



(11)

**EP 2 527 600 A1**

(12)

## EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:  
**28.11.2012 Patentblatt 2012/48**

(51) Int Cl.:  
**F01D 11/18 (2006.01)**

**F01D 11/24 (2006.01)**

(21) Anmeldenummer: **12167451.9**

(22) Anmeldetag: **10.05.2012**

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB  
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO  
PL PT RO RS SE SI SK SM TR**  
Benannte Erstreckungsstaaten:  
**BA ME**

(30) Priorität: **24.05.2011 CH 8822011**

(71) Anmelder: **Alstom Technology Ltd  
5400 Baden (CH)**

(72) Erfinder:

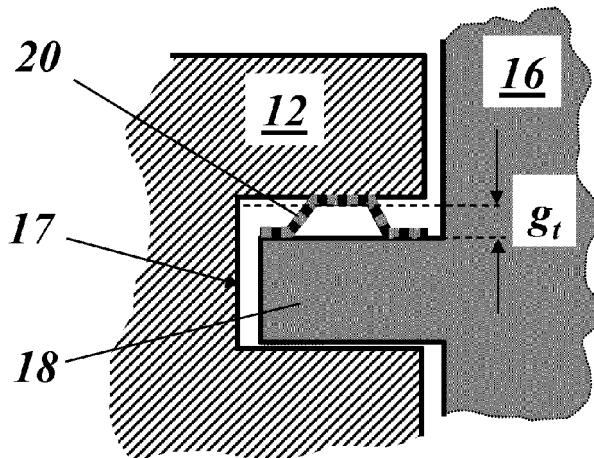
- **Szwedowicz, Jaroslaw  
5330 Bad Zurzach (CH)**
- **Mozharov, Alexey  
5415 Nussbaumen (CH)**
- **Irmisch, Stefan  
5452 Oberrohrdorf (CH)**

### (54) Turbomaschine

(57) Die Erfindung betrifft eine Turbomaschine, welche mit erhöhter Betriebstemperatur arbeitet, mit stationären und rotierenden Komponenten (12, 16), zwischen denen zur Vermeidung eines reibenden Kontaktes ein Spiel vorgesehen ist, das im Stillstand der Maschine einen ersten Wert und im stationären Betrieb der Maschine einen zweiten Wert einnimmt, und das in einer transienten Betriebsphase zwischen Stillstand und stationärem

Betrieb aufgrund unterschiedlicher zeitlicher Verläufe der Rotationsgeschwindigkeit und der thermischen Ausdehnung unterschiedlicher Komponenten eine einen Extremwert aufweisende Kurve durchläuft.

Ein erhöhter Wirkungsgrad wird dadurch erreicht, dass kompensierende Mittel (20) mit einem nicht-linearen Kompensationsmechanismus zum Abbau bzw. Ausgleich des Extremwertes in der transienten Betriebsphase vorgesehen werden.



**Fig.4**

## Beschreibung

### TECHNISCHES GEBIET

**[0001]** Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der Turbomaschinen wie zum Beispiel Gasturbinen, Dampfturbinen, Flugzeugtriebwerke, stationäre Verdichter oder Turbolader. Sie betrifft eine Turbomaschine gemäss dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

### STAND DER TECHNIK

**[0002]** Die Minimierung der Spiele, insbesondere der radialen Spiele zwischen stationären und rotierenden Teilen einer Turbomaschine während des Betriebs ist entscheidend für die Minimierung von Strömungsverlusten und damit für die Maximierung des Wirkungsgrades solcher Maschinen. Zur Illustration zeigt Fig. 1 ein Beispiel einer Turbomaschine 10 in Form einer Verdichter-Anordnung mit einer auf einer (um eine Achse 13) rotierenden Welle 12 sitzenden Laufschaufel 14 und einer an einem Gehäuse 11 befestigten Leitschaufel 15. Durch Minimierung der radialen Spiele  $C_b$  und  $C_v$  zwischen der Spitze der Laufschaufel 14 und dem gegenüberliegenden Gehäuse 11 beziehungsweise der Spitze der Leitschaufel 15 und der gegenüberliegenden Welle 12 können die Strömungsverluste reduziert werden.

