,0°, -0,9°, -0,8°, -0,7°, -0,6°, -0,5°, -0,4°, -0,3°, -0,2°, -0,1°, 0°, 0,1°, 0,2°, 0,3°, 0,4°, 0,5°, 0,6°, 0,7°, 0,8°, 0,9°, 1,0°, 1,1°, 1,2°, 1,3°, 1,4°, 1,5°, 1,6°, 1,7°, 1,8°, 1,9°, 2,0°, 2,1°, 2,2°, 2,3°, 2,4°, 2,5°, 2,6°, 2,7°, 2,8°, 2,9°, 3,0°, 3,1°, 3,2°, 3,3°, 3,4°, 3,5°, 3,6°, 3,7°, 3,8°, 3,9°, 4,0°, 4,1°, 4,2°, 4,3°, 4,4°, 4,5°, 4,6°, 4,7°, 4,8°, 4,9°, 5,0° betragen.

**[0021]** Eine Weiterbildung der Erfindung sieht vor, dass die jeweiligen Tangentialvariationswerte in einem Bereich zwischen -2,5 Grad bis 2,5 Grad liegen. Mit anderen Worten ist es vorgesehen, dass die Schwerpunkte der jeweiligen Schaufelprofile um einen Bereich von -2,5° bis 2,5° von der Bezugslinie abweichen. Die Abweichung kann somit in einem Bereich von -2,5 Grad bis +2,5 Grad liegen. Mit anderen Worten kann die Tangentialabweichung zwischen den Schwerpunkten und der Bezugslinie -2,5°, -2,4°, -2,3°, -2,2°, -2,1°, -2,0°, -1,9°, -1,8°, -1,7°, -1,6°, -1,5°, -1,4°, -1,3°, -1,2°, -1,1°, -1,0°, -0,9°, -0,8°, -0,7°, -0,6°, -0,5°, -0,4°, -0,3°, -0,2°, -0,1°, 0°, 0,1°, 0,2°, 0,3°, 0,4°, 0,5°, 0,6°, 0,7°, 0,8°, 0,9°, 1,0°, 1,1°, 1,2°, 1,3°, 1,4°, 1,5°, 1,6°, 1,7°, 1,8°, 1,9°, 2,0°, 2,1°, 2,2°, 2,3°, 2,4°, 2,5° betragen.

**[0022]** Eine Weiterbildung der Erfindung sieht vor, dass die jeweiligen Axialvariationswerte zwischen 0 und 20 % einer jeweiligen Profilsehnenlänge des jeweiligen Schaufelprofils liegen. Mit anderen Worten beträgt eine maximale Abweichung in Axialrichtung höchstens 20 % der jeweiligen Profilsehnenlänge des jeweiligen Schaufelprofils, welche eine Vorderkante mit einer Hinterkante des jeweiligen Profils verbindet, beträgt. Die Axialvariationswerte können beispielsweise 0 %, 1 %, 2 %, 3 %, 4 %, 5 %, 6 %, 7 %, 8 %, 9 %, 10 %, 11 %, 12 %, 13 %, 14 %, 15 %, 16 %, 17 %, 18 %, 19 %, 20 % der jeweiligen Profilsehnenlänge des jeweiligen Schaufelprofils betragen.

**[0023]** Eine Weiterbildung der Erfindung sieht vor, dass die jeweiligen Axialvariationswerte zwischen 0 und 10 % einer jeweiligen Profilsehnenlänge des jeweiligen Schaufelprofils liegen. Mit anderen Worten beträgt eine maximale Abweichung in Axialrichtung höchstens 10 % der jeweiligen Profilsehnenlänge des jeweiligen Schaufelprofils, welche eine Vorderkante mit einer Hinterkante des jeweiligen Profils verbindet. Die Axialvariationswerte

können beispielsweise 0 %, 1 %, 2 %, 3 %, 4 %, 5 %, 6 %, 7 %, 8 %, 9 %, 10 % der jeweiligen Profilsehnenlänge des jeweiligen Schaufelprofils betragen.

**[0024]** Eine Weiterbildung der Erfindung sieht vor, dass die Schaufel als Laufschaufel ausgebildet ist. Mit anderen Worten handelt es sich bei der Schaufel um eine Laufschaufel, welche zur Energieübertragung zwischen der Strömungsmaschine und einem Fluid vorgesehen ist. Die Schaufel kann dementsprechend zur Anordnung auf einem Rotor vorgesehen sein, welcher sich im Betrieb um seine Längsrichtung dreht, wodurch Spannungen in der Schaufel hervorgerufen werden.

**[0025]** Eine Weiterbildung der Erfindung sieht vor, dass jeweilige Staffelungswinkel zumindest einiger der Schaufelprofile jeweiliger Laufschaufeln um jeweilige Staffelungswinkelvariationswerte von einem Nominalstaffelungswinkel eines Schaufelinnenprofils abweichen, wobei die jeweiligen Staffelungswinkelvariationswerte höchstens 2 Grad betragen. Mit anderen Worten unterscheiden sich die jeweiligen Staffelungswinkel um höchstens 2 Grad von dem Nominalstaffelungswinkel. Die Staffelungswinkelvariationswerte können zwischen -2 Grad und +2 Grad liegen. Der Staffelungswinkel ist definiert als Winkel zwischen der Profilsehne des jeweiligen Schaufelprofils und der Umlaufrichtung. Der Nominalstaffelungswinkel kann der Staffelungswinkel des Schaufelinnenprofils sein und somit den Winkel zwischen der Profilsehne des Schaufelinnenprofils und der Umlaufrichtung beschreiben. Die Staffelungswinkelvariationswerte können beispielsweise -2,0°, -1,9°, -1,8°, -1,7°, -1,6°, -1,5°, -1,4°, -1,3°, -1,2°, -1,1°, -1,0°, -0,9°, -0,8°, -0,7°, -0,6°, -0,5°, -0,4°, -0,3°, -0,2°, -0,1°, 0,0°, 0,1°, 0,2°, 0,3°, 0,4°, 0,5°, 0,6°, 0,7°, 0,8°, 0,9°, 1,0°, 1,1°, 1,2°, 1,3°, 1,4°, 1,5°, 1,6°, 1,7°, 1,8°, 1,9°, 2,0° betragen.

