

(19)



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11)

EP 1 373 686 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des
Hinweises auf die Patenterteilung:
12.07.2006 Patentblatt 2006/28

(21) Anmeldenummer: **02729850.4**

(22) Anmeldetag: **04.04.2002**

(51) Int Cl.:
F01D 11/22^(2006.01) F01D 11/16^(2006.01)

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/DE2002/001223

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2002/081869 (17.10.2002 Gazette 2002/42)

(54) **ROTORSPALT-STEUERMODUL**

ROTOR GAP CONTROL MODULE

MODULE DE COMMANDE DE JEU DE ROTOR

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE ES FR GB IT

(30) Priorität: **06.04.2001 DE 10117231**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
02.01.2004 Patentblatt 2004/01

(73) Patentinhaber: **MTU Aero Engines GmbH**
80995 München (DE)

(72) Erfinder:
• **SCHULTE, Volker**
82216 Maisach (DE)
• **FRITSCH, Gerd**
81827 München (DE)
• **HODSON, Howard**
Manchester PG29 20A (GB)

• **HOWELL, Robert**
Cambridge CB3 9EU (GB)

(56) Entgegenhaltungen:
DE-A- 2 922 835 DE-A- 3 830 762
US-A- 4 247 247

• **PATENT ABSTRACTS OF JAPAN** vol. 007, no. 098
(M-210), 26. April 1983 (1983-04-26) & JP 58
020904 A (HITACHI SEISAKUSHO KK), 7. Februar
1983 (1983-02-07)
• **PATENT ABSTRACTS OF JAPAN** vol. 010, no. 326
(M-532), 6. November 1986 (1986-11-06) & JP 61
132707 A (TOSHIBA CORP), 20. Juni 1986
(1986-06-20)
• **PATENT ABSTRACTS OF JAPAN** vol. 010, no. 353
(M-539), 28. November 1986 (1986-11-28) & JP 61
152907 A (TOSHIBA CORP), 11. Juli 1986
(1986-07-11)

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

EP 1 373 686 B1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Rotor spalt Steuermodul zum Einbau in eine von einem Fluid In einer Hauptströmungsrichtung durchströmte Strömungsmaschine, welche einen drehbaren Rotor mit in Drehrichtung des Rotors zueinander vorbestimmt beabstandete Rotorblätter und ein den Rotor unter Ausbildung eines Rotorspaltes zumindest abschnittsweise umgebendes Gehäuse aufweist, wobei das Rotorspalt-Steuermodul wenigstens ein den Rotorspalt abschnittsweise begrenzendes und in den Rotorspalt hineinbewegliches Dichtelement und eine im Betrieb das Dichtelement bewegendende Aktuator-einheit umfasst.

[0002] Bei Strömungsmaschinen, hlerunterfallen beispielsweise Turbinen, Pumpen, Verdichter oder Gebläse, stellt der Rotorspalt zwischen stationärem Rotorgehäuse und rotierendem Rotor eine Quelle von Strömungsverlusten und damit eine Ursache für einen verringerten Wirkungsgrad dar. Die Strömungsverluste entstehen zum einen durch Wirbelbildung und Strömungsablösung im oder am Rotorspalt, was auch zu einem erhöhten Strömungslärm führt, zum anderen durch eine Ausgleichsströmung, die entgegen der Hauptströmungsrichtung durch den Rotor gerichtet ist und die erreichbare Druckdifferenz zwischen der Hochdruckseite und der Niederdruckseite der Strömungsmaschine beschränkt.

[0003] Bei einer idealen verlustfreien Strömungsmaschine wäre ein Rotorspalt nicht vorhanden. In der Praxis ist dies jedoch nicht möglich, da in diesem Fall die Spitzen der Rotorblätter das Gehäuse berühren und bei der Drehung des Rotors am Gehäuse schleifen und damit verschleifen würden. Besonders ausgeprägt ist dieses Problem bei Strömungsmaschinen, bei denen die Rotoren mit hoher Drehzahl umlaufen und/oder mit hohen Temperaturen beaufschlagt sind, wie beispielsweise bei Flugzeugtriebwerken und Gasturbinen sowie bei Abgasturboladern. Bei derartigen Strömungsmaschinen hängt sich das Rotorblatt abhängig von der Temperatur und von der Drehzahl. Zusätzlich weitet sich das Gehäuse in Abhängigkeit von der Betriebstemperatur. Durch den Rotorspalt werden die Ausdehnung des Gehäuses und die Längung der Rotorblätter kompensiert, ohne dass es zu einer Beschädigung der Strömungsmaschine kommen kann.

[0004] Die Weite des Rotorspaltes und damit die Verluste der Strömungsmaschine ändern sich folglich in Abhängigkeit von der Drehzahl und der Temperatur im gerade durchlaufenen Betriebszustand.

[0005] In der Praxis wird der Rotorspalt in der Regel so eingestellt, dass in einem Dauerbetriebspunkt, bei dem die Strömungsmaschine in der Regel betrieben wird, ein möglichst kleiner Rotorspalt vorliegt. Bei Flugzeugtriebwerken oder bei Abgasturboladern liegt dieser Dauerbetriebspunkt beispielsweise bei der Reisegeschwindigkeit. Gleichzeitig werden bei der Bemessung des Rotorspaltes in der Praxis Grenzbereiche und An-

laufbereiche der Strömungsmaschine berücksichtigt: Der Rotorspalt soll so bemessen sein, dass auch unter Extrembedingungen bei hinnehmbaren Strömungsverlusten Beschädigungen von Rotorblatt und Gehäuse vermieden werden.

[0006] In der Praxis wird also zugunsten eines möglichst guten Wirkungsgrades ein gewisser Verschleiß von Gehäuse und Rotorblatt durch das Anlaufen der Strömungsmaschine oder den Betrieb der Strömungsmaschine im Grenzbereich in Kauf genommen.

[0007] Um in allen Betriebsbereichen der Strömungsmaschine einen optimalen Rotorspalt, also eine Rotorspaltweite, bei der Verschleiß und Strömungsverluste minimal sind, zu erzielen, sind im Stand der Technik einige Lösungen vorgeschlagen.

[0008] So ist in der US 5,092,737 eine Vorrichtung beschrieben, durch die der Verschleiß in der Anlaufphase einer Gasturbine, in der sich Gehäuse und Rotor unterschiedlich stark aufwärmen, durch eine Veränderung der Rotorspaltweite verringert wird. Die dort beschriebene Vorrichtung ändert den Rotorspalt passiv über die Wärmedehnung von Steuerelementen in der dem Rotor gegenüberliegenden Gehäusewandung der Gasturbine. Dabei sind die Wärmedehnungskoeffizienten der Steuerelemente so an die Betriebszustände der Gasturbine angepasst, dass die Ausdehnung des Gehäuses an die Wärmeausdehnung der Rotorblätter bei unterschiedlichen Betriebstemperaturen übereinstimmt. Der Nachteil dieses passiven Systems liegt darin, dass der Rotorspalt lediglich an die Wärmeausdehnung, aber nicht an die in der Praxis genauso wichtige Längung der Rotorblätter unter Wirkung der Fliehkraft angepasst werden kann. Außerdem ist die Ansprechzeit dieses Systems sehr langsam.

[0009] Die Ansprechzeit und auch die Möglichkeiten zur Beeinflussung der Weite des Rotorspaltes sind bei aktiven Systemen, bei denen der Rotorspalt durch Aktuatoreinheiten aktiv verändert wird, gegenüber den passiven Systemen verbessert.

[0010] In der US 5,906,473 ist ein aktives System für eine Gasturbine beschrieben, bei dem Teile des Gehäuses gegenüber dem Rotor selektiv gekühlt oder beheizt werden, um über die so kontrollierte Wärmedehnung des Gehäuses den Rotorspalt einzustellen. Der Nachteil dieses Systems liegt in der nach wie vor langsamen Ansprechzeit, da zu einer Änderung des Rotorspaltes zunächst das Gehäuse auf eine vorbestimmte Temperatur gebracht werden muss. Bei raschen Änderungen des Betriebszustandes kann das System der US 5,906,473 den Rotorspalt nicht schnell genug anpassen. Allerdings scheint durch die aktive Beheizung der Gehäusewand eine Anpassung an eine sich langsam einstellende Längung der Rotorblätter unter Fliehkrafteinwirkung möglich.

[0011] Um das Ansprechverhalten bei der Einstellung des Rotorspaltes zu erhöhen und um eine direktere Steuerung des Rotorspaltes zu erreichen, werden beim System der US 5,104,287 und der US 5,096,375 mecha-

nisch bewegte Gehäusesegmente gegenüberliegend den Rotorblättern eingesetzt. Die Gehäusesegmente sind zu einem Ring zusammengeschlossen und werden über Gewindestifte in Richtung der Rotorblätter radial bewegt, so dass sich der Ring zusammenzieht oder weitet, wenn sich die Gewindestifte drehen. Die Gewindestifte sämtlicher Gehäusesegmente werden zusammen über einen Synchronisierungsring betätigt und ermöglichen so eine gemeinsame und zeitgleiche Verstellung der Gehäusesegmente und damit eine Einstellung des Rotorspaltes. Nachteilig bei dieser Vorrichtung ist zum einen der enorme konstruktive und fertigungstechnische Aufwand, der notwendig wird, wenn eine nahezu spielfreie Verstellung der Segmente im Bereich weniger Zehntel Millimeter angestrebt wird, und zum anderen die nach wie vor langsame Ansprechzeit.

[0012] In der US 5,283,816 ist eine Vorrichtung zur Rotorspaltsteuerung für einen Radialverdichter beschrieben, bei welcher der Rotorspalt über eine Verschiebung des Rotors gegenüber dem Gehäuse in axialer Richtung stattfindet. Auch dieses Prinzip ist konstruktiv sehr aufwändig und weist ein nur mäßig schnelles Ansprechverhalten auf. Darüber hinaus ist das System der US 5, 263,816 auf Radial-Strömungsmaschinen beschränkt.

[0013] In der US 5,545,007 ist ein Ring aus Gehäusesegmenten gegenüberliegend den Rotorblättern beschrieben, der durch piezoelektrische Elemente zusammenziehbar und aufweitbar ist. Über Näherungssensoren wird die Weite des Rotorspalts zwischen Rotorblattspitzen und Gehäusesegmenten bestimmt und die zwischen dem Segmentring. Die stationären, an einer gehäuseseitigen Halterung angeordneten Piezoelemente werden dann in Abhängigkeit vom gemessenen Rotorspalt mit einer Spannung beaufschlagt, so dass aufgrund der Elektrorestriktion der Piezoelemente die Segmente des Ringes in Richtung zu oder in Richtung weg von den Rotorblättern bewegt werden. Der Nachteil des Systems der US 5,545,007 liegt in der mangelnden Stabilität des Segmentrings, da dieser ausschließlich von den piezoelektrischen Elementen gehalten wird.

[0014] Weitere Vorrichtungen zur Rotorspaleinstellung sind in der US 4,247,247 sowie in der US 4,683,716, der US 5,211,534, der US 5,871,333 und der DE-A-2 922 835 gezeigt.

[0015] In der US 4,247,247 ist eine Axialströmungsturbine gezeigt, bei der das Gehäuse gegenüber den Rotoren einen Ring mit einer dünnen, biegsamen Wand aufweist. Hinter der dünnen Wand sind ringförmige Druckkammern angeordnet, die mit unterschiedlichen Drücken beaufschlagt werden können. Überschreitet der Druck in den Druckkammern den Druck in der Axialströmungsturbine, so wölbt sich die Wand kontrolliert vor und verkleinert den Rotorspalt. Die Druckkammern werden dabei so mit Druck beaufschlagt, dass sich der Rotorspalt in Strömungsrichtung verkleinert.

[0016] Bei der Gasturbine der US 4,683,718 wird die Gehäusewand mitsamt mehreren Reihen von Stator-

schaufeln über mehrere Verdichterstufen hinweg pneumatisch verstellt. Hierzu ist eine Druckkammer hinter der Gehäusewand vorgesehen, die sich über mehrere Rotor und Statorreihen erstreckt. Durch Zuführen von niedrigem Druck oder hohem Druck in die Druckkammer wird vermieden, dass sich die Rotorschaufeln bei Anlaufvorgängen an der Gehäusewand reiben.

[0017] Bei der US 5,211,534 wird der Rotorspalt ebenfalls pneumatisch verstellt. Ein aus radial verschiebblichen Ringsegmenten zusammengesetzter Dichtring um den Rotor wird unter Einwirkung von Druckluft auf die starren Ringsegmente zusammengezogen oder geweitet wird.

[0018] Auch die Vorrichtung der US 5,781,333 weist Gehäusesegmente auf, die über eine Beaufschlagung von Druckkammern mit Druckluft in Richtung der Rotorblätter bewegt werden. Um das Ansprechverhalten zu erhöhen, ist die Druckkammer mit Entlüftungsventilen zum schnellen Druckausgleich versehen.

[0019] Bei den Systemen der US 4,247,247, der US 4,683,716, der US 5,211,534 und der US 5,871,333 ist nachteilig, dass eine schnelle und selektive Verstellung des Rotorspalts nicht möglich ist.

[0020] In der US 6,142,477 ist eine aktive Dichtvorrichtung beschrieben, die für die Abdichtung von Lagern bei Gasturbinen verwendet wird. Die aktive Dichteinrichtung weist Dichtelemente auf, die sich von selbst nahe einer Dichtscheibe anordnen, ohne in Kontakt mit der Dichtscheibe zu kommen, wenn sich die Dichtscheibe dreht. Hierzu ist die Dichtfläche als ein Magnetring ausgebildet, der in Umfangsrichtung sich abwechselnde, unterschiedlich polarisierte Bereiche aufweist. Diese Bereiche erzeugen bei Drehung des Magnetringes einen magnetischen Fluss, dessen Stärke von der Drehgeschwindigkeit des Magnetringes abhängt. Die Dichtelemente sind mit Spulen versehen, die auf die Stärke des vom sich drehenden Ring erzeugten Magnetfeldes reagieren und je nach Drehgeschwindigkeit und Entfernung des Magnetringes von den Spulen die selbsttätig an den Magnetring oder von diesem weg bewegen. Das System der US 6,142,477 ist so in der Lage, automatisch auf eine Änderung des Dichtspaltes zu reagieren. Allerdings geht aus der US 6,142,477 nicht hervor, wie dieses System zur Einstellung eines Rotorspalts verwendet werden kann, da für die Funktion dieses Systems an der einen, den Dichtelementen gegenüberliegenden Gegendichtfläche stets ein durchgängiger Magnetring nötig ist.