**[0003]** Aufgrund der relativen Bewegung, z.B. zwischen der Schaufelspitze der Laufschaufel 14 und dem Gehäuse 11, ist es nicht möglich, das radiale Spiel zu Null zu setzen. Eine Berührung zwischen beiden Teilen während des Betriebes kann zur Beschädigung oder sogar zur vollständigen Zerstörung der Teile führen.

**[0004]** Grundsätzlich gilt, dass die radialen Spiele während des Betriebes (sog. "Heiss-Spiele") durch eine Reihe von Faktoren bestimmt werden, die bei der Konstruktion einer solchen Maschine berücksichtigt werden müssen, wenn die Zusammenbauspiele (sog. "Kalt-Spiele", beim Stillstand der kalten Maschine) bestimmt werden:

- die Herstellungstoleranzen der einzelnen Bauteile;
- die Zusammenbautoleranzen;
- die Ausdehnung der Schaufeln während des Betriebs aufgrund thermischer Effekte und Zentrifugalkräfte;
- die Deformation von Welle und Gehäuse im stationären Betrieb (z.B. in Form der sogenannten "Ovalisierung") und
- zeitabhängige Deformationen und relativen Bewegungen aller Bauteile während des transienten Maschinenbetriebs (betriebliche Übergangsphase der Maschine), wie zum Beispiel dem Aufstarten oder dem Abschalten der Maschine.

**[0005]** Insbesondere die zeitabhängigen Deformatio-  
nen und Relativbewegungen der Hauptkomponenten

während des transienten Betriebs sind von Bedeutung für die Bestimmung des Kalt-Spiels und dem daraus resultierenden Heiss-Spiel. Das Ziel ist, das Kalt-Spiel in solcher Weise zu bestimmen, dass während des stationären Betriebs das resultierende Heiss-Spiel minimal ist.

Aufgrund der unterschiedlichen Zeitkonstanten in der mechanischen und thermischen Verformung der Schaufeln, der Gehäuseteile und der Wellen während des Aufwärmens oder Abkühlens der Maschine wird das minimale Heiss-Spiel nicht notwendigerweise im heissen stationären Betrieb auftreten, wo das minimale Spiel wünschenswert ist. In der Regel wird das kleinste mögliche Spiel (sog. "pinch point") während einer transienten Betriebsphase auftreten, insbesondere wenn man berücksichtigt, dass die Maschine auch schnellen Lastwechseln unterworfen ist oder gestartet werden kann, wenn wesentliche Komponenten von einer vorherigen Betriebsperiode noch heiss sind. In einem solchen Fall ist es notwendig, dass Kalt-Spiel so weit zu vergrössern, dass ein harter Kontakt zwischen stationären und rotierenden Teilen während des transienten Betriebes vermieden wird, was dann konsequenterweise unter stationären Bedingungen zu einem Heiss-Spiel führt, welches grösser ist als erwünscht.

**[0006]** Bekannte Massnahmen zur Minimierung der Strömungsverluste, die durch verbleibende Heiss-Spiele verursacht werden, sind zum Beispiel die Einführung von Deckbändern an den Spitzen der Lauf- und Leitschaufelblätter. Um die Strömung durch den Ringspalt zwischen Deckband und Gehäuse oder Rotor zu minimieren, werden häufig eine oder mehrere Rippen in Umfangsrichtung auf dem rotierenden Teil vorgesehen, während die Oberfläche des stationären Teils eben oder abgestuft sein kann, um insgesamt eine Labyrinth-artige Dichtung zu bilden. Darüber hinaus können sog. Honeycombs (wabenartiges Material) an der Oberfläche des stationären Teils angeordnet werden, um den Rippen das Einschneiden während der transienten Betriebszustände zu ermöglichen, um so einen harten Kontakt zu vermeiden. Die dabei resultierende Konfiguration aus rotierendem Teil und eingeschnittenen Honeycomb ähnelt einer abgestuften Labyrinthdichtung und hilft die Strömungsverluste gegenüber einer Konfiguration ohne Honeycomb zu verringern. Weitere bekannte Massnahmen zur Minimierung der Heiss-Spiele bestehen darin, sogenannte Blatt- oder Bürstendichtungen am stationären Teil anzubringen, die Veränderungen im Spiel während betrieblicher Übergangsphasen bis zu einem gewissen Grade ausgleichen können. Schliesslich kann eine Kombination aus z.B. abreibenden Elementen und abreibbaren Beschichtungen auf der Gegenseite benutzt werden, um den negativen Effekt der über den Umfang auftretenden Spielvariationen abzuschwächen, die beispielsweise durch die Ovalisierung von strukturellen Teilen oder eine gewisse Exzentrizität der Welle innerhalb des Gehäuses hervorgerufen werden können.