**[0026]** Da die Erzeugung einer Druckspannung als betragsmäßig größte Hauptspannung im Betrieb nicht immer gewährleistet werden kann, kann die Anpassung der Fädungsstrategie in einer bevorzugten Weiterbildung auch genutzt werden, um das Verhältnis der Vorderkantenspannung zur Mittelspannung in einzelnen Profilschnitten der Schaufel positiv zu beeinflussen. Als Zielwert für ein FOD/DOD resistentes Design wird hierbei ein Spannungsverhältnis

$$\theta_{ratio} = \sigma_{LLE} / \sigma_{ave} \leq 0.5$$
 über die unteren 90% der radialen Schaufelerstreckung angestrebt. Dieser Zielwert kann zusätzlich zur Anpassung der Fädungsstrategie auch durch die Relativänderung der Staffelungswinkel naheliegender Profilschnitte zueinander erreicht werden.

**[0027]** Ein zweiter Aspekt der Erfindung betrifft eine Strömungsmaschine, insbesondere ein Flugzeugtriebwerk, welche zumindest eine Schaufel des ersten Erfindungsaspekts aufweist.

**[0028]** Weitere Merkmale und deren Vorteile sind den Beschreibungen des ersten Erfindungsaspekts zu entnehmen.

**[0029]** Weitere Merkmale der Erfindung ergeben sich aus den Ansprüchen, den Figuren und der Figurenbeschreibung. Die vorstehend in der Beschreibung genannten Merkmale und Merkmalskombinationen, sowie die nachfolgend in der Figurenbeschreibung genannten und/oder in den Figuren alleine gezeigten Merkmale und Merkmalskombinationen sind nicht nur in der jeweils angegebenen Kombination, sondern auch in anderen Kombinationen verwendbar, ohne den Rahmen der Erfindung zu verlassen. Es sind somit auch Ausführungen von der Erfindung als umfasst und offenbart anzusehen, die in den Figuren nicht explizit gezeigt und erläutert sind, jedoch durch separierte Merkmalskombinationen aus den erläuterten Ausführungen hervorgehen und erzeugbar sind. Es sind auch Ausführungen und Merkmalskombinationen als offenbart anzusehen, die somit nicht alle Merkmale eines ursprünglich formulierten unabhängigen Anspruchs aufweisen. Es sind darüber hinaus Ausführungen und Merkmalskombinationen, insbesondere durch die oben dargelegten Ausführungen, als offenbart anzusehen, die über die in den Rückbezügen der Ansprüche dargelegten Merkmalskombinationen hinausgehen oder von diesen abweichen. Dabei zeigt:

**FIG. 1** eine schematische Darstellung eines Verlaufs einer Bezugslinie in einer Schaufel nach dem Stand der Technik;

**FIG. 2** zeigt eine schematische Darstellung einer Spannungsverteilung in der in **FIG. 1** gezeigten Schaufel nach dem Stand der Technik;

**FIG. 3** zeigt eine schematische Darstellung einer Schaufel; und

**FIG. 4** zeigt eine schematische Darstellung einer Spannungsverteilung in der in **FIG. 3** gezeigten Schaufel.

**[0030]** **FIG. 1** zeigt eine schematische Darstellung eines Verlaufs einer Bezugslinie in einer Schaufel nach dem Stand der Technik. Die Schaufel 1 kann insbesondere eine Laufschaufel 1 für eine Strömungsmaschine 2, insbesondere für ein Flugzeugtriebwerk sein. Das Koordinatensystem 3 kann in Bezug auf eine nicht in der Figur gezeigte Rotorwelle 4 in Zylinderkoordinaten definiert sein. Eine Axialrichtung  $x$  kann parallel zu einer Längsrichtung der Rotorwelle 4 ausgerichtet sein. Eine Radialrichtung  $r$  kann radial von einem Zentrum der Rotorwelle 4 ausgehend ausgerichtet sein. Eine Tangentialrichtung  $t$  kann in eine Umlaufrichtung um die Rotorwelle 4 ausgerichtet sein. An der Rotorwelle 4 kann die Schaufel 1 befestigt sein. Die Schaufel 1 kann zur radialen Anordnung an der Rotorwelle 4 vorgesehen sein. An ein Schaufelinnenprofil 5 kann sich in radialer Richtung ein Strahlableitungsabschnitt 6 anschließen, welcher sich bis zu einer Spitze der Schaufel 1 an einem radialen äußeren Ende der Schaufel 1 erstrecken kann.

Die Schaufel 1 kann in dem Strahlableitungsabschnitt 6 Schaufelprofile 7 aufweisen, welche in jeweiligen Tangentialebenen bezüglich der Rotorwelle 4 in vorbestimmten radialen Abständen zur dem Schaufelinnenprofil 5 angeordnet sein können. Die Schaufelprofile 7 können jeweilige Massenschwerpunkte 8 aufweisen, welche entlang einer linearen und radial verlaufenden Bezugslinie 9 angeordnet sein können. Die Schaufelprofile 7 können sich in ihrer Form voneinander unterscheiden. Die Schaufel 1 kann eine Vorderkante 11 und eine Hinterkante 10 aufweisen. Die Vorderkante 11 kann in Bezug auf eine Strömungsrichtung derart definiert sein, dass in einem Betrieb der Strömungsmaschine 2 das Gas auf die Vorderkante 11 auftreffen kann. Aufgrund der Auslegung der Schaufel 1 nach dem Stand der Technik auf Betriebseffizienz kann eine Spannungsverteilung während des Betriebes an der Vorderkante 11 positiv sein, wodurch insbesondere an der Vorderkante 11 im Fall eines Einschlags eines Fremdkörpers Schädigungen und eine Rissausbreitung auftreten können.

**[0031]** Eine Umfangs- und Axialposition des Schaufel-schwerpunkts 8 im Nabenschnitt ist durch die Bezugslinie 9 festgelegt, wobei eine rein radiale Fädelung aller weiteren Schaufelprofile 7 vorgesehen ist. Die Schwerpunkte 8 sind auf der Bezugslinie 9 angeordnet. In **FIG. 1** wird eine Bezugskonfiguration für die Anpassung definiert.