[0021] Zusammengefasst ist also aus dem oben genannten Stand der Technik keine Vorrichtung bekannt, bei der das Ansprechverhalten eine schnelle Einstellung des Rotorspalts ermöglicht.

[0022] Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, das eingangs genannte Rotorspalt-Steuermodul so zu verbessern, dass ein schnelleres Ansprechverhalten erreicht wird.

[0023] Diese Aufgabe wird durch das Rotorspalt-Steuermodul der eingangs genannten Art erfindungsgemäße dadurch gelöst, dass die Abmessung des Dichtelementes in Drehrichtung kleiner als der Abstand zweier auf-

einanderfolgender Rotorblätter ist.

[0024] Diese Lösung ist einfach und aus dem Stand der Technik nicht bekannt. Sämtliche oben genannten Druckschriften weisen kreissegmentförmige Dichtelemente auf, deren Abmessungen in Drehrichtung größer als der Abstand zweier aufeinanderfolgender Rotorblätter sind. Dadurch sind die bewegten Massen bei den herkömmlichen Systemen zur Einstellung des Rotorspaltes so groß, dass sie auf Änderungen des Rotorspaltes nur langsam reagieren können. Außerdem ist es aufgrund der Erstreckung der herkömmlichen Gehäusesegmente über mehrere Rotorblätter nicht möglich, den Rotorspalt bei asymmetrischer oder elliptischer Verformung des Rotors oder des Gehäuses gezielt anzupassen.

[0025] Diese Nachteile werden durch die erfindungsgemäße, konstruktiv einfache Lösung vermieden: Durch die erfindungsgemäßen Abmessungen des Dichtelementes sind die bewegten Massen des Dichtelementes kleiner und können wesentlich schneller bewegt werden.

[0026] Die erfindungsgemäße Lösung sieht dabei vor, dass die Abmessungen des Dichtelementes in Drehrichtung wesentlich kleiner als der Abstand zweier aufeinanderfolgender Rotorblätter sind. Vorzugsweise sind die Dichtelemente so groß, dass eine Vielzahl von Dichtelementen in den Abstand zweier aufeinanderfolgender Rotorblätter hineinpasst.

[0027] Eine weitere Beschleunigung des Ansprechverhaltens kann dadurch erreicht werden, dass in einer weiteren vorzugsweisen Attsgestaltung die Abmessungen des Dichtelementes in Hauptströmungsrichtung höchstens der Schaufeltiefe eines Rotorblatts in Hauptströmungsrichtung entsprechen. Durch diese Maßnahme werden die bewegten Massen nochmals verringert. Die Dichtelemente sind dabei vorzugsweise so bemessen, dass eine Mehrzahl von Dichtelementen über eine Schaufeltiefe, also in Dichtrichtung, gestaffelt angeordnet werden können. Da bei den meisten Rotoren der größte Drucksprung in Hauptströmungsrichtung stattfindet, entspricht die Dichtrichtung in den meisten Fällen der Hauptströmungsrichtung.

[0028] Eine sehr präzise und schnelle Anpassung des Rotorspaltes ist dann möglich, wenn in einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung die Dichtelemente möglichst einzeln angesteuert werden können, also einer Aktuatoreinheit so wenig Dichtelemente wie möglich zugeordnet sind.

[0029] Zu Wartungszwecken soll das Rotorspalt-Steuermödul einfach auszutauschen sein, ohne dass bei der gesamten Strömungsmaschine zerlegt werden muss. Dies ist dann erfüllt, wenn in einer vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung die Abmessung des Rotorspalt-Steuermoduls in Drehrichtung des Rotors kleiner als der Abstand zweier aufeinanderfolgender Rotorblätter ist. Kompakte Einbaumaße werden auch dann erzielt, wenn die Abmessung des Rotorspalt-Steuermoduls in Hauptströmungsrichtung höchstens der Schaufeltiefe des Rotorblatts in Hauptströmungsrichtung entspricht.

[0030] Ein Prinzip der vorliegenden Erfindung besteht

darin, im Gegensatz zu den herkömmlichen Rotorspalt-Steuermödule eine möglichst große Anzahl von Dichtelementen im Rotorspalt vorzusehen. Durch die Vielzahl der Dichtelemente im Rotorspalt tritt durch die Gesamtwirkung aller Dichtelemente eine gute Abdichtung des Rotorspaltes ein. Somit kann auf eine aufwändige Abdichtung von Spalten und Lücken zwischen den Dichtelementen verzichtet werden.

[0031] In einer Weiterbildung können die Dichtelemente voneinander beabstandet angeordnet sein. Dabei können allerdings auch mehrere Dichtelemente mit einem gemeinsamen Hüllkörper versehen sein, der zwischen den Dichtelementen und dem Rotor angeordnet ist und zusammen mit den Dichtelementen beweglich ist. Der Hüllkörper kann aus einem Material mit besonderen mechanischen Eigenschaften gefertigt sein, beispielsweise aus einem abriebfesten, hochtemperaturbeständigen und/oder weitgehend reibungsfreien Material, um die Dichtelemente zu schützen.

[0032] Die Dichtelemente können insbesondere dann ohne Verluste in der Dichtwirkung voneinander beabstandet angeordnet sein, wenn sie gestaffelt, sich in Hauptströmungsrichtung überlappend angeordnet sind. Hierzu können die Dichtelemente in Hauptströmungsrichtung in mehreren Reihen angeordnet sein. So werden die Lücken zwischen Dichtelementen in der einen Reihe durch die Dichtelemente in der anderen Reihe geschlossen. Die Dichtwirkung bei dieser Anordnung beruht auf der Schaffung eines "Labyrinths" zwischen den Dichtelementen, durch das der Strömungswiderstand im Rotorspalt erheblich erhöht wird. Damit ist eine Dichtwirkung erzielbar, die an die von geschlossenen Dichtflächen, wie sie zur Einstellung des Rotorspaltes aus dem Stand der Technik bekannt sind, herankommt.

[0033] Zur Bewegung des Dichtelementes in oder aus den Rotorspalt ist die Aktuatoreinheit im Rotorspalt-Steuermödul angeordnet, die im Betrieb eine auf das Dichtelement wirkende Betätigungskraft ausübt. In einer vorteilhaften Ausgestaltung erzeugt die Aktuatoreinheit die Betätigungskraft im Betrieb unter Einwirkung eines Fluiddruckes, der sich vom Fluiddruck im Bereich des Rotors der Strömungsmaschine unterscheidet. Dieser Fluiddruck kann gemäß einer weiteren vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung in eine Aktuatorkammer eingeleitet werden, die mit dem Dichtelement kraftübertragend verbunden ist.

[0034] Die Aktuatoreinheit kann des Weiteren wenigstens eine mit einer Überdruckquelle verbundene Überdruckkammer und/oder eine mit einer Unterdruckquelle verbundene Unterdruckkammer aufweisen, um der Aktuatorkammer ohne lange Wege sofort entsprechende Steildrucke für das oder die der Aktuatorkammer zugeordnete Dichtelement oder Dichtelemente zuzuleiten. Auf separate Mittel zur Erzeugung des Unterdrucks und des Überdrucks, wie beispielsweise Pumpen, kann in vorteilhafter Weise verzichtet werden, wenn die Überdruckkammer mit einem Hochdruckbereich der Strömungsmaschine als Überdruckquelle und die Unter-

druckkammer mit einem Niederdruckbereich der Strömungsmaschine als Unterdruckquelle verbunden ist. In diesem Zusammenhang beziehen sich die Begriffe "Unterdruck" und "Überdruck" auf den im Bereich des Rotors herrschenden Druck.

[0035] In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung kann die Überdruckkammer von der Unterdruckkammer zumindest abschnittsweise umgeben sein. Da in der Überdruckkammer stets heißeres Fluid vorhanden ist als in der Unterdruckkammer, wird durch diese Anordnung eine zu starke Aufheizung des Rotorspalt-Steuermoduls vermieden.

[0036] Zur wechselweisen Beaufschlagung der Aktuator-kammer mit Überdruck bzw. Unterdruck kann die Aktuatoreinheit wenigstens ein Ventil aufweisen, das zwischen der Aktuator-kammer und der Unterdruckkammer und/oder Überdruckkammer zugeordnet ist. Wird das Ventil geöffnet, so wirkt wahlweise der Druck der Unterdruckkammer und/oder der Überdruckkammer auf die

Aktuator-kammer und führt zu einer entsprechenden Betätigung des Dichtelements.
[0037] In einer besonders bevorzugten Ausführungsform weist das Dichtelement eine elastische Membran als Dichtfläche auf, die in einem vorgewölbten, blasenförmigen Zustand in den Rotorspalt hineinragt und diesen zumindest abschnittsweise abdichtet. Bei dieser Ausführung bilden die Dichtelemente einzelne Blasen; die sich zur Verkleinerung des Rotorspaltes aufwölben und zur Vergrößerung abflachen. Diese Ausgestaltung ermöglicht einen großen Hub der Dichtelemente, also die Abdichtung großer Spaltmaße, ohne große Verstellkräfte.

[0038] Die Membran steht mit der Aktuator-kammer so in Wirkverbindung, dass der in der Aktuator-kammer herrschende Druck auf die Membran wirkt. Hierzu kann eine Druckleitung von der Aktuator-kammer zur Membran führen oder aber die Aktuator-kammer zumindest abschnittsweise von der Membran begrenzt sein.

[0039] Ist die Aktuator-kammer mit einem Überdruck, d. h. einem höheren Druck als im Rotorspalt, beaufschlagt, so wölbt sich die Membran des Dichtelements vor und bildet eine in den Rotorspalt ragende Blase. Bei einem Unterdruck, d. h. einem geringeren Druck als im Rotorspalt, so zieht sich die Membran aufgrund ihrer Eigenelastizität zusammen, die Blase wird kleiner und der Rotorspalt vergrößert sich.

[0040] Um die Aktuatoreinheit steuern zu können, kann einer Weiterbildung der Erfindung an der Aktuatoreinheit eine Eingangs-schnittstelle vorgesehen sein, über die im Betrieb des Rotorspalt-Steuermoduls Signale zur Betätigung des Dichtelements an die Aktuatoreinheit geleitet sind.

[0041] Das Rotorspalt-Steuermodul kann außerdem eine Energiequelle in Form eines Mittels zur Stromerzeugung aufweisen, mit dem elektrische Energie zum Betrieb des Rotorspalt-Steuermoduls bereitgestellt wird. Diese Energiequelle kann vorzugsweise in Form einer zwischen der Unterdruckkammer und der Überdruck-

kammer angeordneten Mikroturbine ausgebildet sein.

[0042] Ferner kann in einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung in das Rotorspalt-Steuermodul eine Sensoreinheit mit wenigstens einem Spaltmesssensor und einer Signalausgangsschnittstelle vorgesehen sein. Durch diese Ausgestaltung ist die Größe des Rotorspalts in der Nähe des Dichtelements, also in der näheren Umgebung derjenigen Stelle, an der der Rotorspalt verändert wird, gemessen. Dabei ist durch den Spaltmesssensor ein für die Größe des Rotorspaltes repräsentatives Signal erzeugbar und von der Sensoreinheit über die Signalausgangsschnittstelle ausgebbar.

[0043] Ebenso kann das Rotorspalt-Steuermodul einen Lageerfassungssensor aufweisen, durch den die Lage des Dichtelementes im Rotorspalt bzw. relativ zu der von den Rotorblattspitzen gebildeten Gegendichtfläche bestimmbar und in Form eines Signals über die Ausgangsschnittstelle ausgebbar ist.

[0044] Wenn das Dichtelement pneumatisch betrieben wird, so ist es von Vorteil, wenn die 1 Rotorspalt-Steuervorrichtung wenigstens einen Drucksensor aufweist, durch den der Druck in der Aktuator-kammer und/oder der Fluiddruck im Rotorbereich in der Strömungsmaschine und/oder die Druckdifferenz zwischen diesen beiden Drücken erfassbar und über die Signalausgangsschnittstelle als Signal ausgebbar ist.

[0045] Zum Aufbau eines Steuerkreises bzw. geschlossenen Regelkreises kann das Rotorspalt-Steuermodul gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung eine Steuereinheit mit einer Eingangsschnittstelle, einer Ausgangsschnittstelle und einer Datenverarbeitungseinheit aufweisen. Die Eingangsschnittstelle der Steuereinheit ist dabei mit der Ausgangsschnittstelle der Sensoreinheit datenübertragend verbunden, so dass die Signale der Sensoren der Sensoreinheit von der Steuereinheit empfangen werden können. Die Ausgangsschnittstelle der Steuereinheit ist mit der Eingangsschnittstelle der Aktuatoreinheit datenübertragend verbunden, so dass die Ergebnisse einer Auswertung der Daten von den Sensoren der Sensoreinheit in Form eines Betätigungssignals für das Dichtelement an die Aktuatoreinheit ausgegeben werden können.

[0046] Die Datenverarbeitungseinheit verarbeitet die über die Ausgangsschnittstelle ausgegebenen Daten in Abhängigkeit von den über die Eingangsschnittstelle empfangenen Daten und erzeugt ein Signal zur Betätigung der Aktuatoreinheit bzw. der Dichtelemente. Sämtliche Datenleitungen können dabei vorteilhaft in Form eines unidirektionalen oder bidirektionalen Datenbusses aufgebaut sein.

[0047] Ferner kann die Steuereinheit einen Datenbus aufweisen, über den sie mit Steuereinheiten weiterer Rotorspaltmodule datenübertragend verbunden ist. Dieser Datenbus kann beispielsweise derselbe Datenbus sein, der auch die Ausgangsschnittstelle der Sensoreinheit und die Eingangsschnittstelle der Aktuatoreinheit mit der Steuereinheit verbindet.