**[0007]** Während alle bisher erwähnten Lösungen rein passiver Natur sind, die eine Minimierung des Heiss-

Spiele ohne irgendeine aktive Anpassung der Geometrie während des Betriebs ermöglichen, gibt es auch eine Anzahl von bekannten aktiven Massnahmen zur Spielverringerung.

**[0008]** So ist beispielsweise ein System bekannt, wo der gesamte Rotor in axialer Richtung verschoben wird, wenn die Maschine ihren stationären Betriebzustand erreicht hat. Im Zusammenwirken mit einem konischen Strömungskanal ermöglicht dies, die radialen Spiele in der heissen Turbine aktiv zu minimieren, wobei eine Kombination mit den oben beschriebenen passiven Massnahmen grundsätzlich möglich ist. Da jedoch der ganze Rotor bewegt werden muss, ergeben sich Vergrösserungen der radialen Spiele auf der Verdichterseite. Daher ist diese Massnahme nur von Vorteil, solange die Reduzierung der Verluste in der Turbine die zusätzlichen Verlust auf der Kompressorseite überwiegen.

**[0009]** Anstelle einer Verschiebung der Welle schlagen andere Lösungen vor in jeder Turbinenstufe entweder die radiale thermische Ausdehnung der Schaufeln zu steuern, oder ein Federsystem einzusetzen, welches eine zusätzliche radiale Bewegung der Hitzeschilde oberhalb einer vorbestimmten Grenztemperatur ermöglicht.

**[0010]** Bekannt ist der Einsatz von Verstellmitteln zum linearen Verstellen des Spieles oder auch von federnd nachgiebigen Lagerungsmitteln. Letzteres wird beispielsweise in EP 1 467 066 A2 beschrieben. Mit diesen technischen Lösungen ist es aber nicht möglich, einen Extremwert im Spiel in einer betrieblichen Übergangsphase der Maschine zu kompensieren.

**[0011]** Das Dokument US 2009/0226327 A1 beschreibt eine Blende, hergestellt aus einer sog. Gedächtnislegierung, die in die Rotorscheibe eingebaut ist. Abhängig von den lokalen Temperaturen steuert diese Blende die Menge des Kühlmittelstromes in die Turbinschaufel. Durch Reduzierung des Kühlmittelstroms expandiert die Schaufel thermisch und verringert so den radialen Spalt zwischen Schaufel spitze und dem gegenüberliegenden stationären Bauteil. Durch Erhöhung des Kühlmittelstroms reduziert sich die Schaufellänge und vergrössert so den radialen Spalt.

**[0012]** Die Druckschrift in GB 2 354 290 beschreibt ein Ventil hergestellt aus einer Gedächtnislegierung eingebaut in dem Kühlkanal einer Gasturbinenschaufel. Das Ventil reguliert den Verbrauch von Kühlmittel in Abhängigkeit von der Temperatur des Bauteils. Eine Steuerung des radialen Spieles für Laufschaufeln und Leitschaufeln ist nicht beschrieben in diesem Dokument.

**[0013]** Die Druckschrift US 7,686,569 beschreibt ein System für die axiale Bewegung eines Schaufelrings, die durch eine am Schaufeling anliegende Druckdifferenz, die thermische Ausdehnung oder Kontraktion einer Verbindung oder durch einen Kolben hervorgerufen wird. Eine Gedächtnislegierung kann die notwendige Bewegung ebenfalls veranlassen.