**[0032]** **FIG. 2** zeigt eine schematische Darstellung einer Spannungsverteilung in der in **FIG. 1** gezeigten Schaufel 1 nach dem Stand der Technik. Gezeigt ist eine Verteilung eines Betrags einer größten Hauptspannung 12 während eines Betriebs der Schaufel 1 in der Strömungsmaschine 2 an einem vorbestimmten Betriebspunkt. Zu erkennen ist ein höchster Betrag der Hauptspannung 12 in einem inneren Bereich 13 der Schaufel 1, wobei es sich um eine Zugspannung handeln kann. Bis auf einen Hinterkantenbereich 20 der Hinterkante 10 dominiert eine Zugspannung in der Schaufel 1. Der Hinterkantenbereich 20 der Hinterkante 10 weist eine Druckspannung auf, welche negativ ist. Die negative Spannung führt dazu, dass die Schaufel 1 in dem Hinterkantenbereich 20 weniger anfällig gegen Rissausbreitungen ist. Eine Rissausbreitung kann beispielsweise aufgrund von aufschlagenden Fremdkörpern entstehen. Es wäre somit vorteilhaft, wenn die durch Fremdkörper gefährdete Vorderkante 11 der Schaufel 1 über eine gesamte Länge des Strahlableitungsabschnitts 6 oder zumindest eine Teillänge 15 von 90% der Länge des Strahlableitungsabschnitts 6, ausgehend von dem Schaufelinnenprofil 5 eine Druckspannung aufweisen würde.

**[0033]** **FIG. 3** zeigt eine schematische Darstellung einer Schaufel 1. Gezeigt eine Schaufel 1, welche gegenüber der in der **FIG. 1** gezeigten Schaufel 1 nach dem Stand der Technik, durch Variationen der Lagen der Schwerpunkte 8 verändert wurde, um an einer Vorderkante 11 der Schaufel 1 eine negative Hauptspannung 12 bereitzustellen. Um die Druckspannung als Hauptspannung 12 an der Vorderkante 11 bereitzustellen,

kann eine Variation der Lage der Schaufelprofile 7 erfolgen, wobei die Schwerpunkte 8 der Schaufelprofile 7 gegenüber der linearen, radial verlaufenden Bezugslinie 9 versetzt sein können. Die Verschiebungen können entlang der Tangentialrichtung  $t$  und/oder der Axialrichtung  $x$  erfolgen. Durch die Verschiebungen können die Schwerpunkte 8 um jeweilige Axialvariationswerte  $dx$  in einer Axialrichtung  $x$  und/oder um jeweilige Tangentialvariationswerte  $dt$  in einer Tangentialrichtung  $t$  gegenüber der Bezugslinie 9 verschoben sein. Die einzelnen Schwerpunkte 8 können durch eine Fädellinie 16 verbunden sein, welche sich somit von der Bezugslinie 9 unterscheiden kann. Ein Verlauf der Fädellinie 16 kann durch ein Polynom  $n$ -ter Ordnung, wobei  $n$  eine natürliche Zahl größer als 1 sein kann, beschrieben sein. Die Fädellinie 16 kann eine Gesamtabweichung 17 der Schwerpunkte 8 an einem jeweiligen radialen Abstand in Abhängigkeit des radialen Abstandes des Schwerpunktes 8 zu dem Schaufelinnenprofil 5 beschreiben. Es kann vorgesehen sein, dass die jeweiligen Tangentialvariationswerte  $dt$  in einem Bereich zwischen  $-5$  Grad und  $5$  Grad, insbesondere einem Bereich zwischen  $-2,5$  Grad und  $2,5$  Grad liegen können. Mit anderen Worten können jeweilige Schwerpunkte 8 in der Tangentialrichtung zwischen  $-5$  Grad und  $+5$  Grad, insbesondere zwischen  $-2,5$  Grad und  $+2,5$  Grad in Bezug auf die Bezugslinie 9 verschoben sein.

**[0034]** Für die Axialvariationswerte  $dx$  kann vorgesehen sein, dass die Beträge der jeweiligen Axialvariationswerte  $dx$  höchstens  $20\%$ , insbesondere höchstens  $10\%$  einer jeweiligen Länge einer Profilsehne 18 des jeweiligen Schaufelprofils betragen. Die Profilsehne 18 eines jeweiligen Schaufelprofils 7 kann eine Profilnase des Schaufelprofils 7 mit einer Profilhinterkante des Schaufelprofils 7 verbinden. Mit anderen Worten beträgt die Axialvariation  $dx$  nicht mehr als  $20\%$  der Länge der jeweiligen Profilsehne 18 des jeweiligen Schaufelprofils 7. Die Bezugslinie 9 und die Fädellinie 16 können zumindest durch einen ersten der Schwerpunkte 8 verlaufen, wobei es sich um den Schwerpunkt 8 des Schaufelinnenprofils 5 handeln kann. Der Schwerpunkt 8 des Schaufelinnenprofils 5 kann somit ein gemeinsamer Ursprung 19 der Bezugslinie 9 und die Fädellinie 16 sein. Die jeweiligen Schaufelprofile 7 können Staffelungswinkel aufweisen, welche einen Winkel zwischen der Profilsehne 18 des jeweiligen Schaufelprofils 7 und der Umlaufrichtung  $t$  beschreiben. Die Staffelungswinkel können sich um Staffelungswinkelvariationswerte  $dA$  von einem Nominalstaffelungswinkel  $A$  unterscheiden, welcher einen Winkel zwischen der Profilsehne 18 des Schaufelinnenprofils 5 und der Umlaufrichtung  $t$  beschreiben kann. Mit anderen Worten können sich die Staffelungswinkel zumindest einiger der Schaufelprofile 7 um jeweilige Staffelungswinkelvariationswerte  $dA$  von dem Nominalstaffelungswinkel  $A$  unterscheiden. Bei einem Staffelungswinkelvariationswert  $dA$  von  $0$  Grad ist die Profilsehne 18 des jeweiligen Schaufelprofils 7 zu der Profilsehne 18 des Schaufelinnenprofils 5 parallel ausgerich-

tet.