[0048] Besonders vorteilhafte Größenverhältnisse,

die aufgrund der bewegten Massen und aufgrund der kurzen Leitungswege extrem schnelle Ansprechzeiten im Bereich der Blattfrequenz des Rotors, der sogenannten blade passing frequency, ergeben, werden erreicht, wenn das Rotorblatt-Steuermodul als ein Mikrostruktursystem ausgebildet ist, in das Dichtelement und Aktuatereinheit integriert sind. Ein derartiges Mikrostruktursystem ist vorzugsweise einstückig aus einem siliciumhaltigen Werkstoff aufgebaut und besteht aus mehreren funktionellen Schichten. Beispiele für geeignete Werkstoffe sind Silicium, Siliciumcarbid, Siliciumdioxid und Siliciumnitrid.

[0049] Mikrostruktursysteme werden durch photolithographische Verfahren, wie LIGA, durch Bulk-Micromachining und Surface-Micromachining, Dünnschichtablage (chemical vapor deposition) und Ätzen aus Wafern hergestellt. Beim Aufbau des Rotorspalt-Steuermoduls als Mikrostruktursystem kann insbesondere eine als Dichtelement dienende Membran aus einem dünnen Film siliciumhaltigen Werkstoffes, beispielsweise Silicurncarbld, gefertigt sein. Bei extrem dünner Ausbildung der Membran weist Silicium-carbid eine ausreichende Elastizität auf. Ebenso können die Mikroventile aus einem siliciumhaltigen Werkstoff gefertigt und in das Mikrostruktursystem integriert sein.

[0050] Vorteilhaft werden bei der Ausbildung des Rotorspalt-Steuermoduls als Mikrostruktursystem auch gleich die Steuereinheit und/oder die Sensoreinheit in das Mikrosystemelement integriert.

[0051] Um eine nachträgliche Ausrüstung und eine leichte Austauschbarkeit des Rotorspalt-Steuermoduls zu ermöglichen, weist dieses vorzugsweise ein standardisiertes Gehäuse auf, das mit standardisierten Anschlüssen für Daten- und Druckleitungen versehen ist. In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung kann das Gehäuse mit Isoliermaterial zum Schutz gegen Überhitzung und/oder Schwingungen und Stöße umgeben sein.

[0052] Erfindungsgemäß ist in einer Strömungsmaschine mit einem Rotor und einem den Rotor unter Ausbildung eines Rotorspalt umgebenden Gehäuse, wobei sich im Betrieb der Rotor gegenüber dem Gehäuse dreht, im Bereich des Rotorspaltes eine Vielzahl von Rotorspaltmodulen nach einer der obigen Ausgestaltungen angeordnet. Diese Rotorspaltmodule können miteinander durch eine Signalleitung verbunden sein, so dass ihre Betätigung synchronisiert erfolgt. Beispielsweise können mehrere Rotorspalt-Steuermodule so vernetzt sein, dass ein in Umfangsrichtung nachfolgendes Rotorspalt-Steuermodul die Sensorsignale eines im Drehrichtung davor liegenden Rotorspalt-Steuermoduls zur Steuerung der eigenen Dichtelemente verwendet.

[0053] Außerdem kann die Sensorik der Rotorspalt-Steuermodule zur Funktionskontrolle der Strömungsmaschine eingesetzt werden, da von den Modulen wichtige Betriebsparameter der Strömungsmaschine, beispielsweise der Druck im Rotorbereich, gemessen wird.

[0054] Hierzu ist das Rotorspalt-Steuermodul in einer vorteilhaften Weiterbildung mit einem weiteren Sensor

versehen, der als Schwingungssensor die Schwingungen der vorbeifahrenden Rotorblattspitzen erfasst und ein Signal ausgibt, das repräsentativ für die Frequenz und/oder Amplitude der Schwingungen der Rotorblattspitzen oder der Rotorblätter ist. Hierzu kann der Sensor ein optisches Messelement und/oder ein kapazitives Messelement aufweisen. Alternativ kann der Sensor auf Ultraschallbasis arbeiten und einen Ultraschallwandler aufweisen. Beispielsweise kann der Ultraschallwandler auf die Rotorblätter und/oder die Rotorblattspitzen gerichtete Ultraschallwellen aussenden und deren Reflexionen messen.

[0055] Die Rohdaten der Messungen des Schwingungssensors werden auf einem integrierten Speicherchip abgelegt. Dieser Speicherchip kann bei einem Aufbau als Mikrostrukturelement einstückig mit dem Rotorspalt-Steuermodul ausgebildet und/oder beispielsweise in die Steuereinheit integriert sein. Die Rohdaten können über den Datenbus des Rotorspalt-Steuermoduls in Echtzeit oder beispielsweise nach Ende eines Einsatzes der Strömungsmaschine an eine Auswerteeinheit übertragen werden. Insbesondere kann der Datenbus dabei als eine Funkstrecke ausgebildet sein, so dass die Daten berührungsfrei ausgegeben werden. Hierzu kann in dem Rotorspalt-Steuermodul ein Funksender und bei einem bidirektionalen Datenbus auch ein Funkempfänger vorgesehen sein. Insbesondere die Übertragung von Betriebsparametern des Rotorspalt-Steuermoduls über eine Funkstrecke ermöglicht eine einfache Steuerung und Auswertung der Daten des Rotorspalt-Steuermoduls.

[0056] Der Schwingungssensor mitsamt den Datenübertragungseinheiten des Datenbusses können von derselben Energiequelle wie die anderen Einheiten des Rotorspalt-Steuermoduls mit Energie versorgt werden.

[0057] Die Schwingungssensoren können in einer Weiterführung der Erfindung auch zur Überwachung anderer Bauteile als den Rotorblättern eingesetzt werden. Beispielsweise lassen sich die Schwingungen von Wellen, Statorblättern und Gehäuseelementen sowie gegebenenfalls auch die Schwingungen der Dichtelemente selber durch die Schwingungssensoren erfassen.

[0058] Die Rotorspalt-Steuermodule umgeben in einer vorteilhaften Anordnung den Rotor ringförmig und bilden ein Dichtelementfeld, bei dem jeweils einem Abstand zwischen zwei Rotorblättern eine Vielzahl von Dichtelementen zugeordnet ist.

[0059] Um die Dichtelemente zu schützen, kann ein Hüllkörper vorgesehen sein, der zwischen dem Rotorspaltmodul und dem Rotor angeordnet ist und mehreren Rotorspaltmodulen zugeordnet ist. Der Hüllkörper ist mit der Bewegung der Dichtelemente gekoppelt und schützt diese durch seine Lage zwischen den Dichtelementen und dem Rotor vor Beschädigung. Der Hüllkörper kann insbesondere als eine abriebfeste Membran ausgebildet sein.

[0060] Gegenstand der Erfindung ist auch ein Verfahren zur Steuerung des Rotorspalts, mit dem ein gegenüber dem Stand der Technik wesentlich verbessertes An-

sprechverhalten erzielt wird.

[0061] Unabhängig von der Verwendung zur Einstellung eines Rotorspalts in Strömungsmaschinen können die erfindungsgemäßen Rotorspalt-Steuermodule auch als Dichtmodule bei im wesentlichen durchgängigen Gegendichtflächen, wie beispielsweise zur Abdichtung von Wellen verwendet werden. Durch die Möglichkeit der aktiven Einstellung des Dichtspaltes oder der Anpresskraft gegen die Gegendichtfläche und durch das schnelle Ansprechverhalten können Schwingungen und Exzentrizitäten der Welle ausgeglichen werden, ohne dass Einbußen bei der Dichtwirkung in Kauf genommen werden müssen.

[0062] Im Folgenden wird der Aufbau und die Funktion des erfindungsgemäßen Rotorspalt-Steuermoduls anhand eines Ausführungsbeispiels genauer erläutert.

[0063] Es zeigen:

Fig. 1 ein Flugzeugtriebwerk als ein Beispiel für eine in einer Hauptströmungsrichtung durchströmten Strömungsmaschine, bei der das erfindungsgemäße Rotorspalt-Steuermodul eingesetzt wird;

Fig. 2 ein erstes Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Rotorspalt-Steuermoduls in einem Schnitt quer zur Hauptströmungsrichtung entlang der Linie II-II der Fig. 1;

Fig. 3 das Rotorspalt-Steuermodul der Fig. 2 in einem Schnitt entlang der Linie III-III der Fig. 2;

Fig. 4 ein zweites Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Rotorspalt-Steuermoduls in einer Ansicht entsprechend Fig. 3;

Fig. 5 ein drittes Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Rotorspalt-Steuermoduls in einer Ansicht entsprechend Fig. 3;

Fig. 6 ein viertes Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Rotorspalt-Steuermoduls als Wellendichtmodul in einer Ansicht entsprechend Fig. 3;

Fig. 7 das vierte Ausführungsbeispiel in einer Ansicht entlang der Linie VII-VII der Fig. 6.

[0064] In Fig. 1 ist ein Flugzeugtriebwerk 1 als Beispiel einer Strömungsmaschine dargestellt, bei der die erfindungsgemäßen Rotorspalt-Steuermodule verwendet werden. Weitere Beispiele von Strömungsmaschinen sind Radial- oder Axialgebläse, Turbolader, Gasturbinen, Pumpen und Kompressoren.

[0065] Alle diese Strömungsmaschinen werden von einem gasförmigen oder flüssigen Fluid in einer Hauptströmungsrichtung H durchströmt. Beim Beispiel der Fig. 1 verläuft die Hauptströmungsrichtung H im Wesentli-

chen in axialer Richtung A.

[0066] Eine so komplexe Strömungsmaschine, wie das in Fig. 1 dargestellte Flugzeugtriebwerk, weist eine Reihe von Rotoren R auf, die von jeweils einem Gehäuse G unter Ausbildung eines Rotorspalts S umgeben sind.

[0067] Die erfindungsgemäßen Rotorspalt-Steuermodule können an den in Fig. 1 schraffierten Stellen 2, 3 angeordnet sein. Die Stellen mit dem Bezugszeichen 2 entsprechen dabei einer gehäuseseitigen Anordnung eines Rotorspaltmoduls, diejenigen mit dem Bezugszeichen 3 einer rotorseitigen Anordnung eines Rotorspaltmoduls.

[0068] In Fig. 2 ist schematisch der Querschnitt entlang der Linie II-II der Fig. 1 dargestellt. Dieser Querschnitt liegt im Bereich einer Rotorscheibe R_v, die eine Verdichterstufe vor einer Brennkammer B des Flugzeugtriebwerkes darstellt.

[0069] Wie in Fig. 2 zu erkennen ist, weist der Rotor R_v der Verdichterstufe Rotorblätter 5 auf, die in einem vorbestimmten Abstand T zueinander angeordnet sind. Die Rotorblätter drehen sich in Drehrichtung D. Gehäuseseitig sind die Rotorblätter 5 mit einem Ring aus Rotorspalt-Steuermodulen 6 umgeben. Das Rotorspalt-Steuermodul ist in der Fig. 2, wie auch in den restlichen Figuren, der deutlicheren Darstellung wegen gegenüber dem Rotor und dem Rotorspalt Vergrößert dargestellt. Typische Größen für die Abmessungen des Rotorspalt-Steuermoduls liegen zwischen 0,5 und 50 mm, vorzugsweise um die 10 bis 20 mm.

[0070] Beispielhaft wird nun der Aufbau eines Rotorspalt-Steuermoduls 6 anhand des in der Fig. 2 mittleren Rotorspalt-Steuermoduls erläutert.

[0071] Das Rotorspalt-Steuermodul 6 weist ein Gehäuse 7 auf, welches das Rotorspalt-Steuermodul 6 an allen Seiten bis auf die den Rotorblättern 5 zugewandte Seite umgibt. Das Gehäuse 7 ist aus einem wärmesollierenden und vorzugsweise auch schwingungsisolierenden Werkstoff aufgebaut. Durch das Gehäuse 7 ist das Rotorspalt-Steuermodul als eine autarke Einheit handhabbar. Um das Rotorspalt-Steuermodul 6 im Falle einer Wartung mechanisch und elektrisch leicht mit anderen Modulen austauschen zu können, sind sämtliche Anschlüsse an Gehäuse 7 standardisiert ausgeführt.

[0072] Der vom Gehäuse 7 umgebene Teil des Rotorspalt-Steuermoduls ist aus einem Mikrostruktursystem aus Silicium oder einer Siliciumverbindung, wie Siliciumnitrid oder Siliciumcarbid, hergestellt. Zur Herstellung können herkömmliche Verfahren der Mikrostrukturtechnik, wie LIGA, Micromachining, Ätzzvorgänge usw. verwendet werden.

[0073] Das Rotorblatt-Steuermodul 6 weist Dichtelemente 8 auf, die so ausgebildet sind, dass sie in einer Betriebsstellung in den Rotorspalt S ragen. Die Dichtelemente 8 sind in Drehrichtung D des Rotors 5 wesentlich kleiner als der Abstand T zwischen zwei Rotorblättern. Die Dichtelemente 8 werden aus einer dünnen Membran aus Silicium oder einem siliciumhaltigen Werkstoff, wie Siliciumcarbid, gebildet und sind über wenigstens eine

Druckleitung 9 jeweils mit einer Aktuatkammer 10 verbunden. Die Wandstärke der Membran ist so bemessen, dass die Membran eine hohe Elastizität aufweist. Die Aktuatkammern 10 des jeweiligen Dichtelements 8 sind beim Ausführungsbeispiel der Fig. 2 voneinander durch eine Wand 11 voneinander getrennt. Durch die Zuordnung möglichst weniger Dichtelemente 8 zu einer Aktuatkammer 10 lassen sich die Dichtelemente 8 präziser ansteuern.

[0074] Die Dichtelemente 8 bilden zusammen keine kontinuierliche Dichtfläche, die der Umlaufbahn U der Rotorblattspitzen 12 entspricht, sondern diskrete Dichtflächen, die voneinander beabstandet sind und mit den Rotorblattspitzen als Gegendichtflächen zusammenwirken. Die Dichtelemente 8 sind, wie in Fig. 2 zu erkennen ist, in mehreren Reihen gestaffelt angeordnet, so dass der Zwischenraum 8 zwischen zwei Dichtelementen einer Reihe durch ein Dichtelement 8 einer anderen Reihe abgedeckt ist.

[0075] Die Aktuatkammer 10 eines jeweiligen Dichtelements 8 ist über ein Ventil 13 mit einer Druckkammer 14 verbunden. Die Aktuatkammer 10, die Druckkammer 14 und das Ventil 13 sind Bestandteile einer pneumatischen, also druckluftbetriebenen, Aktuatoreinheit des Rotorspalt-Steuermoduls, durch die das Dichtelement 8 aktiv verstellt wird. Unter einer aktiven Verstellung ist dabei eine Verstellung zu verstehen, für die Energie von außerhalb oder von anderen Bereichen der Strömungsmaschine verwendet wird.