**[0014]** Grundsätzlich können unterschiedliche passive, halb-aktive oder aktive Systeme, sowie Kombinatio-

nen hieraus für die Kontrolle der Spiele zwischen rotierenden und stationären Bauteilen in Erwägung gezogen werden. Die Spiele  $C_b$  oder  $C_v$ , welche den relativen Abstand zwischen einer rotierenden und einer stationären

5 Komponente beschreiben (Fig. 1), variieren während transienten Betriebszuständen infolge der unterschiedlichen und zeitabhängigen thermischen und mechanischen Verformungen der Komponenten. Der tatsächliche zeitliche Verlauf hängt von vielen Faktoren, wie dem  
10 Volumen der Komponenten, dem Kontakt mit heißen oder kalten Medien und den thermischen Eigenschaften der verwendeten Legierungen ab.

**[0015]** Aufgrund dieser zeitlich unterschiedlichen Verformungen muss gemäss Fig. 2(a) das "heisse" Spiel  $C_b$  (bei Laufschaufeln) oder  $C_v$  (bei Leitschaufeln) neben einem Sicherheitsspiel  $C_s$  auch einen transienten Anteil  $g_{t,\min}$  enthalten. Dieser transiente Anteil muss bei der Definition der Spiele im kalten gebauten Zustand,  $C_{\beta,o,\min}$  und  $C_{\beta,o,\max}$ , mitberücksichtigt werden.

**[0016]** Fig. 2 zeigt in der Teilfigur 2(a) ein Beispiel für die Veränderung über der Zeit  $t$  des Spieles zwischen rotierenden und stationären heißen Teilen für stationäre Betriebsphasen (st) und transiente Betriebsphasen (tr), wobei - wie bereits erwähnt -  $C_s$  ein Sicherheitsspiel darstellt,  $g_a$  ein Toleranzband aufgrund der Herstellungs- und Montagetoleranzen der Bauteile ist,  $g_{t,\min}$  und  $g_{t,\max}$  die minimalen und maximalen Differenzen zwischen dem Spiel im stationären Zustand und dem minimalen Spiel darstellen,  $C_{\beta,\min}$  und  $C_{\beta,\max}$  die minimalen und maximalen Spiele für die nominalen ("heissen") Betriebsbedingungen bedeuten, und  $C_{\beta,o,\min}$  und  $C_{\beta,o,\max}$  die entsprechenden minimalen und maximalen Spiele bei Stillstand ("kalte" Betriebsbedingung) darstellen (der Index  $\beta$  steht dabei für "b" resp. Laufschaufel oder "v" resp. Leitschaufel, siehe Fig. 1).

**[0017]** Fig. 2(b) und (c) zeigen mögliche Variationen der Rotationsgeschwindigkeit  $\Omega$  der Welle 12, der Temperatur  $T$  des Arbeitsmittels (Heissgas) und der Metalltemperatur  $T_m$  über der Zeit  $t$ , wobei  $\Omega_n$  und  $T_n$  entsprechend die nominale Rotationsgeschwindigkeit und nominale Heissgastemperatur in der Maschine bedeuten. Die Metalltemperatur  $T_{mn}$  bezeichnet die nominale Temperatur der Welle und/oder einer anderen mechanischen Komponente beim stationären Betrieb der Maschine.  $t_{\Omega n}$  und  $t_{Tn}$  sind dabei die Zeitpunkte, zu denen die stationären Werte  $\Omega_n$  und  $T_n$  erreicht werden.

**[0018]** Fig. 3 zeigt den Querschnitt durch ein rotierendes Bauteil (im Beispiel eine Laufschaufel 14), welches mit einem Fuss 16 in einer entsprechenden Aufnahme 50 im Rotor (Welle 12) befestigt ist, bei Stillstand der Maschine (Fig. 3(a)) und unter nominalen stationären Betriebsbedingungen (Fig. 3(b)). Der gezeigte Fuss 16 ist dabei repräsentativ für jede beliebige Fussgeometrie, wie zum Beispiel einen Tannenbaumfuss, einen Schwabenschwanzfuss oder einen Hammerkopffuss. Er greift mit Fingern 18 in entsprechende seitliche Nuten 17 in der Aufnahme, z.B. im Rotor ein.