**[0035]** Die Staffelungswinkel zumindest einiger der Schaufelprofile 7 können um die jeweiligen Staffelungswinkelvariationswerte  $dA$  von dem Nominalstaffelungswinkel  $A$  abweichen, wobei die jeweiligen Staffelungswinkelvariationswerte  $dA$  höchstens  $2$  Grad betragen. Mit anderen Worten unterscheiden sich die jeweiligen Staffelungswinkel um höchstens  $2$  Grad von dem Nominalstaffelungswinkel. Die Staffelungswinkelvariationswerte können zwischen  $-2$  Grad und  $+2$  Grad liegen.

**[0036]** Die Fädellungsstrategie der Schwerpunkte 8 von den Profilsektionen / Schaufelprofilen 7 wird in Axialrichtung  $x$  und Umlaufrichtung  $t$  somit derart angepasst, dass die betragsmäßig größte Hauptspannung 12 im kritischen Profilbereich 13, der Schaufelvorderkante 11, eine Druckspannung ist. Zusätzlich kann der Staffelungswinkel zumindest einiger der Schaufelprofile 7 um die jeweiligen Staffelungswinkelvariationswerte  $dA$  variiert werden.

**[0037]** Die Anpassung der Fädellung, vorgegeben durch die Fädellinie 16 relativ zur Bezugskonfiguration umfasst eine Optimierung des Fädellungsverlaufs (Polynom  $n$ -ter Ordnung) mit dem Ziel der Spannungsbeeinflussung an Vorderkante. Ein Parameterraum der Schwerpunktsverschiebung der Schaufelprofile 7 kann durch eine maximale Umfangsvariation  $dt$  von  $\pm 5$  Grad und/oder eine maximale Axialvariation  $dx$  von  $\pm 20\%$  Profilsehnenlänge des jeweiligen Schaufelprofils 7 vorgegeben sein.

**[0038]** FIG. 4 zeigt eine schematische Darstellung einer Spannungsverteilung in der in FIG. 3 gezeigten Schaufel. Zu erkennen ist, dass der Vorderkantenbereich 14 der Vorderkante eine negative Spannung aufweist. In diesem Bereich ist eine Druckspannung die lokale Hauptspannung. Dadurch ergibt sich der Vorteil, dass die Vorderkante gegenüber Einschlägen von Fremdkörpern resistenter ist, als die in FIG. 1 gezeigte Schaufel.

**[0039]** Aktuell wird die Verdichterbeschaufelung hauptsächlich mit dem Fokus auf die Maximierung des Wirkungsgrades und des Pumpgrenzabstand unter Einhaltung der strukturellen Festigkeitsanforderungen (Auslastung  $< 60\%$  Goodman Ratio) interdisziplinär ausgelegt.

**[0040]** Geometrien die aus diesem Vorgehen (Stand der Technik) resultieren, weisen häufig gegenüber Foreign Object Damage (FOD) bzw. Domestic Object Damage (DOD) empfindliche Bereiche auf. Im Betrieb der Komponenten treten häufiger Schädigungen insbesondere an den Schaufelvorderkanten auf. Diese Bereiche sind im Schadensfall limitierend für den weiteren Betrieb des Triebwerks und machen außerplanmäßige Wartungen der betroffenen Komponenten notwendig.

**[0041]** Während des interdisziplinären Auslegungsprozesses der Verdichterschaufeln, kann gezielt die Spannungsverteilung in kritischen Bauteilbereichen beeinflusst werden. Um die häufig von Schädigungen betroffene Region der Schaufelvorderkante robuster zu ge-

stalten, wird eine Anpassung der bisher verwendeten Fädungsstrategie der einzelnen Schaufelprofilschnitte vorgeschlagen. Ziel dieser angepassten Fädungsstrategie (axial und in Umlaufrichtung angepasste Schwerpunktsposition der einzelnen Schaufelprofile) ist es, die Schaufelvorderkante im Betriebsbereich derart zu belasten, dass die betragsmäßig größte Hauptspannung im kritischen Profildbereich eine Druckspannung ist. Ein derart ausgeprägtes Spannungsfeld ist kontraproduktiv für eine schnelle Rissausbreitung in das Bauteil und stellt somit ein Mittel zur Erhöhung der Schaufelrobustheit gegen Schädigungen dar.

**[0042]** Da die Erzeugung einer Druckspannung als betragsmäßig größte Hauptspannung im Betrieb nicht immer gewährleistet werden kann, soll die Anpassung der Fädellinie auch genutzt werden, um das Verhältnis der Vorderkantenspannung zur Mittelspannung in einzelnen Schaufelprofilen der Schaufel positiv zu beeinflussen. Als Zielwert für ein FOD/DOD resistentes Design wird hierbei ein Spannungsverhältnis

$$\theta_{ratio} = \frac{\sigma_{LLE}}{\sigma_{ave}} \leq 0.5$$
 über die unteren 90% der radialen Schaufelerstreckung angestrebt. Dieser Zielwert kann zusätzlich zur Anpassung der Fädungsstrategie auch durch die Relativänderung der Staffelungswinkel naheliegender Schaufelprofile zueinander erreicht werden.

Bezugszeichenliste:

**[0043]**

1	Schaufel
2	Strömungsmaschine
3	Koordinatensystem
4	Rotorwelle
5	Schaufelinnenprofil
6	Strahlableitungsabschnitt
7	Schaufelprofil
8	Schwerpunkt
9	Bezugslinie
10	Hinterkante
11	Vorderkante
12	Hauptspannung
13	Bereich
14	Vorderkantenbereich
15	Teillänge
16	Fädellinie
17	Gesamtabweichung
18	Profilsehne
19	Ursprung
20	Hinterkantenbereich
21	Schaufelfußelement
t	Tangentialrichtung
dt	Tangentialvariationswert
r	Radialrichtung

x	Axialrichtung
dx	Axialvariationswert
A	Nominalschaufelungswinkel
dA	Schaufelungswinkelvariation

5

**Patentansprüche**

10

1. Schaufel (1) für eine Strömungsmaschine (2), insbesondere für ein Flugzeugtriebwerk, aufweisend ein Schaufelinnenprofil (5) und einen Strahlableitungsabschnitt (6), der sich in einer Radialrichtung (r) bezüglich einer Rotorwelle (4) an das Schaufelinnenprofil (5) anschließt,