[0076] Die Ventile 13 sind bei einer Fertigung des Rotorspalt-Steuermoduls in Mikrostrukturtechnik (MEMS-, *micro-electro-mechanical systems*) Mikroventile, die in einem Stück mit dem Rotorspalt-Steuermodul gefertigt werden.

[0077] Die Ventile 13 öffnen auf ein Signal hin die Verbindung zwischen jeweils einer Aktuatkammer 10 und der Druckkammer 14, so dass sich in der Aktuatkammer 10 der jeweils in der Druckkammer 14 herrschende Druck ausbreitet.

[0078] Die Druckkammer 14 ist über eine Leitung 15 mit einer Druckquelle verbunden, die mit einem Druck P beaufschlagt ist. Das Gehäuse 7 weist ein standardisiertes Anschlusselement auf, so dass ohne besondere Mittel eine Druckleitung mit der Leitung 15 verbunden werden kann.

[0079] Wie in Fig. 2 zu erkennen ist, ist es aufgrund der geringen Größe der Mikrostrukturelemente nicht notwendig, ihre dem Rotorspalt S zugewandte Fläche 16 kreissegmentförmig auszubilden. Aufgrund der geringen Baugröße der Rotorblatt-Steuermodule in Drehrichtung wird bei geringen Herstellkosten bereits eine gute Annäherung an die Umlaufbahn U der Rotorblattspitzen 12 erreicht. Es ist jedoch eine kreissegmentförmige Ausgestaltung der Fläche 16 möglich.

[0080] In Fig. 2 ist weiter der modulförmige Charakter des Rotorspalt-Steuermoduls zu erkennen. Das Rotorspalt-Steuermodul bildet jeweils eine Baueinheit, die weitgehend autark ist und einfach und kostengünstig ge-

gen gleichartige Module ausgetauscht werden kann.

[0081] In Fig. 3 ist ein Schnitt entlang der Linie III-III der Fig. 2, also ein in axialer Richtung A verlaufender Schnitt durch ein Rotorspalt-Steuermodul dargestellt.

[0082] In Fig. 3 ist zu erkennen, dass in Richtung der Hauptströmung H die Abmessungen der Dichtelemente auch wesentlich kleiner als die Komponente C der Sehne des Rotorblatts 5 sind. Die Dichtelemente 8 bilden ein Feld, das in seiner Gesamtheit zu einer guten Abdichtung des Rotorspalts S führt. Einer Rotorblattspitze 12 als Gegendichtfläche sind bei ihrer Umdrehung jeweils mehrere Dichtelemente zugeordnet.

[0083] Wie in Fig. 3 zu erkennen ist, sind jeweils zwei in Hauptströmungsrichtung H hintereinander angeordnete Dichtelemente 8 mit einer Aktuatkammer 10 verbunden. Jede dieser Aktuatkammern ist über ein Mikroventil 13 mit der Druckkammer 14 verbunden.

[0084] In der Fig. 3 sind die Membranen der Dichtelemente 8 in unterschiedlich in den Rotorspalt S ausgeführter Stellung dargestellt. Diese Stellungen entsprechen nicht einem tatsächlichen Betriebszustand, sondern dienen lediglich der Veranschaulichung der Bewegung der Dichtelemente 8, die durch ein blasenförmiges Aufblähen der elastischen Membran entsteht.

[0085] Wie in Fig. 2 zu erkennen ist, sind die Reihen der Dichtelemente 8 bzw. Dichtblasen gestaffelt angeordnet, so dass eine durch das Feld der Dichtelemente 8 gerichtete Strömung auf einen sehr hohen Strömungswiderstand trifft, der die Dichtwirkung der Dichtelemente begründet. Zur Erhöhung der Dichtwirkung können auch mehrere Ringe aus Rotorspalt-Steuermodulen vorhanden sein. Diese Ringe können relativ zueinander in Umfangsrichtung verschoben sein, so dass das Rotorspalt-Steuermodul des einen Ringes den Spalt zwischen zwei Rotorspalt-Steuermodulen des anderen Ringes überdeckt.

[0086] Wie in Fig. 3 weiter zu erkennen ist, bildet das Gehäuse 7 Befestigungsabschnitte 17 aus, die mit entsprechenden Abschnitten des Gehäuses 18 der Strömungsmaschine verbunden werden können. Die dem Rotorspalt S zugewandte Fläche 16 des Rotorspalt-Steurelements 6 schließt vorzugsweise bündig und spaltfrei mit dem Gehäuseelement 18 ab.

[0087] Damit das Rotorspalt-Steuermodul 6 eine autarke Einheit bildet, die unabhängig von den anderen Rotorspalt-Steuermodulen des Ringes um den Rotor R_v eine Einstellung des Rotorspalts vornehmen kann, ist das Rotorspalt-Steuermodul 6 mit einer Steuereinheit 19 sowie einer Sensoreinheit 20 versehen, die in Fig. 3 nur schematisch dargestellt sind. Die Sensoreinheit 20 weist einen Drucksensor (nicht gezeigt) zur Erfassung des Drucks im Rotorspalt, einen weiteren Drucksensor (nicht gezeigt) zur Erfassung des Drucks in der Aktuatkammer sowie einen Spaltemesssensor (nicht gezeigt) auf, durch den die Größe des Rotorspalts S gemessen werden kann. Der Spaltemesssensor kann auf optischer oder kapazitiver Basis, vorzugsweise als berührungsfrei arbeiten.

[0088] In der Sensoreinheit 20 ist des weiteren ein Schwingungssensor (nicht gezeigt) integriert, der auf optischem, kapazitivem oder akustischem (Ultraschall) Wege die Schwingungen der Rotorblätter R und/oder der Rotorblattspitzen 5 erfasst. Es können alternativ auch Schwingungssensoren zur Erfassung von Gehäuse-schwingungen, von Naben- oder Wellenschwingungen sowie von Schwingungen des Dichtelements selber vorgesehen sein.

[0089] Die Sensoreinheit 20 ist mit einer Ausgangsschnittstelle versehen, über welche die jeweiligen Sensoren Signale, die repräsentativ für die von ihnen jeweils erfassten Messgrößen sind, über eine Datenleitung 21 ausgeben. Die Datenleitung 21 ist mit einer Eingangsschnittstelle der Steuereinheit 19 verbunden. Die Steuereinheit 19 verarbeitet die von der Sensoreinheit 20 empfangenen Daten und gibt über eine Ausgangsschnittstelle Ausgangsdaten in Abhängigkeit von den Eingangsdaten und in einem Speicher abgespeicherten Daten an eine Ausgangsleitung 22 aus. Die Ausgangsleitung 22 ist mit den Ventilen 13 der Aktuatoreinheit verbunden. Auf ein entsprechendes Signal aus der Ausgangsleitung 22 öffnen und schließen sich die Ventile 13.

[0090] Zur Versorgung der Steuereinheit 21 und der Sensoreinheit 20 sowie der Mikroventile 13 kann eine interne Energiequelle 22 in Form eines Mittels zur Stromerzeugung im Rotorspalt-Steuermodule vorhanden sein. Dieses Mittel kann, wie in Fig. 3 dargestellt, in Form einer Spule ausgebildet sein, die über ein von außen angelegtes Magnetfeld Energie erzeugt.

[0091] Die Steuereinheit 20 weist ferner einen Datenbus 23 auf, der an die Gehäuseaußenseite 7 geführt ist, so dass über den Bus eine Verbindung mit externen Steuerelementen sowie mit anderen Rotorspalt-Steuermodule stattfinden kann. Die Datenleitungen 21 und 22 sowie der Datenbus 23 können auch Teil eines durchgängigen Datenbusses sein, der alle Komponenten des Rotorblatt-Steuermodule miteinander verbindet. Die Energiequelle, die Aktuatoreinheit mit den Mikroventilen, die Steuereinheit 19 und die Sensoreinheit 20 können alle Elemente eines als einstückiges Mikrosystem aufgebauten Rotorspalt-Steuermodule darstellen und innerhalb eines einzigen Fertigungsschrittes im wesentlichen gleichzeitig aufgebaut werden.

[0092] Der Datenbus kann auch als eine Funkübertragungsstrecke (nicht gezeigt) ausgebildet sein, bei der die Daten berührungsfrei in Form elektromagnetischer Wellen an eine Empfangsstation weitergegeben werden. In diesem Fall ist eine Sendeeinheit in die Steuereinheit integriert. Um einen bidirektionalen Datenfluss über die Funkübertragungsstrecke zu ermöglichen, ist die Steuereinheit 20 mit einem Funkempfänger versehen.

[0093] In Fig. 4 ist ein weiteres Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Rotorspalt-Steuermodule in einem Axialschnitt dargestellt.

[0094] Im Folgenden wird der Einfachheit halber lediglich auf die Unterschiede zum ersten Ausführungsbeispiel, wie es beispielsweise in Fig. 3 dargestellt ist, ein-

gegangen. Dabei werden für die gleichen Bauelemente wie bei den vorherigen Ausführungsbeispielen die gleichen Bezugszeichen verwendet.

[0095] Im Unterschied zum ersten Ausführungsbeispiel weist das Rotorspalt-Steuermodule 6 der Fig. 4 zwei Druckkammern 24, 25 auf, wobei die eine Druckkammer 24 eine mit einem Druck P_1 beaufschlagte Überdruckkammer und die Kammer 25 eine mit einem Unterdruck P_2 beaufschlagte Unterdruckkammer ist. Der Druck P_1 ist größer als der Druck P_R im Bereich des Rotorspalts. Der Druck P_2 ist kleiner als der Druck P_R . Beim Ausführungsbeispiel der Fig. 4 sind die Überdruckkammer 24 und die Unterdruckkammer 25 jeweils mit zwei Mikroventilen 13 mit der Aktuatoreinheit 10 verbunden. Durch das Vorsehen von zwei Ventilen ist ein schneller Druckausgleich zwischen jeweils der Aktuatoreinheit 10 und der Unter- oder Überdruckkammer 24, 25 möglich.

[0096] Die Überdruckkammer 24 ist mit einem Bereich der Strömungsmaschine verbunden, in dem beim Betrieb der Strömungsmaschine ein höherer Druck als im Bereich des Rotorspaltes herrscht. Die Unterdruckkammer 25 dagegen ist mit einem Bereich der Strömungsmaschine verbunden, der beim normalen Betrieb der Strömungsmaschine mit einem niedrigeren Druck als dem Druck im Bereich des Rotorspalts beaufschlagt ist.

[0097] Unabhängig vom Aufbau mit den beiden Druckkammern ist in der Fig. 4 eine weitere Möglichkeit der Energieerzeugung innerhalb des Rotorspalt-Steuermodule dargestellt:

[0098] Die Überdruckkammer 24 ist über eine Mikroturbine 30, die ebenfalls in Mikrostrukturtechnik ausgeführt sein kann, mit der Unterdruckkammer 25 verbunden. Durch die Mikroturbine 30 findet eine stetige Ausgleichsströmung zwischen der Überdruckkammer 24 und der Unterdruckkammer 25 statt, welche die Mikroturbine antreibt und zur Erzeugung von Energie für die Steuereinheit 19, die Sensoreinheit 20 und die Mikroventile 13 beiträgt oder die Energieversorgung des Rotorspalt-Steuermodule alleine bewerkstelligt. Zur Energieerzeugung kann die Mikroturbine 30 mit einem magnetischen Rotor 31 versehen sein, der über eine Spule 32 Strom erzeugt. Dieser Aspekt der Energieerzeugung ist auch unabhängig von der Verwendung des Rotorspalt-Steuermodule 6 vorteilhaft.

[0099] Die Ausgleichsströmung durch die Mikroturbine 30 hindurch ist so gering, dass der Wirkungsgrad der Strömungsmaschine nicht beeinflusst wird.

[0100] In Fig. 5 ist ein drittes Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Rotorspalt-Steuermodule gezeigt. Es wird der Einfachheit halber wiederum nur auf die Unterschiede zu den vorangegangenen Ausführungsbeispielen eingegangen, wobei für gleiche Bauelemente die gleichen Bezugszeichen wie bei den obigen Ausführungsbeispielen verwendet werden.

[0101] Ein erster Unterschied des dritten Ausführungsbeispiels zu den vorangegangenen Ausführungsbeispielen besteht darin, dass mehrere Dichtelemente 8 jeweils von einem Hüllkörper 35 umgeben sind, der aus einem

abriebfesten Material besteht. Der Hüllkörper 35 schützt die Dichtelemente 8 vor einer Berührung mit der Rotorblattspitze 12. Unabhängig vom Hüllkörper 35 besteht ein weiterer Unterschied des dritten Ausführungsbeispiels zu den vorangegangenen Ausführungsbeispielen in der Anordnung der Druckkammern 24, 25.

[0102] Da die Überdruckkammer 25 meist mit einem wärmeren Fluid als die Unterdruckkammer 24 beaufschlagt ist, wird durch die Anordnung der Überdruckkammer 25 innerhalb der Unterdruckkammer 24 ein Temperatureausgleich erzielt.

[0103] Die Unterdruckkammer 24 umgibt zumindest abschnittsweise die Überdruckkammer 25, so dass das Rotorspalt-Steuermodul nicht überhitzt. Das Rotorspalt-Steuermodul 6 der Fig. 5 weist außerdem kein Gehäuse 7 auf, sondern ist als Mikrostrukturblock bereits in der entsprechenden standardisierten Form aufgebaut.

[0104] Im Folgenden wird die Funktion des erfindungsgemäßen Rotorspalt-Steuermoduls anhand des Ausführungsbeispiels, wie es in Fig. 2 dargestellt ist, beschrieben:

[0105] Der Spaltsensor der Sensoreinheit 19 misst die Größe des Rotorspalts zwischen der Rotorspaltspitze 12 und den Dichtelementen 8 und leitet den Messwert über die Datenleitung 21 an die Steuereinheit 19 weiter. Die Steuereinheit 19 vergleicht diesen Messwert mit einprogrammierten Schwellenwerten und gibt in Abhängigkeit von diesem Vergleich ein Ausgangssignal über die Datenleitung 22 an die Aktuatereinheit mit den Mikroventilen 13 aus. Die Schwellenwerte können in der Steuereinheit 19 fest abgelegt sein, oder aber über den Datenbus 23 in Abhängigkeit von der Betriebsdauer ständig aktualisiert werden.