**[0019]** Die Zentrifugalkraft bringt einen oder mehrere

der Finger 18 des Fusses 16 in Kontakt mit dem Rotor 12 (Fig. 3(b)). Bei niedriger Rotationsgeschwindigkeit verhinderte ein Federelement 19, dass der Fuss 16 in der Aufnahme bei langsamen Rotationsgeschwindigkeiten klappert. Bei nominaler Rotationsgeschwindigkeit und nach Erreichen des thermischen Gleichgewichtes aller Komponenten der Maschine werden Spiele  $C_b$  oder  $C_v$  gemäss Fig. 1 erreicht. Die Bezeichnung  $g_a$  steht hierbei wiederum für das Toleranzband aus Fertigungs- und Montagetoleranzen und ist hier exemplarisch zwischen Finger 18 und der Rotoraufnahme bei Stillstand der Maschine dargestellt.

**[0020]** Beim Anfahren der Maschine ist die thermische Ausdehnung der Beschaufelung typischerweise sehr viel schneller als die der Gehäuseteile oder der Rotorwelle, die aufgrund ihrer grösseren Masse eine höhere thermische Trägheit haben als die Schaufeln. Das bedeutet, dass das Aufheizen und damit die thermische Ausdehnung der Welle oder anderer Strukturteile fort dauert, selbst nachdem das Arbeitsmittel bereits die nominale Betriebstemperatur  $T_n$  erreicht hat (Zeitpunkt  $t_{Tn}$  in Fig. 2(c)). Dieser Umstand führt zum Auftreten eines sogenannten "pinchpoints", d.h. eines Zeitpunktes während der Aufwärmphase, bei dem das radiale Spiel seinen Minimalwert erreicht (siehe Fig. 2(a)). Aus diesem Grunde muss für die nominale stationäre Betriebsbedingung das resultierende minimalen Spiel  $C_{b,min}$  (oder  $C_{v,min}$ ) ein Sicherheitsspiel  $C_s$  beinhalten sowie einen minimalen transienten Beitrag zum Spalt,  $g_{t,min}$ . Dieser muss bei der Auslegung der Maschine analytisch bestimmt werden und hängt von den thermischen Randbedingungen, Dimensionen und Materialeigenschaften der rotierenden und stationären Bauteile ab. Die transienten Beiträge zum Spalt,  $g_{t,min}$  und  $g_{t,max}$ , verhindern, dass die Schaufelspitzen am stationären Gehäuse oder stationären Hitzeschilden bzw. am Rotor oder den Rotor-Hitzeschilden reiben.

**[0021]** Unter der nominalen stationären Betriebsbedingung, wenn alle rotierenden und stationären Teile ihre maximalen thermischen und mechanischen Verformungen erreicht haben, ist der transiente Beitrag zum "pinch-point"-Spalt ( $g_t$ ) ein wesentlicher Teil des Spiels im "heissen" stationären Zustand,  $C_{b,min}$  (oder  $C_{v,min}$ ).

#### DARSTELLUNG DER ERFINDUNG

**[0022]** Es ist nun eine Aufgabe der Erfindung, eine Turbomaschine der eingangs genannten Art zu schaffen, bei der das Spiel zwischen rotierenden und stationären Teilen für die verschiedenen Betriebszustände auf einfache Weise optimiert wird.

**[0023]** Die Aufgabe wird durch die Gesamtheit der Merkmale des Anspruchs 1 gelöst. Die Erfindung geht aus von einer mit erhöhter Betriebstemperatur arbeitenden Turbomaschine mit stationären und rotierenden Komponenten, zwischen denen zur Vermeidung eines reibenden Kontaktes ein Spiel vorgesehen ist, das im Stillstand der Maschine einen ersten Wert und im statio-

nären Betrieb der Maschine einen zweiten Wert einnimmt, und das in einer transienten Betriebsphase zwischen Stillstand und stationärem Betrieb aufgrund unterschiedlicher zeitlicher Verläufe der Rotationsgeschwindigkeit und der thermischen Ausdehnung unterschiedlicher Komponenten eine einen Extremwert aufweisende Kurve durchläuft. Sie ist dadurch gekennzeichnet, dass kompensierende Mittel mit einem nicht-linearen Kompensationsmechanismus zum Abbau bzw. Ausgleich des Extremwertes in der transienten Betriebsphase vorgesehen werden.