15

wobei jeweilige, normal zur Radialrichtung (r) ausgerichtete Schaufelprofile (7) des Strahlableitungsabschnitts (6) jeweilige Schwerpunkte (8) aufweisen,

20

die Schwerpunkte (8) bezüglich einer linear entlang der Radialrichtung (r) verlaufenden Bezugslinie (9) um jeweilige Axialvariationswerte (dx) in einer Axialrichtung (x) parallel zur Rotorwelle (4) verschoben sind,

25

und /oder

die Schwerpunkte (8) bezüglich der Bezugslinie (9) um jeweilige Tangentialvariationswerte (dt) in einer Tangentialrichtung (t) verschoben sind, wobei die jeweiligen Schwerpunkte (8) durch eine von dem Schaufelinnenprofil (5) ausgehende Fädellinie verbunden sind,

30

**dadurch gekennzeichnet, dass**

die Fädellinie eine Raumlinie ist, wobei eine Gesamtabweichung (17) der Raumlinie in den Schaufelprofilen (7) zu der Bezugslinie (9) in Abhängigkeit eines jeweiligen radialen Abstands des jeweiligen Schaufelprofils (7) zu einem Bezugspunkt durch ein Polynom n-ter Ordnung beschrieben ist, wobei n eine natürliche Zahl größer als 1 ist und dass die Fädellinie so gewählt und ausgelegt ist, dass sich im Betrieb im Bereich der Vorderkante der Schaufel eine Druckspannung ergibt.

35

45

2. Schaufel (1) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Fädellinie derart ausgebildet ist, dass ein Maximum der Polynomform der Fädellinie gegenüber einer rein radial verlaufenden Fädellinie axial nach hinten verschoben ist.

50

55

3. Schaufel (1) nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die jeweiligen Tangentialvariationswerte (dt) in einem Bereich zwischen -5 Grad und +5, vorzugsweise zwischen -2,5 Grad bis 2,5 Grad liegen.

55

4. Schaufel (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass**

ein jeweiliger der Axialvariationenwerte (dx) in einem Bereich zwischen 0 und 20 Prozent einer jeweiligen Profilsehnenlänge (18) des jeweiligen Schaufelprofils (7) liegt.

5

5. Schaufel (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein jeweiliger der Axialvariationenwerte (dx) in einem Bereich zwischen 0 und 10 Prozent einer jeweiligen Profilsehnenlänge (18) des jeweiligen Schaufelprofils (7) liegt. 10
6. Schaufel (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Schaufel (1) als Laufschaufel ausgebildet ist. 15
7. Schaufel (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** jeweilige Staffelungswinkel zumindest einiger der Schaufelprofile (7) um jeweilige Staffelungswinkelvariationenwerte (dA) von einem Nominalstaffelungswinkel (A) des Schaufelinnenprofils (5) abweichen, wobei die jeweiligen Staffelungswinkelvariationenwerte (dA) in einem Bereich zwischen -2 Grad und 2 Grad liegen. 20  
25
8. Schaufel nach einem der vorgenannten Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Verlauf der Fädellinie derart gewählt ist, dass ein Verhältnis  $\sigma_{1,LE} / \sigma_{ave}$  der Spannung im Betriebszustand an der Vorderkante ( $\sigma_{1,LE}$ ) zur mittleren Spannung in einzelnen Profilschnitten ( $\sigma_{ave}$ ) über die unteren 90% der radialen Schaufelerstreckung kleiner oder gleich 0.5 beträgt 30  
35
9. Strömungsmaschine (2), aufweisend zumindest eine Schaufel (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 8. 40

45

50

55

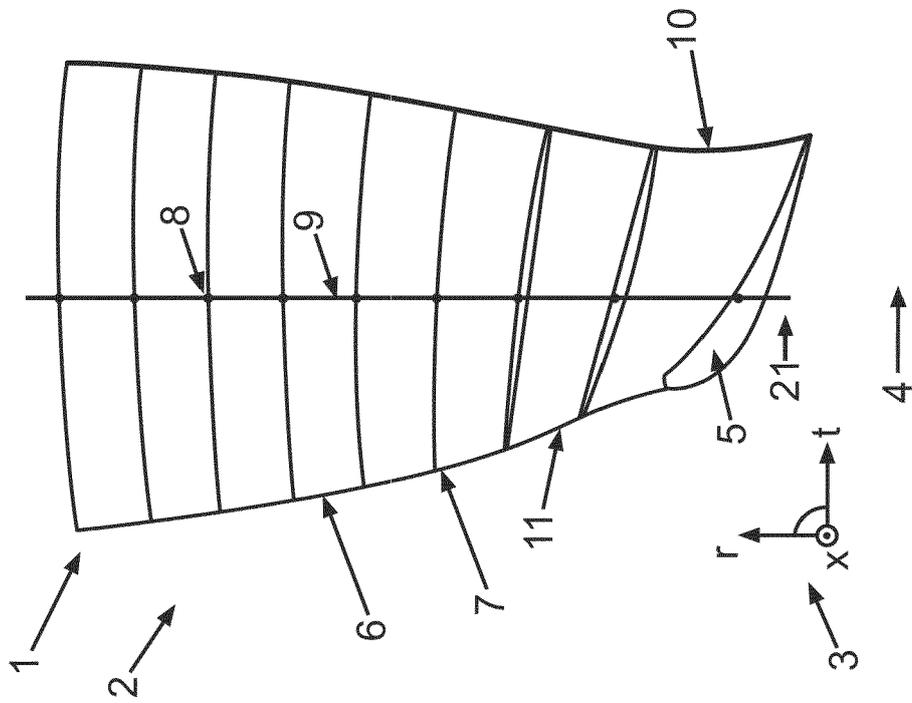
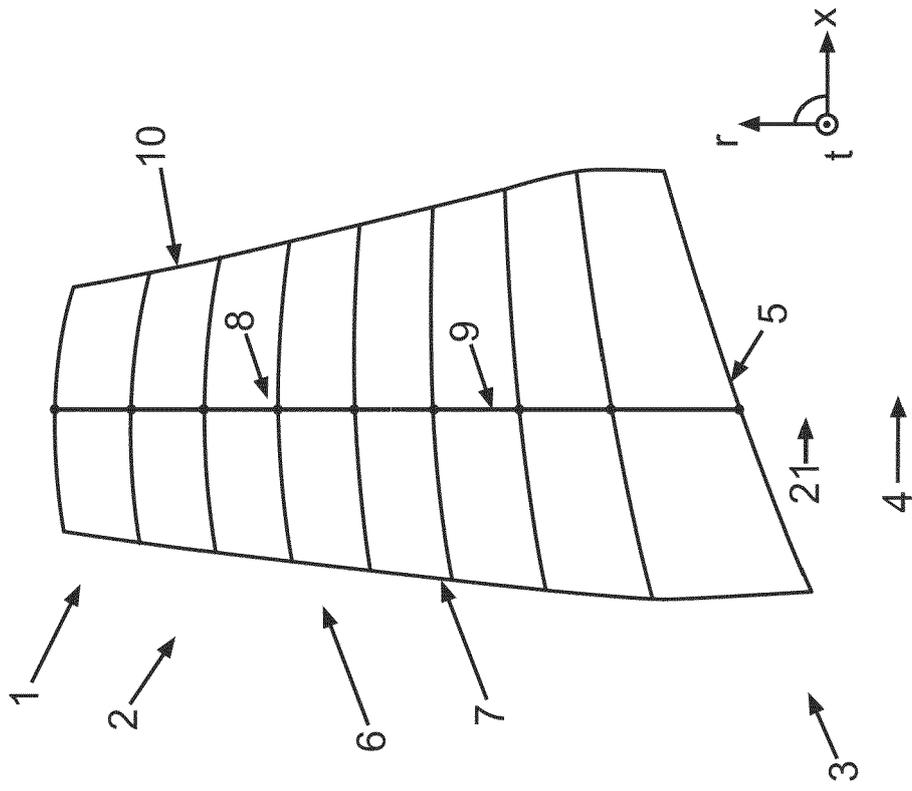