[0106] Verringert sich der Rotorspalt unter einen vorgegebenen unteren Schwellenwert, so bedeutet dies, dass der Rotorspalt zu klein ist und demzufolge die Dichtelemente 8 aus dem Rotorspalt hinausbewegt werden müssen. Hierzu sendet die Steuereinheit 19 Signale an die Mikroventile 13 aus, die die Unterdruckkammer 24 mit der Aktuatorkammer 10 verbinden. Die Luft strömt aus der Aktuatorkammer heraus, da sich der Druck in der Kammer absenkt. Die Membran des Dichtelements 8 zieht sich zusammen, so dass sich der Rotorspalt S vergrößert. Zu einer feineren Regelung können auch mehrere Schwellenwerte in der Steuereinheit 19 abgelegt sein, die in einer Weiterbildung in Abhängigkeit von den in der Strömungsmaschine gerade vorherrschenden Betriebsparametern zur Einstellung des für diese Betriebsparameter optimalen Rotorspalts verwendet werden.

[0107] Die Sensoreinheit 20 überwacht permanent den Druck in der Aktuatorkammer und die Größe des Rotorspalts. Wird beim Vergleich durch die Steuereinheit 19 festgestellt, dass die vorgegebene Rotorspaltbreite erreicht wird, so wird das geöffnete Mikroventil 13 wieder geschlossen und der Druck in der Aktuatorkammer konstant gehalten.

[0108] Liegt dagegen der vom Spaltsensor gemessene

ne Wert des Rotorspalts oberhalb eines vorgegebenen Schwellenwert, so bedeutet dies, dass der Rotorspalt S zu groß ist. Folglich öffnet die Steuereinheit 19 die Mikroventile 13, welche die Aktuatorkammer 10 mit der Überdruckkammer 25 verbinden. Dadurch erhöht sich der Druck in der Aktuatorkammer 10, und die Membranen der Dichtelemente weiten sich unter dem Druckeinfluss und bilden eine Dichtblase. Die Dichtelemente dehnen sich in Richtung des Rotorspaltes aus und verkleinern den Spalt. Wenn der gemessene Wert des Rotorspalts wieder innerhalb der beiden Schwellenwerte liegt, wird das offene Ventil wieder geschlossen.

[0109] Der obere Schwellenwert kann beispielsweise im Bereich zwischen 0,3 und 2 mm, der untere Schwellenwert im Bereich zwischen 0,1 und 0,7 mm liegen.

[0110] Über die Überwachung des Drucks in der Aktuatorkammer 10 kann ein Fehlersignal über die Steuereinheit 19 ausgegeben werden. Stimmt der Druck der Aktuatorkammer 10 stets mit dem Druck P_R im Bereich des Rotors überein, so liegt eine Undichtigkeit vor und das Element muss ausgetauscht werden.

[0111] Durch dieses Verfahren regelt das Rotorspalt-Steuermodul die Größe des Rotorspalts S automatisch bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen auf einen optimalen Wert. Die Logik in der Steuereinheit 19 ist vorzugsweise auf einfache Vergleichsarithmetik beschränkt, so dass die Steuereinheit einfach aufgebaut und die Steueralgorithmen schnell ausführbar sind.

[0112] Durch die Integration von Steuereinheit, Sensoreinheit und Energiequelle im Rotorspalt-Steuermodul wird eine vollkommen autarke Regelung des Rotorspalts durch ein austauschbares Modul erreicht.

[0113] Diese Funktionalität wird ergänzt durch die Möglichkeit der Überwachung von Bauteilen der Strömungsmaschine durch weitere Sensoren, wie beispielsweise dem Schwingungssensor. Dadurch kann zum einen der Betriebszustand der Strömungsmaschine während des Betriebs überwacht werden, um rechtzeitig vor Ausfällen von Bauteilen zu warnen oder um auf fällige Wartungsarbeiten hinzuweisen. Zum anderen kann bei dieser Weiterbildung auch über eine Auswertung der Ergebnisse der Betrieb der Strömungsmaschine optimiert werden.

[0114] Durch Datenleitungen sind mehrere Rotorspalt-Module miteinander vernetzbar, so dass auch eine synchronisierte Betätigung mehrerer Rotorspalt-Steuermodule erreicht wird und die Daten eines einzelnen Rotorspalt-Steuermoduls weiteren Modulen zur Verfeinerung der Steuerung zur Verfügung gestellt werden können.

[0115] Die einfache Steuerungslogik und die kleinen bewegten Massen der erfindungsgemäßen Rotorspalt-Steuermodule ermöglichen ein Ansprechverhalten, das im Bereich der Blattfrequenz des Rotors liegt, so dass es möglich ist, den Rotorspalt an einzelne Rotorblätter anzupassen.

[0116] In den Figuren 6 und 7 ist eine weitere Anwendungsmöglichkeit der Rotorspalt-Steuermodule in einer

der obigen Ausgestaltungen als Wellendichtmodul gezeigt.

[0117] Fig. 6 zeigt einen Axialschnitt durch die Welle und die Dichtmodule.

[0118] Wie beim Rotorspalt-Steuermodul, so können auch bei der Verwendung als Wellendichtmodul mehrere Reihen von Rotorspalt-Steuermodulen hintereinander angeordnet werden. Der einzige Unterschied zum Rotorspalt-Steuermodul besteht darin, dass die Gegendichtfläche bei dieser Anwendung im wesentlichen durchgängig ist.

[0119] Durch die gestaffelte Anordnung der Dichtelemente 8 ist eine gute Abdichtung gegen die Weitenoberfläche 40 erreichbar.

[0120] Um eine Abdichtung auch im Übergangsbereich zwischen zwei In. Umfangsrichtung aufeinanderfolgenden Dichtmodulen zu erreichen, sind die Dichtmodule gestaffelt angeordnet, so dass jeweils ein Dichtelement 8" der einen Reihe in den Bereich zwischen zwei Dichtmodulen 6 einer anderen Reihe fallen.

[0121] Wird ein abriebfestes Material für die Dichtelemente 8 verwendet, so können die Dichtelemente 8 die Wellenoberfläche 40 auch direkt berühren. Durch den Aufbiasdruck in der Membran wird auf diese Weise die Anpresskraft der Dichtelemente auf die Gegendichtfläche geregelt.

[0122] In Fig. 7 ist ein Wellendichtmodul mit dem Aufbau des Rotorspalt-Steuermoduls der Fig. 5 In einem Axialschnitt entlang der Linie VII-VII der Fig. 6 gezeigt.

[0123] Wie In Fig. 7 zu erkennen ist, bildet die Welle einen Dichtabsatz 41 aus, an dem zwei Reihen von zu einem Ring zusammengeschlossenen Dichtmodulen ausgebildet sind, die analog zu einem Rotorspalt-Steuermodul ausgebildet sind. Auch hier besteht die Dichtfläche aus einer Vielzahl von diskreten Flächen und beruht die Dichtwirkung auf einer Erhöhung des Strömungswiderstandes bei einer Bewegung von Fluidteilchen durch die Dichtelemente hindurch.

[0124] Das schnelle Ansprechverhalten der Dichtmodule erlaubt eine gute Abdichtung auch bei einer Exzentrizität oder bei Biegeschwingungen der Welle, da die Dichtelemente, wie oben am Beispiel der Rotorspaltsteuerung ausgeführt, sofort auf eine Bewegung der Welle und damit einer Änderung des Dichtungsspalt reagieren.

Patentansprüche

1. Rotorspalt Steuermodul (6) zum Einbau In eine von einem Fluid in einer Hauptströmungsrichtung (H) durchströmte Strömungsmaschine (1), welche einen drehbaren Rotor (R) mit In Drehrichtung (D) des Rotors zueinander vorbestimmt beabstandete Rotorblätter (5) und ein den Rotor unter Ausbildung eines Rotorspaltes (S) zumindest abschnittsweise umgebendes Gehäuse (G) aufweist, wobei das Rotorspalt-Steuermodul wenigstens ein den Rotorspalt

abschnittsweise begrenzendes und in den Rotorspalt hineinbewegliches Dichtelement (8) und eine im Betrieb das Dichtelement bewegende Aktuator-einheit (10, 13, 14, 15) umfasst, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Abmessung des wenigstens einen Dichtelements (8) in Drehrichtung (D) des Rotors (R) kleiner als der Abstand (T) zweier aufeinanderfolgender Rotorblätter (5) ist.

2. Rotorspalt Steuermodul nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Abmessung des wenigstens einen Dichtelements (8) In Hauptströmungsrichtung (H) des Rotors (R) kleiner als die Schaufeltiefe (C) eines Rotorblattes (5) in Hauptströmungsrichtung (H) ist.

3. Rotorspalt Steuermodul nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Rotorspalt Steuermodul in Hauptströmungsrichtung (H) des Rotors wenigstens zwei Dichtelemente (8) hintereinander aufweist, die sich in Drehrichtung (D) des Rotors (R) zumindest abschnittsweise überlappen.

4. Rotorspalt Steuermodul nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Rotorspalt Steuermodul (6) ein Gehäuse (7) aufweist, in dem die Aktuatoreinheit aufgenommen Ist und dessen Abmessung in Drehrichtung kleiner als der Abstand zweier aufeinanderfolgender Rotorblätter ist.

5. Rotorspalt Steuermodul nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Rotorspalt Steuermodul (6) ein Gehäuse (7) aufweist, in dem die Aktuatoreinheit aufgenommen Ist und dessen Abmessung in Hauptströmungsrichtung größer als die Schaufeltiefe eines Rotorblattes In Hauptströmungsrichtung ist.

6. Rotorspalt-Steuermodul nach Anspruch 4 oder 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Gehäuse eine den Rotorblattspitzen (12) gegenüberliegende Fläche (16) ausbildet, in der das wenigstens eine Dichtelement (8) angeordnet Ist.

7. Rotorspalt-Steuermodul nach einem der oben genannten Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Rotorspalt-Steuermodul ein Feld von Dichtelementen aufweist.

8. Rotorspalt-Steuermodul nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Dichtelemente in der Dichtstellung voneinander beabstandet sind und ein Labyrinth mit erhöhtem Strömungswiderstand bilden.

9. Rotorspalt-Steuermodul nach einem der oben genannten Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,**

- dass** die Aktuatoreinheit (10, 13, 14, 15) als eine pneumatische Verstelleinheit mit wenigstens einer mit einem Fluiddruck beaufschlagbaren Aktuator-
kammer (10) versehen ist, wobei der Fluiddruck in
der Aktuator-
kammer mittelbar oder unmittelbar auf
das wenigstens eine Dichtelement (8) einwirkt. 5
10. Rotorspalt-Steuermodul nach einem der oben ge-
nannten Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**
dass das wenigstens eine Dichtelement eine elasti-
sche Membran umfasst, die in einer Dichtstellung in
den Rotorspalt (S) vorgewölbt ist. 10
11. Rotorspalt-Steuermodul nach Anspruch 9 und 10,
dadurch gekennzeichnet, dass die Membran mit
der Aktuator-
kammer druckübertragend verbunden
ist. 15
12. Rotorspalt-Steuermodul nach Anspruch 10 oder 11,
dadurch gekennzeichnet, dass die Membran aus
Silizium oder aus einem siliziumhaltigen Werkstoff
gefertigt ist. 20
13. Rotorspalt-Steuermodul nach Anspruch 9, **dadurch**
gekennzeichnet, dass die Aktuatoreinheit wenig-
stens eine Überdruckkammer (14) aufweist, die im
Betrieb mit einem Druck (P_1) beaufschlagt, ist, der
größer als der Druck (P_R) im Bereich des Rotors ist,
und die über wenigstens ein Ventil (13) mit der Ak-
tuator-
kammer verbunden ist. 25
14. Rotorspalt-Steuermodul nach Anspruch 9 oder 13,
dadurch gekennzeichnet, dass die Aktuator-
einheit wenigstens eine Unterdruckkammer (15) auf-
weist, die im Betrieb mit einem Druck (P_2) beauf-
schlagt, ist, der kleiner als der Druck (P_R) im Bereich
des Rotors ist, und die über wenigstens ein Ventil
(13) mit der Aktuator-
kammer verbunden ist. 30
15. Rotorspalt-Steuermodul nach Anspruch 13 und 14,
dadurch gekennzeichnet, dass die Überdruck-
kammer (14) zumindest abschnittsweise von der Un-
terdruckkammer (15) umgeben ist. 35
16. Rotorspalt-Steuermodul nach Anspruch 13 oder 14,
dadurch gekennzeichnet, dass das Ventil als ein
aus Silizium oder siliziumhaltigen Werkstoff gefer-
tigtes Mikroventil (13) ausgestaltet ist. 40
17. Rotorspalt-Steuermodul nach einem der oben ge-
nannten Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,**
dass die Aktuatoreinheit eine elektronische Ein-
gangsschnittstelle aufweist, über die im Betrieb Si-
gnale zur Verstellung des wenigstens einen Dicht-
elements (8) an die Aktuatoreinheit geleitet sind. 45
18. Rotorspalt-Steuermodul nach einem der oben ge-
nannten Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,**
- dass** im Rotorspalt-Steuermodul ein Mittel zur
Stromerzeugung (30, 32) vorgesehen ist, durch das
im Betrieb elektrische Energie zum Betrieb des Ro-
torspalt-Steuermoduls erzeugbar ist.
19. Rotorspalt-Steuermodul nach Anspruch 18, **da-**
durch gekennzeichnet, dass das Mittel zur Strom-
erzeugung als eine Mikroturbine (30) ausgebildet ist,
die zwischen der wenigstens einen Überdruckkam-
mer und der wenigstens einen Unterdruckkammer
angeordnet ist.
20. Rotorspalt-Steuermodul nach Anspruch 18, **da-**
durch gekennzeichnet, dass das Mittel zur Strom-
erzeugung eine im Betrieb von außerhalb des Ro-
torspalt-Steuermoduls erregte Spule (32) ausgebil-
det ist.
21. Rotorspalt-Steuermodul nach einem der oben ge-
nannten Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,**
dass eine Sensoreinheit (20) mit wenigstens einem
Spaltmesssensor vorgesehen ist, wobei durch den
Spaltmesssensor im Betrieb die Größe des Rotor-
spalts erfassbar und ein für die Größe des Rotor-
spaltes repräsentatives Signal ausgebbar ist.
22. Rotorspalt-Steuermodul nach einem der oben ge-
nannten Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,**
dass eine Sensoreinheit (20) mit wenigstens einem
Drucksensor vorgesehen ist, wobei durch den
Drucksensor im Betrieb der Druck im Bereich des
Rotors und/oder der Druck in der Aktuator-
kammer erfassbar und ein für die Größe des Druckes im Be-
reich des Rotors und/oder in der Aktuator-
kammer repräsentatives Signal ausgebbar ist. 50
23. Rotorspalt-Steuermodul nach einem der oben ge-
nannten Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,**
dass eine Sensoreinheit mit wenigstens einem La-
geerfassungssensor vorgesehen ist, durch den im
Betrieb die Lage des wenigstens einen Dichtele-
ments im Rotorspalt erfassbar und ein die Lage des
Dichtelements im Rotorspalt repräsentierendes Si-
gnal ausgebbar ist.
24. Rotorspalt-Steuermodul nach einem der oben ge-
nannten Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,**
dass eine Sensoreinheit mit wenigstens einem
Schwingungssensor vorgesehen ist, durch den im
Betrieb die Schwingungsamplitude und/oder die
Schwingungsfrequenz eines Rotorblattes (R) er-
fassbar und ein die Schwingungsamplitude und/oder
die Schwingungsfrequenz repräsentierendes Signal
ausgebbar ist.
25. Rotorspalt-Steuermodul nach einem der oben ge-
nannten Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,**
dass eine Steuereinheit (19) mit einer Eingangs-