**[0024]** Das der Anmeldung zugrunde liegende Problem des Auftretens eines Extremwertes im Spiel in einer betrieblichen Übergangsphase der Maschine wird dadurch gelöst, dass die vorgesehenen kompensierenden Mittel nicht am Anfang oder Ende des Übergangs ihre maximale Auslenkung aufweisen, sondern im Übergangsbereich selbst, und zwar dort, wo der Extremwert des Spiels auftritt. Dazu wird ein nicht-linearer Kompensationsmechanismus in den kompensierenden Mitteln eingesetzt, der beispielsweise aus zwei gegenläufigen Bewegungen überlagert ist.

**[0025]** Eine Ausgestaltung der Turbomaschine nach der Erfindung ist dadurch gekennzeichnet, dass die kompensierenden Mittel eine Selbstjustierzvorrichtung umfassen, welche in Abhängigkeit von äusseren Parametern das Spiel vergrössert oder verkleinert.

**[0026]** Insbesondere ändert die Selbstjustierzvorrichtung zur Vergrösserung oder Verkleinerung des Spiels seine Form.

**[0027]** Eine andere Ausgestaltung zeichnet sich dadurch aus, dass die Selbstjustierzvorrichtung eine vorgegebene Höhe aufweist, und dass die Selbstjustierzvorrichtung zur Vergrösserung oder Verkleinerung des Spiels seine Höhe ändert.

**[0028]** Eine weitere Ausgestaltung der Erfindung ist dadurch gekennzeichnet, dass die Selbstjustierzvorrichtung das Spiel in Abhängigkeit von ihrer Temperatur vergrössert oder verkleinert.

**[0029]** Insbesondere weist die Selbstjustierzvorrichtung in ihrem Temperaturverhalten eine Hysterese auf.

**[0030]** Gemäss einer weiteren Ausgestaltung enthält die Selbstjustierzvorrichtung ein Bimetall.

**[0031]** Ebenso ist es denkbar, dass die Selbstjustierzvorrichtung eine Formgedächtnislegierung enthält.

**[0032]** Eine wieder andere Ausgestaltung der Erfindung ist dadurch gekennzeichnet, dass die rotierenden Komponenten Laufschaufeln sind, und dass das zu beeinflussende Spiel zwischen den Spitzen der Laufschaufeln und dem gegenüberliegenden stationären Gehäuse besteht.

**[0033]** Eine weitere Ausgestaltung zeichnet sich dadurch aus, dass die stationären Komponenten Leitschaufeln sind, und dass das zu beeinflussende Spiel zwischen den Spitzen der Leitschaufeln und dem gegenüberliegenden Rotor besteht.

**[0034]** Eine andere Ausgestaltung ist dadurch gekennzeichnet, dass die Laufschaufeln jeweils mit einem

Schaufelfuss in einer Aufnahme im Rotor sitzen und sich mit Abstützmitteln gegen angreifende Zentrifugalkräfte am Rotor abstützen, und dass die Selbstjustierzvorrichtung zwischen den Abstützmitteln und den Rotor angeordnet ist.

[0035] Eine weitere Ausgestaltung ist dadurch gekennzeichnet, dass die Selbstjustierzvorrichtung ihre Höhe in radialer Richtung temperaturgesteuert zwischen einem ersten Wert und einen zweiten Wert verändert, und dass die Differenz der beiden Werte zum Extremwert der Kurve des Spiels korrespondiert.