Fig.1

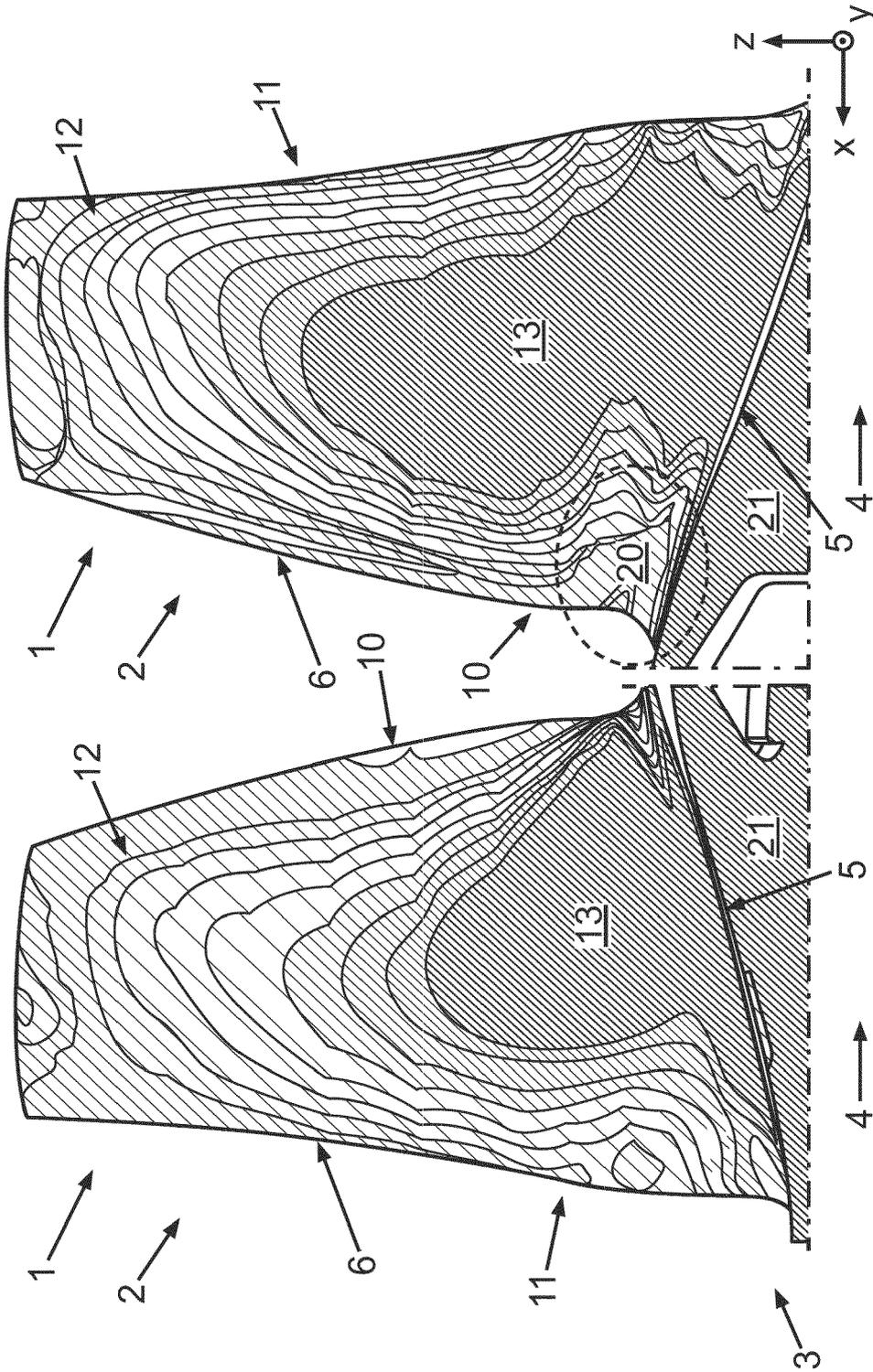


Fig.2

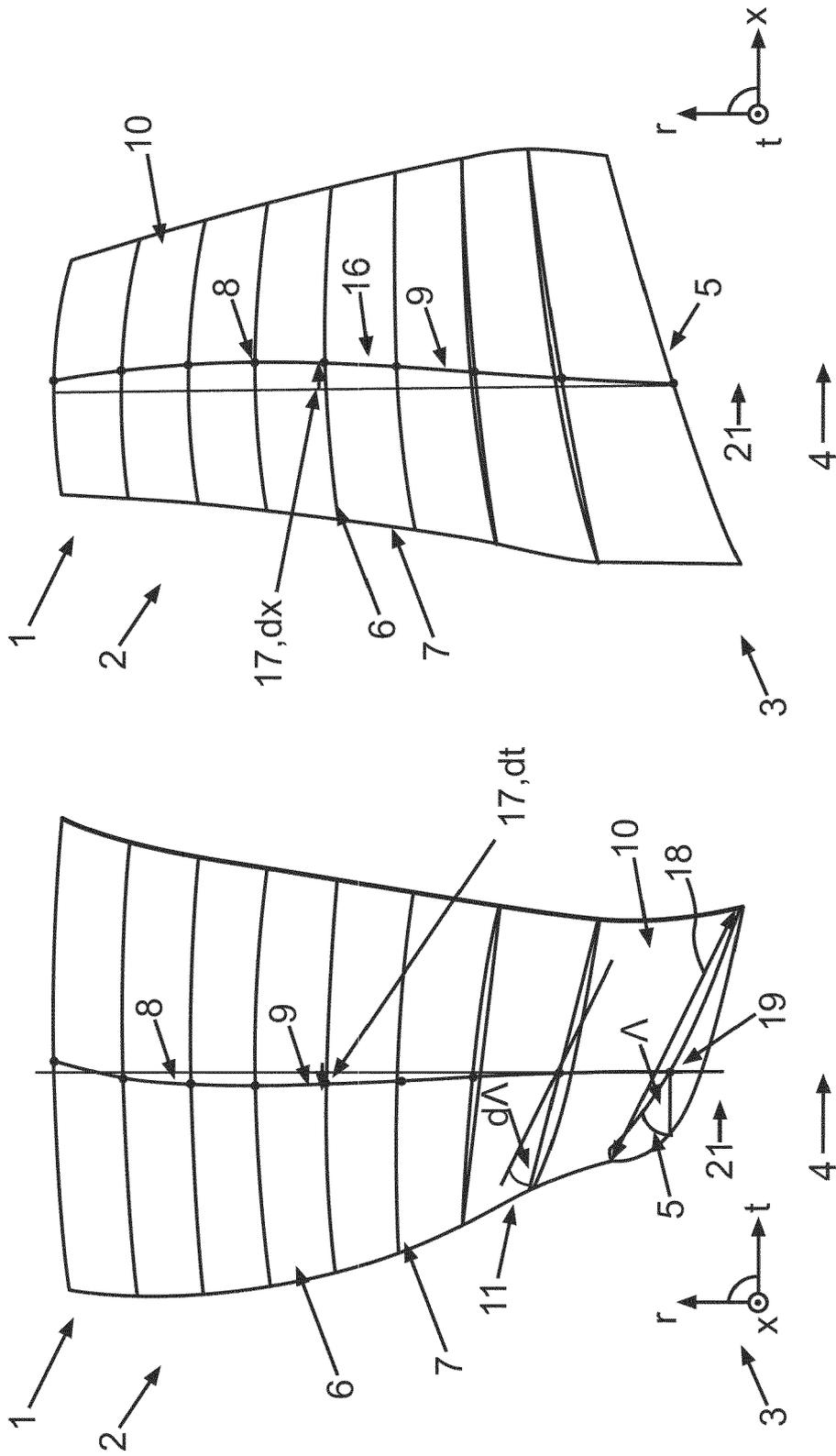


Fig.3

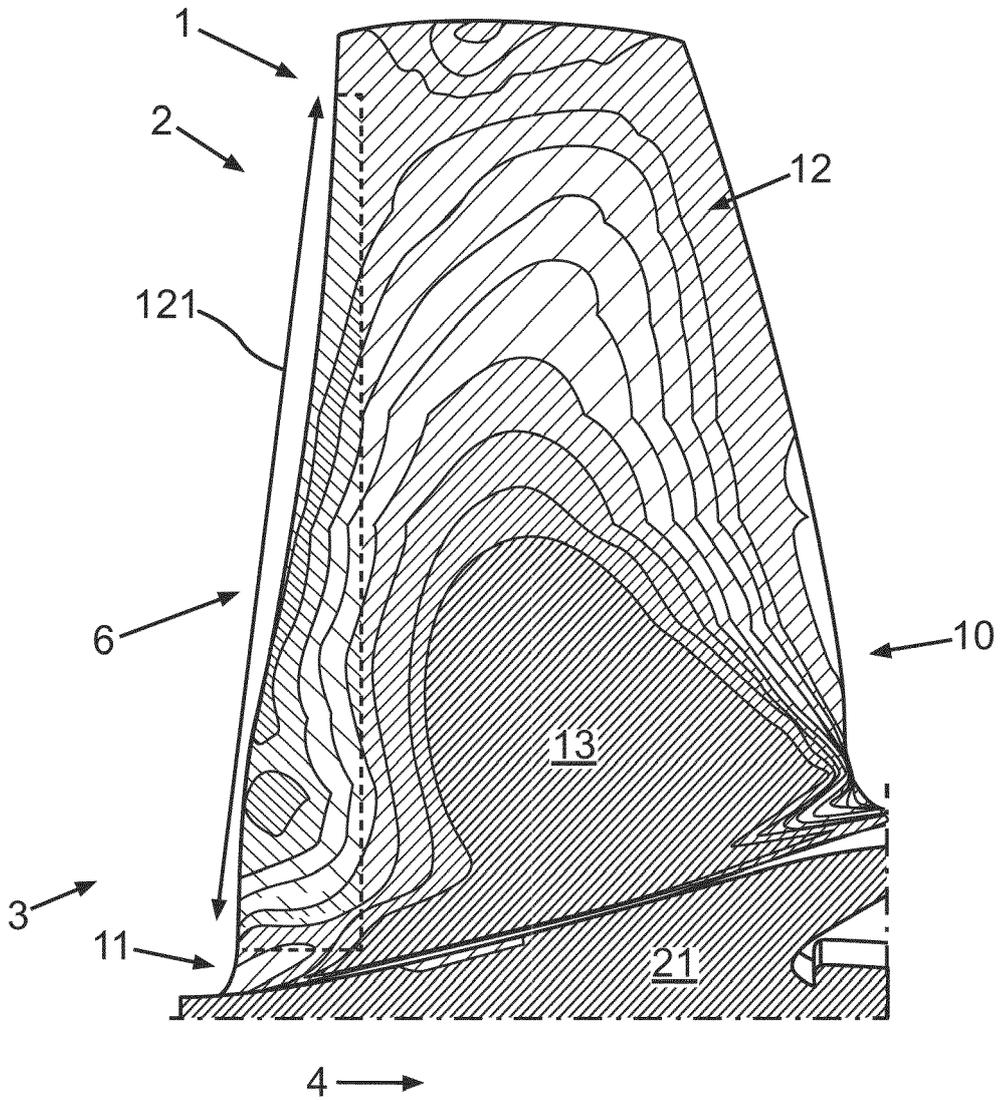


Fig.4



EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung

EP 22 20 3399

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	EP 1 106 835 A2 (GEN ELECTRIC [US]) 13. Juni 2001 (2001-06-13)	1, 3, 6, 8, 9	INV. F01D5/14
Y	* Spalte 1, Absatz 9 - Spalte 4, Absatz 27; Abbildungen 2, 3 *	7	
X	WO 2015/175051 A2 (UNITED TECHNOLOGIES CORP [US]) 19. November 2015 (2015-11-19) * Seite 8, Absatz 44 - Seite 9, Absatz 50; Abbildungen 4, 5 *	1, 2, 6, 9	RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC) F01D
Y	DE 10 2014 226689 A1 (ROLLS ROYCE DEUTSCHLAND LTD & CO KG [DE]) 23. Juni 2016 (2016-06-23) * Seite 2, Absatz 2 - Seite 6, Absatz 65 *	7	
X	WO 2013/114030 A1 (SNECMA [FR]) 8. August 2013 (2013-08-08) * Seite 7, Zeile 5 - Seite 7, Zeile 25; Abbildung 4 *	1, 4-6, 9	
X	US 4 585 395 A (NOURSE JOHN G [US] ET AL) 29. April 1986 (1986-04-29) * Spalte 4, Zeile 24 - Spalte 5, Zeile 66; Abbildungen 1-5 *	1-3, 6, 9	
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort <b>München</b>		Abschlußdatum der Recherche <b>20. März 2023</b>	Prüfer <b>Rau, Guido</b>
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			

EPO FORM 1503 03.82 (F04C03)

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