- sehnittstelle und einer Ausgangsschnittstelle vorgesehen ist, wobei im Betrieb die Eingangsschnittstelle datenübertragend mit einer Ausgangsschnittstelle einer Sensoreinheit mit Sensoren zur Erfassung von Betriebsparametern der Strömungsmaschine und die Ausgangsschnittstelle mit einer Eingangsschnittstelle der Aktuatoreinheit zur Betätigung des wenigstens einen Dichtelements verbunden ist.
26. Rotorspalt-Steuermodul nach Anspruch 25, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Steuereinheit (19) einen Datenbus (23) mit einem Anschluss aufweist, wobei über den Anschluss externe Geräte datenübertragend an den Datenbus anschließbar sind.
27. Rotorspalt-Steuermodul nach Anspruch 25, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Steuereinheit (19) einen als Funkstrecke ausgestalteten Datenbus aufweist und die Eingangsschnittstelle einen Funkempfänger und/oder die Ausgangsschnittstelle einen Funksender umfasst.
28. Rotorspalt-Steuermodul nach einem der oben genannten Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Rotorspalt-Steuermodul in Mikrostrukturtechnik aufgebaut ist.
29. Rotorspalt-Steuermodul nach Anspruch 28, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Steuereinheit einstückig in das Rotorspalt-Steuermodul integriert ist.
30. Rotorspalt-Steuermodul nach Anspruch 28 oder 29, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Mittel zur Energieerzeugung einstückig in das Rotorspalt-Steuermodul integriert ist.
31. Rotorspalt-Steuermodul nach einem der Ansprüche 28 bis 30, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Mikroventil einstückig in das Rotorspalt-Steuermodul integriert ist.
32. Rotorspalt-Steuermodul nach einem der Ansprüche 28 bis 31, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Sensoreinheit einstückig in das Rotorspalt-Steuermodul integriert ist.
33. Rotorspalt-Steuermodul nach einem der Ansprüche 28 bis 32, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Rotorspalt-Steuermodul im wesentlichen aus Silizium oder einem siliziumhaltigen Werkstoff aufgebaut ist.
34. Rotorspalt-Steuermodul nach einem der oben genannten Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** am Rotorspalt-Steuermodul zwischen dem Dichtelement und dem Rotorspalt ein Hüllkörper angeordnet ist, der eine Mehrzahl von Dichtelementen umgibt.
35. Rotorspalt-Steuermodul nach Anspruch 34, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Hüllkörper als eine im wesentlichen elastische Membran ausgebildet ist.
36. Strömungsmaschine (1) mit einem drehbaren Rotor (R), mit einem den Rotor unter Ausbildung eines Rotorspaltes (S) umgebenden Gehäuse (G) und mit einem Rotorspalt-Steuermodul (6), **dadurch gekennzeichnet, dass** das Rotorspalt-Steuermodul (6) nach einem der oben genannten Ansprüche aufgebaut und im Bereich des Rotorspaltes angeordnet ist.
37. Strömungsmaschine nach Anspruch 36, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine Vielzahl von Rotorspalt Steuermodulen (6) vorgesehen sind, die zu einem den Rotorspalt umgebenden Ring zusammengeslossen sind, wobei die Dichtelemente (6) ein Feld von diskreten, voneinander beabstandeten Dichtflächen ausbilden.
38. Strömungsmaschine nach Anspruch 37, **dadurch gekennzeichnet, dass** zwei Ringe aus Rotorspalt-Steuermodulen (6) gebildet sind, die den Rotorspalt umgeben.
39. Strömungsmaschine nach Anspruch 38, **dadurch gekennzeichnet, dass** die beiden Ringe in Umfangsrichtung zueinander versetzt sind.
40. Strömungsmaschine nach einem der Ansprüche 36 bis 38, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Rotorspalt-Steuermodule des Ringes über einen Datenbus miteinander verbunden sind.
41. Verwendung des Rotorspalt-Steuermoduls nach einem der oben genannten Ansprüche zur Abdichtung einer durchgängigen Dichtfläche eines Drehkörpers.
42. Verwendung des Rotorspalt-Steuermoduls nach einem der Ansprüche 1 bis 40 zur Überwachung der Strömungsmaschine.
43. Verfahren zur Steuerung der Weite eines Rotorspaltes bei einer Strömungsmaschine, bei welcher der Rotorspalt zwischen einem sich drehenden Rotor und einem Gehäuse gebildet wird, wobei zur Verringerung des Rotorspaltes ein Dichtelement eines Rotorspalt-Steuermoduls in den Rotorspalt mittels Druckluft hineinbewegt wird, **dadurch gekennzeichnet, dass** mittels eines Spaltmessensors des Rotorspalt-Steuermoduls die momentane Größe des Rotorspaltes an einer Stelle gemessen und in Signalf orm an eine Steuereinheit weitergeleitet wird, dass die Steuereinheit in Abhängigkeit vom Signal des Spaltmessensors ein Betätigungssignal an eine dieser Stelle zugeordneten Aktuatoreinheit aus-

gibt, worauf die Aktuatoreinheit in Abhängigkeit des Signals von der Steuereinheit das Dichtelement mittels der Druckluft in den Rotorspalt hinein oder hinaus bewegt.

44. Verfahren nach Anspruch 43, **dadurch gekennzeichnet, dass** durch die Druckluft eine Membran des Dichtelements aufgeblasen wird und den Rotorspalt abschnittsweise verkleinert.
45. Verfahren nach Anspruch 43 oder 44, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Steuereinheit in Abhängigkeit vom Signal des Spaltmessensors das Dichtelement mit einem Überdruck oder einem Unterdruck beaufschlagt wird.
46. Verfahren nach einem der Ansprüche 43 bis 45, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur Einstellung des Rotorspalts ein Feld von diskreten, voneinander beabstandeten Dichtelementen bewegt wird.
47. Verfahren nach einem der Ansprüche 43 bis 46, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Dichtelement oder eine Teilmenge der Dichtelemente jeweils unabhängig voneinander angesteuert werden.
48. Verfahren nach einem der Ansprüche 43 bis 47, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Schwingungen der Rotorblätter (R) von dem Rotorspalt-Steuermodul gemessen werden.
49. Verfahren nach Anspruch 48, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Messergebnisse der Schwingungsmessung über eine Funkstrecke nach außerhalb des Rotorspalt-Steuermoduls übertragen werden.
50. Verfahren nach Anspruch 48, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Messergebnisse in der Steuereinheit bis wenigstens zum Ende des Einsatzes der Strömungsmaschine zwischengespeichert werden.

Claims

1. Rotor gap control module (6) for installation in a turbomachine (1), through which a fluid flows in a main flow direction (H) and which has a rotatable rotor (R) with rotor blades (5) spaced at a predetermined distance from one another in the direction of rotation (D) of the rotor and a casing (G) surrounding the rotor at least in sections with the formation of a rotor gap (S), the rotor gap control module comprising at least one seal element (8) limiting the rotor gap in sections and movable into the rotor gap and an actuator unit (10, 13, 14, 15) moving the seal element in operation, **characterized in that** the dimension of the at least one seal element (8) in the direction

of rotation (D) of the rotor (R) is smaller than the spacing (T) of two consecutive rotor blades (5).

2. Rotor gap control module according to claim 1, **characterized in that** the dimension of the at least one seal element (8) in the main flow direction (H) of the rotor (R) is smaller than the blade depth (C) of a rotor blade (5) in the main flow direction (H).
3. Rotor gap control module according to claim 1 or 2, **characterized in that** the rotor gap control module in the main flow direction (H) of the rotor has at least two seal elements (8) one behind the other, which overlap in the direction of rotation (D) of the rotor (R) at least in sections.
4. Rotor gap control module according to one of claims 1 to 3, **characterized in that** the rotor gap control module (6) has a casing (7), in which the actuator unit is located and the dimension of which in the direction of rotation is smaller than the spacing of two consecutive rotor blades.
5. Rotor gap control module according to one of claims 1 to 3, **characterized in that** the rotor gap control module (6) has a casing (7), in which the actuator unit is located and the dimension of which in the main flow direction is larger than the blade depth of a rotor blade in the main flow direction.
6. Rotor gap control module according to claim 4 or 5, **characterized in that** the casing forms a surface (16) lying opposite the rotor blade tips (12), in which surface the at least one seal element (8) is arranged.
7. Rotor gap control module according to one of the above claims, **characterized in that** the rotor gap control module has an array of seal elements.
8. Rotor gap control module according to claim 7, **characterized in that** the seal elements in the sealing position are spaced at a distance from one another and form a labyrinth with increased flow resistance.
9. Rotor gap control module according to one of the above claims, **characterized in that** the actuator unit (10, 13, 14, 15) is provided as a pneumatic adjusting unit with at least one actuator chamber (10) that can be acted upon by a fluid pressure, the fluid pressure in the actuator chamber acting indirectly or directly on the at least one seal element (8).
10. Rotor gap control module according to one of the above claims, **characterized in that** the at least one seal element comprises an elastic membrane, which is deflected forward into the rotor gap (S) in a sealing position.

11. Rotor gap control module according to claim 9 and 10, **characterized in that** the membrane is connected to the actuator chamber in a pressure-transferring manner.
12. Rotor gap control module according to claim 10 or 11, **characterized in that** the membrane is manufactured from silicon or a material containing silicon.
13. Rotor gap control module according to claim 9, **characterized in that** the actuator unit has at least one excess pressure chamber (14), which is acted upon in operation by a pressure (P_1) that is greater than the pressure (P_R) in the region of the rotor, and which is connected via at least one valve (13) to the actuator chamber.
14. Rotor gap control module according to claim 9 or 13, **characterized in that** the actuator unit has at least one negative pressure chamber (15), which is acted upon in operation by a pressure (P_2) that is smaller than the pressure (P_R) in the region of the rotor, and which is connected via at least one valve (13) to the actuator chamber.
15. Rotor gap control module according to claim 13 and 14, **characterized in that** the excess pressure chamber (14) is surrounded at least in sections by the negative pressure chamber (15).
16. Rotor gap control module according to claim 13 or 14, **characterized in that** the valve is formed as a microvalve (13) manufactured from silicon or material containing silicon.
17. Rotor gap control module according to one of the above claims, **characterized in that** the actuator unit has an electronic input interface, via which in operation signals for adjusting the at least one seal element (8) are routed to the actuator unit.
18. Rotor gap control module according to one of the above claims, **characterized in that** in the rotor gap control module a means for generating power (30, 32) is provided, by means of which electrical energy can be generated in operation to operate the rotor gap control module.
19. Rotor gap control module according to claim 18, **characterized in that** the means for generating power is formed as a microturbine (30), which is arranged between the at least one excess pressure chamber and the at least one negative pressure chamber.
20. Rotor gap control module according to claim 18, **characterized in that** the means for generating power is formed as a coil (32) excited in operation from outside the rotor gap control module.
21. Rotor gap control module according to one of the above claims, **characterized in that** a sensor unit (20) with at least one gap measuring sensor is provided, the size of the rotor gap being detectable in operation by the gap measuring sensor and a signal representative of the size of the rotor gap being able to be output.
22. Rotor gap control module according to one of the above claims, **characterized in that** a sensor unit (20) with at least one pressure sensor is provided, the pressure in the region of the rotor and/or the pressure in the actuator chamber being detectable by the pressure sensor in operation and a signal representative of the magnitude of the pressure in the region of the rotor and/or in the actuator chamber being able to be output.
23. Rotor gap control module according to one of the above claims, **characterized in that** a sensor unit with at least one position detection sensor is provided, by means of which the position of the at least one seal element in the rotor gap is detectable in operation and a signal representing the position of the seal element in the rotor gap is able to be output.
24. Rotor gap control module according to one of the above claims, **characterized in that** a sensor unit with at least one vibration sensor is provided, by means of which the vibration amplitude and/or the vibration frequency of a rotor blade (R) is detectable in operation and a signal representing the vibration amplitude and/or the vibration frequency is able to be output.
25. Rotor gap control module according to one of the above claims, **characterized in that** a control unit (19) with an input interface and an output interface is provided, wherein in operation the input interface is connected in a data-transferable manner to an output interface of a sensor unit with sensors for the detection of operating parameters of the turbomachine and the output interface is connected to an input interface of the actuator unit for actuation of the at least one seal element.
26. Rotor gap control module according to claim 25, **characterized in that** the control unit (19) has a data bus (23) with a connection, external appliances being connectable in a data-transferable manner via the connection to the data bus.
27. Rotor gap control module according to claim 25, **characterized in that** the control unit (19) has a data bus formed as a radio link and the input interface comprises a radio receiver and/or the output inter-

face comprises a radio transmitter.