#### KURZE ERLÄUTERUNG DER FIGUREN

[0036] Die Erfindung soll nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen im Zusammenhang mit der Zeichnung näher erläutert werden. Es zeigen:

- Fig. 1 in einer stark vereinfachten Schnittdarstellung das mechanische Spiel zwischen rotierenden und stationären Teilen in einer Turbomaschine der üblichen Art nach dem Stand der Technik;
- Fig. 2 in mehreren Teilfiguren die zeitliche Abhängigkeit des Spiels bei einer Turbomaschine bei Durchlaufen eines transienten Startvorgangs bis zum Erreichen eines stationären Betriebszustands (Fig. 2(a)) sowie die zugehörige zeitliche Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit (Fig. 2(b)) und der Heissgas- und Metalltemperatur (Fig. 2(c));
- Fig. 3 in einer stark vereinfachten Schnittdarstellung die Verankerung eines rotierenden Teils (Laufschaufel) im Rotor bei Stillstand (Fig. 3(a)) und unter nominalen stationären Betriebsbedingungen (Fig. 3(b));
- Fig. 4 in einer stark vereinfachten Schnittdarstellung ein selbstjustierendes System zur Steuerung des Spiels bei einer Verankerung gemäss Fig. 3 gemäss einem Ausführungsbeispiel der Erfindung;
- Fig. 5 ein Beispiel für die thermo-mechanische Hysterese eines selbstjustierenden Systems gemäss der Erfindung;
- Fig. 6 in einer stark vereinfachten Schnittdarstellung ein selbstjustierendes System gemäss Fig. 4 bei nominaler Rotationsgeschwindigkeit und
- Fig. 7 die zeitliche Abhängigkeit des Spiels bei einer Turbomaschine mit einem selbstjustierenden System gemäss Fig. 4 und 6.

#### WEGE ZUR AUSFÜHRUNG DER ERFINDUNG

[0037] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf die Anwendung einer Selbstjustierzvorrichtung, die ein Bimetall-Element und/oder Formgedächtnislegierungs-Element und/oder ein Element aus einem anderen Material umfasst, welches in einer elastischen, super-elastischen oder pseudo-elastischen Weise oberhalb eines Grenzwertes von Temperatur, Druck oder mechanischer Belastung seiner Form verändert, welches aktiv oder passiv aktiviert wird, und welches in einer Turbomaschine angeordnet ist, um die Spiele während des Betriebes und unter verschiedenen Betriebszuständen zu minimieren. Die Selbstjustierzvorrichtung kann dabei in einer Baueinheit einer Turbine, einer Verdichterschaufel, einen Stator- oder Rotor-Hitzeschild, einem Leitschaufelträger oder anderen rotierenden oder stationären Bauteilen untergebracht sein, die am Rotor oder am Gehäuse angebaut sind.

[0038] Als Beispiel für den Einsatz der Erfindung wird nachfolgend die Befestigung einer Laufschaufel am Rotor einer Turbine exemplarisch beschrieben. Fig. 4 zeigt eine Selbstjustierzvorrichtung 20, die zwischen dem Finger 18 eines Schaufelfusses 16 und der zugehörigen Nut 17 im Rotor 12 angeordnet ist. Die Deformationen der Selbstjustierzvorrichtung 20 können charakterisiert werden als

- a. durch einen äusseren 2-Wege-Effekt bewirkt, der durch eine einwirkende äussere Kraft wie zum Beispiel die Zentrifugalkraft initiiert wird und/oder
- b. durch einen internen 2-Wege-Effekt bewirkt, wie bei einer Formgedächtnislegierung, bei der keine externe Kraft benötigt wird, um die gewünschte Deformation des Systems zu aktivieren.

[0039] Die Form der Selbstjustierzvorrichtung 20 kann weitgehend beliebig sein und hängt generell vom zur Verfügung stehenden Raum ab. Entscheidend bei der Form ist die Höhe, wie dies in Fig. 4 gezeigt ist. Im dort dargestellten Beispiel korrespondiert die Höhe der Selbstjustierzvorrichtung 20 unter der Bedingung des Stillstands der Maschine zu der Minimaldifferenz  $g_{t,min}$  (dem transienten Spaltbeitrag), die ohne den Einsatz der Selbstjustierzvorrichtung 20 vorliegen würde. Während des Hochfahrens der Maschine werden die Zentrifugalkräfte, die auf die Schaufel wirken, über den Finger 18 durch die Selbstjustierzvorrichtung 20 auf die Nut 17 im Rotor 12 übertragen. Diese Kräfte wachsen mit zunehmender Rotationsgeschwindigkeit. Die elastischen Eigenschaften der Selbstjustierzvorrichtung 20 bei der Höhe  $g_t$  verhindern, dass die Vorrichtung flach gedrückt wird. Als Folge davon bleibt das Spiel an der Schaufelspitze bei gleicher Schaufellänge grösser als ohne die Selbstjustierzvorrichtung 20. Eine gewisse Abflachung der Selbstjustierzvorrichtung 20 aufgrund der mechanischen Belastung kann jedoch akzeptiert werden.