EP 22 20 3399

5 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.

20-03-2023

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung	
<b>EP 1106835</b>	<b>A2</b>	<b>13-06-2001</b>	<b>AT 402344 T</b>	<b>15-08-2008</b>
			<b>BR 0004690 A</b>	<b>25-09-2001</b>
			<b>CA 2321330 A1</b>	<b>06-06-2001</b>
			<b>EP 1106835 A2</b>	<b>13-06-2001</b>
			<b>ES 2310509 T3</b>	<b>16-01-2009</b>
			<b>IL 138651 A</b>	<b>23-11-2003</b>
			<b>JP 4942244 B2</b>	<b>30-05-2012</b>
			<b>JP 2001221195 A</b>	<b>17-08-2001</b>
			<b>PL 342077 A1</b>	<b>18-06-2001</b>
			<b>RU 2220329 C2</b>	<b>27-12-2003</b>
		<b>US 6299412 B1</b>	<b>09-10-2001</b>	
<b>WO 2015175051</b>	<b>A2</b>	<b>19-11-2015</b>	<b>EP 3108115 A2</b>	<b>28-12-2016</b>
			<b>US 2017159670 A1</b>	<b>08-06-2017</b>
			<b>US 2020291955 A1</b>	<b>17-09-2020</b>
			<b>US 2022235792 A1</b>	<b>28-07-2022</b>
			<b>WO 2015175051 A2</b>	<b>19-11-2015</b>
<b>DE 102014226689</b>	<b>A1</b>	<b>23-06-2016</b>	<b>KEINE</b>	
<b>WO 2013114030</b>	<b>A1</b>	<b>08-08-2013</b>	<b>BR 112014018848 A2</b>	<b>20-06-2017</b>
			<b>CA 2862280 A1</b>	<b>08-08-2013</b>
			<b>CN 104081005 A</b>	<b>01-10-2014</b>
			<b>EP 2809883 A1</b>	<b>10-12-2014</b>
			<b>FR 2986285 A1</b>	<b>02-08-2013</b>
			<b>JP 6038180 B2</b>	<b>07-12-2016</b>
			<b>JP 2015509162 A</b>	<b>26-03-2015</b>