28. Rotor gap control module according to one of the above claims, **characterized in that** the rotor gap control module is constructed in microstructure technology.
29. Rotor gap control module according to claim 28, **characterized in that** the control unit is integrated in one piece into the rotor gap control module.
30. Rotor gap control module according to claim 28 or 29, **characterized in that** the means for generating energy is integrated in one piece into the rotor gap control module.
31. Rotor gap control module according to one of claims 28 to 30, **characterized in that** the microvalve is integrated in one piece into the rotor gap control module.
32. Rotor gap control module according to one of claims 28 to 31, **characterized in that** the sensor unit is integrated in one piece into the rotor gap control module.
33. Rotor gap control module according to one of claims 28 to 32, **characterized in that** the rotor gap control module is constructed substantially from silicon or a material containing silicon.
34. Rotor gap control module according to one of the above claims, **characterized in that** an enveloping body is arranged on the rotor gap control module between the seal element and the rotor gap, which body surrounds a plurality of seal elements.
35. Rotor gap control module according to claim 34, **characterized in that** the enveloping body is formed as a substantially elastic membrane.
36. Turbomachine (1) with a rotatable rotor (R), with a casing (G) surrounding the rotor with the formation of a rotor gap (S) and with a rotor gap control module (6), **characterized in that** the rotor gap control module (6) is constructed and arranged in the region of the rotor gap according to one of the above claims.
37. Turbomachine according to claim 36, **characterized in that** a plurality of rotor gap control modules (6) are provided, which are combined to form a ring surrounding the rotor gap, the seal elements (8) forming an array of discrete sealing surfaces spaced at a distance from one another.
38. Turbomachine according to claim 37, **characterized in that** two rings of rotor gap control modules (6) are formed, which surround the rotor gap.

39. Turbomachine according to claim 38, **characterized in that** the two rings are staggered in relation to one another in a circumferential direction.

- 5 40. Turbomachine according to one of claims 36 to 38, **characterized in that** the rotor gap control modules of the ring are connected to one another via a data bus.
- 10 41. Use of the rotor gap control module according to one of the above claims to seal a uniform sealing face of a rotating body.
- 15 42. Use of the rotor gap control module according to one of claims 1 to 40 to monitor the turbomachine.
- 20 43. Method for controlling the width of a rotor gap in a turbomachine, in which the rotor gap is formed between a rotating rotor and a casing, a seal element of a rotor gap control module being moved by means of compressed air into the rotor gap to reduce the rotor gap, **characterized in that** by means of a gap-measuring sensor of the rotor gap control module the momentary size of the rotor gap is measured at a point and is routed in signal form to a control unit, that the control unit outputs an actuating signal depending on the signal of the gap measuring sensor to an actuator unit assigned to this point, whereupon the actuator unit moves the seal element by means of the compressed air into or out of the rotor gap depending on the signal from the control unit.
- 25 44. Method according to claim 43, **characterized in that** a membrane of the seal element is inflated by the compressed air and reduces the rotor gap in sections.
- 30 45. Method according to claim 43 or 44, **characterized in that** the control unit acts upon the seal element with an excess pressure or a negative pressure depending on the signal of the gap measuring sensor.
- 35 46. Method according to one of claims 43 to 45, **characterized in that** to set the rotor gap an array of discrete seal elements spaced at a distance from one another is moved.
- 40 47. Method according to one of claims 43 to 46, **characterized in that** the seal element or a partial quantity of seal elements are activated independently of one another in each case.
- 45 48. Method according to one of claims 43 to 47, **characterized in that** the vibrations of the rotor blades (R) are measured by the rotor gap control module.
- 50 49. Method according to claim 48, **characterized in that** the measuring results of the vibration measurement
- 55

are transmitted via a radio link to outside the rotor gap control module.

50. Method according to claim 48, **characterized in that** the measuring results are stored temporarily in the control unit until at least the end of the use of the turbomachine.

Revendications

1. Module de commande de jeu de rotor (6) pour montage dans une turbomachine (1) traversée par un fluide dans une direction d'écoulement principale (H), qui présente un rotor (R) pivotant avec des pales de rotor (5) disposées à distance les unes des autres de manière prédéterminée dans le sens de rotation (D) du rotor, ainsi qu'un boîtier (G) entourant le rotor du moins par segments en formant un jeu de rotor (S), le module de commande de jeu de rotor comprenant au moins un élément d'étanchéité (8) qui délimite le jeu de rotor par segments et peut être déplacé dans le jeu de rotor, ainsi qu'une unité d'actionnement (10, 13, 14, 15) pour déplacer l'élément d'étanchéité pendant le fonctionnement, **caractérisé en ce que** la dimension de l'au moins un élément d'étanchéité (8) dans le sens de rotation (D) du rotor (R) est inférieure à la distance (T) entre deux pales de rotor (5) successives.
2. Module de commande de jeu de rotor selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** la dimension de l'au moins un élément d'étanchéité (8) dans la direction d'écoulement principale (H) du rotor (R) est inférieure à la profondeur (C) d'une pale de rotor (5) dans la direction d'écoulement principale (H).
3. Module de commande de jeu de rotor selon la revendication 1 ou 2, **caractérisé en ce que** le module de commande de jeu de rotor dans la direction d'écoulement principal (H) du rotor présente au moins deux éléments d'étanchéité (8) successifs qui, dans le sens de rotation (D) du rotor (R), se chevauchent du moins partiellement.
4. Module de commande de jeu de rotor selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, **caractérisé en ce que** le module de commande de jeu de rotor (6) présente un boîtier (7) qui loge l'unité d'actionnement et dont la dimension, dans le sens de rotation, est inférieure à la distance entre deux pales de rotor successives.
5. Module de commande de jeu de rotor selon l'une

quelconque des revendications 1 à 3,

caractérisé en ce que

le module de commande de jeu de rotor (6) présente un boîtier (7) qui loge l'unité d'actionnement et dont la dimension dans la direction d'écoulement principale est supérieure à la profondeur d'une pale de rotor dans la direction d'écoulement principale.

6. Module de commande de jeu de rotor selon la revendication 4 ou 5, **caractérisé en ce que** le boîtier présente une surface (16) située en regard des pointes de pales de rotor (12) dans laquelle est disposé l'au moins un élément d'étanchéité (8).
7. Module de commande de jeu de rotor selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le module de commande de jeu de rotor présente un champ d'éléments d'étanchéité.
8. Module de commande de jeu de rotor selon la revendication 7, **caractérisé en ce que** les éléments d'étanchéité sont disposés à distances les uns des autres dans la position d'étanchéité et forment un labyrinthe avec une résistance à l'écoulement augmentée.
9. Module de commande de jeu de rotor selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** l'unité d'actionnement (10, 13, 14, 15) en tant qu'unité de réglage pneumatique présente au moins une chambre d'actionneur (10) alimentée en une pression de fluide, la pression de fluide dans la chambre d'actionneur agissant indirectement ou directement sur l'au moins un élément d'étanchéité (8).
10. Module de commande de jeu de rotor selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** l'au moins un élément d'étanchéité comprend une membrane élastique qui dans une position d'étanchéité est bombée dans le jeu de rotor (S).
11. Module de commande de jeu de rotor selon les revendications 9 et 10, **caractérisé en ce que** la membrane est reliée à la chambre d'actionneur pour transmettre la pression.
12. Module de commande de jeu de rotor selon la revendication 10 ou 11, **caractérisé en ce que** la membrane est réalisée en silicium ou un matériau à base de silicium.

13. Module de commande de jeu de rotor selon la revendication 9,
caractérisé en ce que
 l'unité d'actionnement présente au moins une chambre de surpression (14) qui, lors du fonctionnement, est sollicitée par une pression (P_1) qui est supérieure à la pression (P_R) dans la zone du rotor et reliée par au moins une soupape (13) à la chambre d'actionneur.
14. Module de commande de jeu de rotor selon la revendication 9 ou 13,
caractérisé en ce que
 l'unité d'actionnement présente au moins une chambre de dépression (15) qui, lors du fonctionnement, est sollicitée par une pression (P_2) qui est inférieure à la pression (P_R) dans la zone du rotor et reliée par au moins une soupape (13) à la chambre d'actionneur.
15. Module de commande de jeu de rotor selon les revendications 13 et 14,
caractérisé en ce que
 la chambre de surpression (14) est entourée du moins par segment par la chambre de dépression (15).
16. Module de commande de jeu de rotor selon la revendication 13 ou 14,
caractérisé en ce que
 la soupape est une microsoupape (13) en silicium ou en matériau à base de silicium.
17. Module de commande de jeu de rotor selon l'une quelconque des revendications précédentes,
caractérisé en ce que
 l'unité d'actionnement présente une interface d'entrée électronique par laquelle sont transmis à l'unité d'actionnement, pendant le fonctionnement, des signaux pour régler l'au moins un élément d'étanchéité (8).
18. Module de commande de jeu de rotor selon l'une quelconque des revendications précédentes,
caractérisé en ce que
 le module de commande de jeu de rotor est muni d'un moyen de génération de courant (30, 32) permettant de générer, pendant le fonctionnement, de l'énergie électrique pour faire fonctionner le module de commande de jeu de rotor.
19. Module de commande de jeu de rotor selon la revendication 18,
caractérisé en ce que
 le moyen de génération de courant est une micro-turbine (30) disposée entre l'au moins une chambre de surpression et l'au moins une chambre de dépression.
20. Module de commande de jeu de rotor selon la revendication 18,
caractérisé en ce que
 le moyen de génération de courant est une bobine (32) excitée pendant le fonctionnement depuis l'extérieur du module de commande de jeu de rotor.
21. Module de commande de jeu de rotor selon l'une quelconque des revendications précédentes,
caractérisé en ce qu'
 une unité de capteurs (20) avec au moins un capteur de mesure du jeu est prévue, le capteur de mesure du jeu pouvant détecter pendant le fonctionnement la grandeur du jeu de rotor et émettre un signal représentant la grandeur du jeu de rotor.
22. Module de commande de jeu de rotor selon l'une quelconque des revendications précédentes,
caractérisé en ce qu'
 une unité de capteurs (20) avec au moins un capteur de pression est prévue, le capteur de pression pouvant détecter pendant le fonctionnement la pression dans la zone du rotor et/ou la pression dans la chambre d'actionneur et émettre un signal représentant la grandeur de la pression dans la zone du rotor et/ou dans la chambre d'actionneur.
23. Module de commande de jeu de rotor selon l'une quelconque des revendications précédentes,
caractérisé en ce qu'
 une unité de capteurs avec au moins un détecteur de position est prévue qui pendant le fonctionnement peut détecter la position de l'au moins un élément d'étanchéité dans le jeu de rotor et émettre un signal représentant la position de l'élément d'étanchéité dans le jeu de rotor.
24. Module de commande de jeu de rotor selon l'une quelconque des revendications précédentes,
caractérisé en ce qu'
 une unité de capteurs est prévue avec au moins un capteur d'oscillations qui, pendant le fonctionnement, peut détecter l'amplitude d'oscillation et/ou la fréquence d'oscillation d'une pale de rotor (R) et émettre un signal représentant l'amplitude d'oscillation et/ou la fréquence d'oscillation.
25. Module de commande de jeu de rotor selon l'une quelconque des revendications précédentes,
caractérisé en ce qu'
 une unité de commande (19) est munie d'une interface d'entrée et d'une interface de sortie, l'interface d'entrée étant reliée pendant le fonctionnement pour transmettre des données à une interface de sortie d'une unité de capteurs comprenant des capteurs pour détecter des paramètres de fonctionnement de la turbomachine, et l'interface de sortie étant reliée à une interface d'entrée de l'unité d'actionnement

pour actionner l'au moins un élément d'étanchéité.

26. Module de commande de jeu de rotor selon la revendication 25,

caractérisé en ce que

l'unité de commande (19) présente un bus de données (23) avec un raccord permettant de connecter des appareils extérieurs au bus de données pour la transmission de données.

27. Module de commande de jeu de rotor selon la revendication 25,

caractérisé en ce que

l'unité de commande (19) présente un bus de données en forme d'un trajet radio et l'interface d'entrée comprend un récepteur radio et/ou l'interface de sortie un émetteur radio.

28. Module de commande de jeu de rotor selon l'une quelconque des revendications précédentes,

caractérisé en ce que

le module de commande de jeu de rotor est monté selon la technique des microstructures.

29. Module de commande de jeu de rotor selon la revendication 28,

caractérisé en ce que

l'unité de commande est intégrée d'une seule pièce dans le module de commande de jeu de rotor.

30. Module de commande de jeu de rotor selon la revendication 28 ou 29,

caractérisé en ce que

le moyen de génération d'énergie est intégré d'une seule pièce dans le module de commande de jeu de rotor.

31. Module de commande de jeu de rotor selon l'une quelconque des revendications 28 à 30,

caractérisé en ce que

la microsoupape est intégrée d'une seule pièce dans le module de commande de jeu de rotor.

32. Module de commande de jeu de rotor selon l'une quelconque des revendications 28 à 31,

caractérisé en ce que

l'unité de capteurs est intégrée d'une seule pièce dans le module de commande de jeu de rotor.

33. Module de commande de jeu de rotor selon l'une quelconque des revendications 28 à 32,

caractérisé en ce que

le module de commande de jeu de rotor est pour l'essentiel réalisé en silicium ou un matériau à base de silicium.

34. Module de commande de jeu de rotor selon l'une quelconque des revendications précédentes,

caractérisé en ce que

un dôme qui entoure une multitude d'éléments d'étanchéité est disposé sur le module de commande de jeu de rotor, entre l'élément d'étanchéité et le jeu de rotor.

35. Module de commande de jeu de rotor selon la revendication 34,

caractérisé en ce que

le dôme est conçu comme une membrane essentiellement élastique.

36. Turbomachine (1) comprenant un rotor (R) pivotant, un boîtier (G) entourant le rotor en formant un jeu de rotor (S) et un module de commande de jeu de rotor (6),

caractérisée en ce que

le module de commande de jeu de rotor (6) est construit selon l'une quelconque des revendications précédentes et disposé dans la zone du jeu de rotor.

37. Turbomachine selon la revendication 36,

caractérisée en ce qu'

une multitude de modules de commande du jeu de rotor (6) est prévue, ceux-ci étant regroupés en un anneau entourant le jeu de rotor, les éléments d'étanchéité (6) formant un champ de surfaces d'étanchéité discrètes disposées à distance les unes des autres.

38. Turbomachine selon la revendication 37,

caractérisée en ce que

deux anneaux de modules de commande du jeu de rotor (6) sont formés et entourent le jeu de rotor.

39. Turbomachine selon la revendication 38,

caractérisée en ce que

les deux anneaux sont décalés l'un par rapport à l'autre dans la direction périphérique.

40. Turbomachine selon l'une quelconque des revendications 36 à 38,

caractérisée en ce que

les modules de commande du jeu de rotor de l'anneau sont reliés les uns aux autres par un bus de données.

41. Utilisation du module de commande de jeu de rotor selon l'une quelconque des revendications précédentes, pour étancher une surface d'étanchéité continue d'un corps rotatif.

42. Utilisation du module de commande de jeu de rotor selon l'une quelconque des revendications 1 à 40, pour surveiller la turbomachine.

43. Procédé de commande de la largeur d'un jeu de rotor pour une turbomachine dans laquelle le jeu de rotor

est formé entre un rotor en rotation et un boîtier, selon lequel un élément d'étanchéité d'un module de commande de jeu de rotor est introduit dans le jeu de rotor au moyen d'air comprimé pour réduire le jeu de rotor,

5

caractérisé en ce qu'

un capteur de mesure du jeu du module de commande de jeu de rotor mesure à un endroit la grandeur momentanée du jeu de rotor et la transmet sous la forme d'un signal à une unité de commande, et l'unité de commande émet un signal d'actionnement en fonction du signal du capteur de mesure du jeu vers une unité d'actionnement associée à cet endroit, suite à quoi l'unité d'actionnement déplace l'élément d'étanchéité au moyen de l'air comprimé dans ou hors du jeu de rotor en fonction du signal provenant de l'unité de commande.

10

15

44. Procédé selon la revendication 43,

caractérisé en ce qu'

20

une membrane de l'élément d'étanchéité est gonflée par l'air comprimé et réduit le jeu de rotor par segment.

45. Procédé selon la revendication 43 ou 44,

25

caractérisé en ce que

l'unité de commande sollicite l'élément d'étanchéité par surpression ou par dépression en fonction du signal du capteur de mesure du jeu.

30

46. Procédé selon l'une quelconque des revendications 43 à 45,

caractérisé en ce qu'

un champ d'éléments d'étanchéité discrets disposé à distances les uns des autres est déplacé pour régler le jeu de rotor.

35

47. Procédé selon l'une quelconque des revendications 43 à 46,

caractérisé en ce que

40

l'élément d'étanchéité ou une quantité partielle des éléments d'étanchéité sont commandés respectivement de manière indépendante.

48. Procédé selon l'une quelconque des revendications 43 à 47,

45

caractérisé en ce que

les oscillations des pales de rotor (R) sont mesurées par le module de commande de jeu de rotor.

50

49. Procédé selon la revendication 48,

caractérisé en ce que

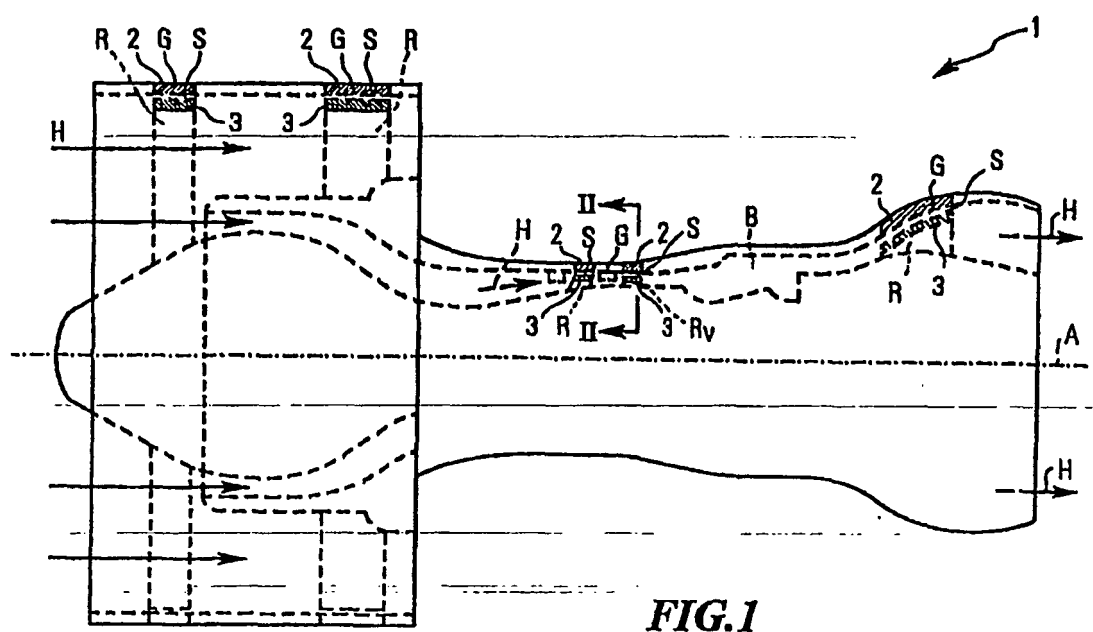
les résultats de mesure de la mesure des oscillations sont transmis sur un trajet radio vers l'extérieur du module de commande de jeu de rotor.

55

50. Procédé selon la revendication 48,

caractérisé en ce que

les résultats de mesure sont stockés dans l'unité de commande au moins jusqu'à la fin de l'utilisation de la turbomachine.



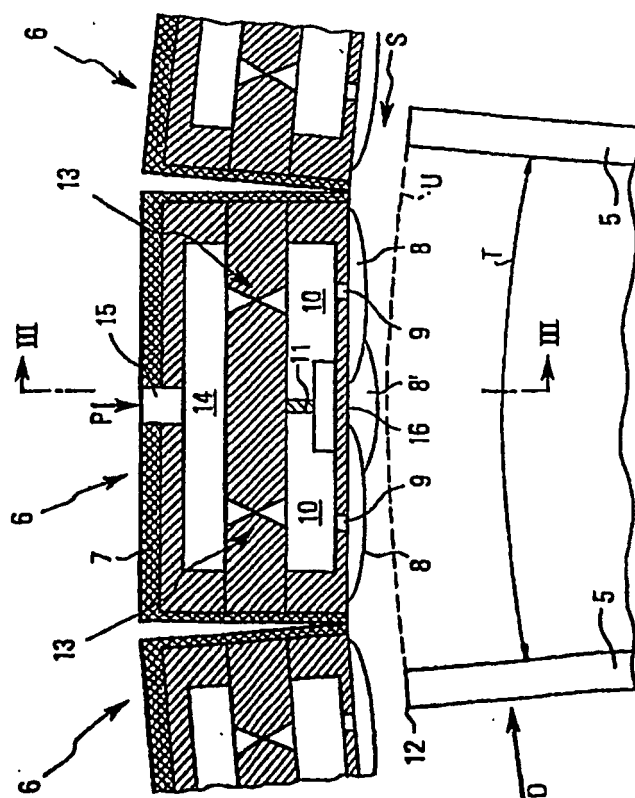


FIG. 2

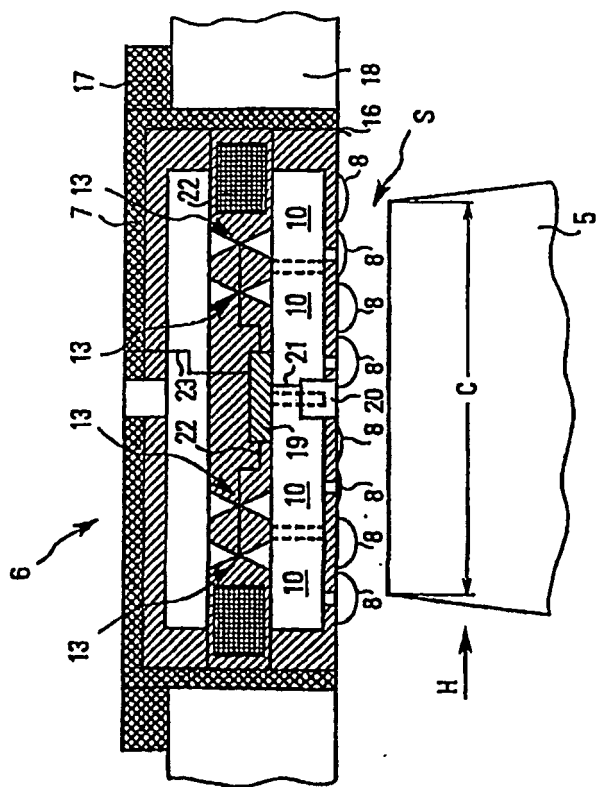


FIG.3

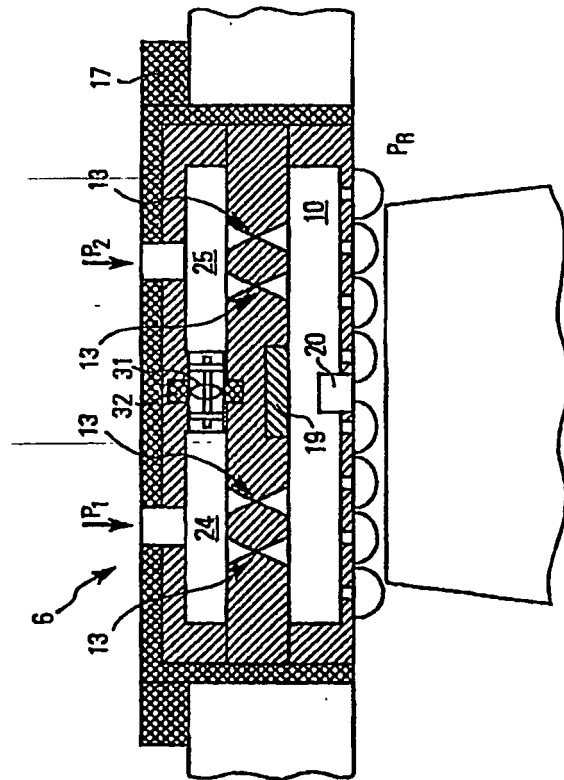


FIG. 4

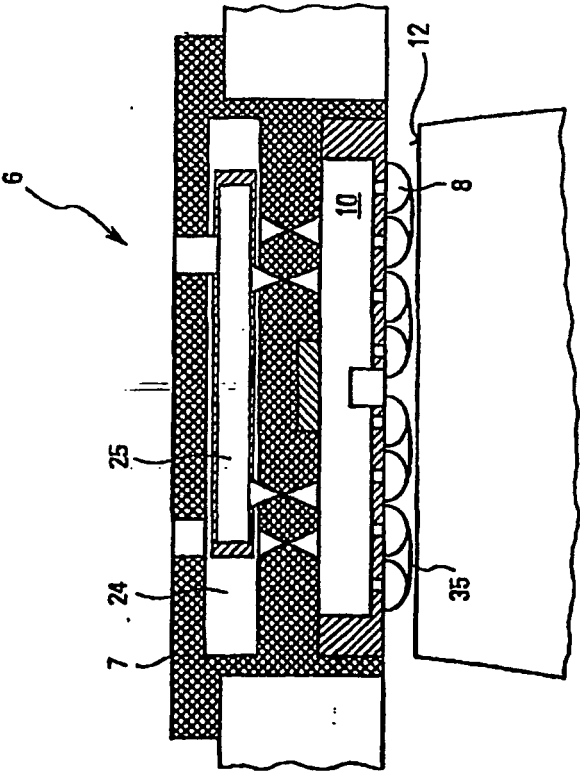


FIG.5

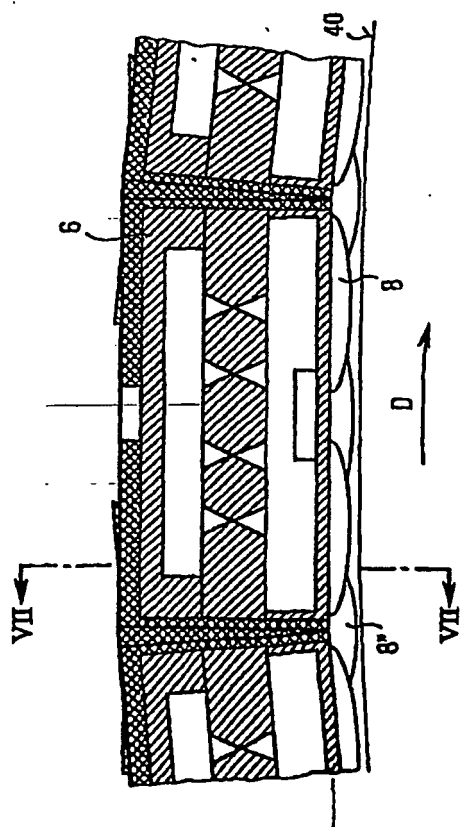


FIG.6

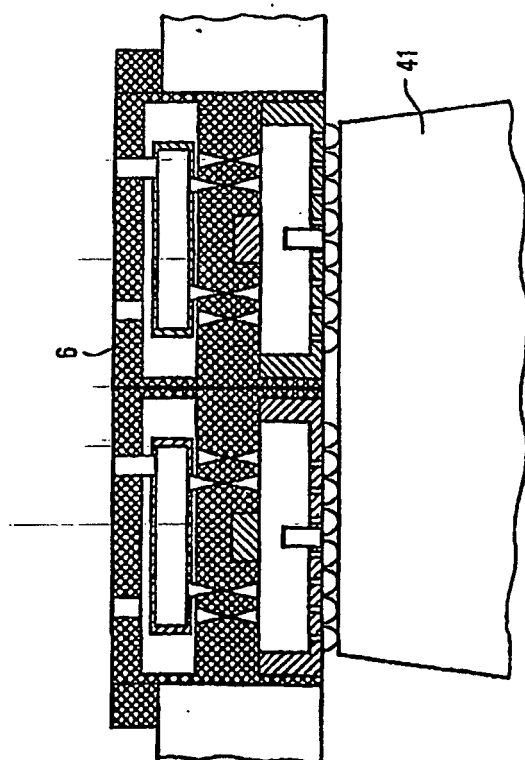


FIG. 7