			<b>RU 2014135419 A</b>	<b>27-03-2016</b>
			<b>US 2015017012 A1</b>	<b>15-01-2015</b>
<b>WO 2013114030 A1</b>	<b>08-08-2013</b>			
<b>US 4585395</b>	<b>A</b>	<b>29-04-1986</b>	<b>CA 1216524 A</b>	<b>13-01-1987</b>
			<b>JP H0370083 B2</b>	<b>06-11-1991</b>
			<b>JP S60178902 A</b>	<b>12-09-1985</b>
			<b>US 4585395 A</b>	<b>29-04-1986</b>

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 Nicht-Patentliteratur

- **DOW, E. A. ; WANG, Q.** The implications of tolerance optimization on compressor blade design. *Journal of Turbomachinery*, vol. 137 (10), 101008 [0008]
- **SIVASHANMUGAM, V. K.** Three dimensional aero-structural shape optimization of turbomachinery blades. Concordia University, 2011 [0009]
- **DOW, E. A.** Robust design and tolerancing of compressor blades. Massachusetts Institute of Technology, 2015 [0010]
- **KUMAR, A.** Robust design methodologies: Application to compressor blades. University of Southampton, 2006 [0011]
- **FAGAN, E. M. ; DE LA TORRE, O. ; LEEN, S. B. ; GOGGINS, J.** Validation of the multi-objective structural optimisation of a composite wind turbine blade. *Composite structures*, 2018, vol. 204, 567-5t [0012]
- Konstruktion, Berechnung und Fertigung von Verdichterschaufeln. **KÖLLER U. ; VAN DEN TOORN B.** Stationäre Strömungsmaschinen. VDI-Buch. Springer, 2010 [0013]