[0040] Mit zunehmender Leistung, vom Leerlauf zur

Volllast, erhöht sich die Temperatur in der Maschine. Im Bezug auf die Rotationsgeschwindigkeit benötigt dieser Aufwärmprozess deutlich mehr Zeit (Fig. 2(b),(c)) und die verschiedenen Teile der Maschine erreichen die stationäre Temperatur  $T_n$  zu verschiedenen Zeitpunkten. Typischerweise ist das beim Aufwärmen "langsamste" Bauteil der Rotor. Mit ansteigender Temperatur des Schaufelfusses 16 und des Rotors 12 nimmt aufgrund der Wärmeleitung an den Kontaktflächen und konvektiver Wärmeübertragung durch irgendwelche Heissgasströmungen um den Schaufelfuss 16 herum auch die Temperatur der Selbstjustierzvorrichtung 20 zu.

**[0041]** Das Material der Selbstjustierzvorrichtung 20 ist so konditioniert (trainiert), dass sich seine mechanischen Eigenschaften als Funktion seiner Temperatur  $T$  in Einklang mit einem Hysterese-Verhalten verändern, wie es in Fig. 5 dargestellt ist. Bei Stillstand und Umgebungstemperatur ist die Selbstjustierzvorrichtung 20 aus ihrem flachen Zustand heraus maximal deformiert durch eine Dehnung  $\epsilon_t$  mit  $\epsilon_t = \sigma_t/E$ , die zum transienten Spaltbeitrag  $g_t$  korrespondiert (Fig. 4). Mit zunehmender Temperatur  $T$  verändert die Selbstjustierzvorrichtung 20 ihre Steifigkeit in Einklang mit der antrainierten Hysterese und wird gemäss Fig. 6 vollständig flach, wenn die vorbestimmte Temperatur  $T_n$  erreicht wird. Während des Abschaltens der Maschine folgen die thermo-mechanischen Eigenschaften der Selbstjustierzvorrichtung 20 der oberen Kurve der vorprogrammierten Hysterese (siehe Pfeile in Fig. 5).

**[0042]** Wenn der Selbstjustierzvorrichtung 20 die korrekte Höhe ( $g_t$ ) gegeben wird und sie zu dem erforderlichen elastischen oder super-elastischen oder pseudo-elastischen Verhalten und thermischer Hysterese gebracht wird, das zur zentrifugalen Belastung und dem Aufwärmen und Abkühlen der benachbarten Bauteile passt, ist es möglich, das Auftreten eines transienten "pinch-point"-Spiels zu minimieren oder sogar vollständig zu vermeiden. Als Folge davon nimmt das Spiel im stationären heissen Zustand seinen kleinsten möglichen Minimalwert ein unter Berücksichtigung des minimalen erforderlichen Sicherheitsspiels. Im Idealfall kann die Länge der Schaufel für den Fall ohne Selbstjustierzvorrichtung 20 um den Betrag  $g_t$  erhöht werden, so dass das minimale resultierende Spiel  $C_{\beta,o,min}$  gleich  $C_s$  ist (siehe Fig. 2(a) und Fig. 7).

**[0043]** Fig. 7 zeigt (im Vergleich zu Fig. 2(a)) die zeitliche Veränderung des Spiels an der Spitze einer Laufschaufel mit eingebauter Selbstjustierzvorrichtung 20 (Kurven a). Die Kurve  $C_\beta(t)_{min\ red}$  demonstriert die Möglichkeit, die das Spiel im kalten gebauten Zustand und im warmen Zustand zu reduzieren, indem das Spiel  $g_{t,min}$  eliminiert wird.

**[0044]** Wenn man bedenkt, dass die gleichen Prinzipien auch auf die radiale Bewegung des Stator-Hitze-schildes gegenüber einer Laufschaufel spitze angewendet werden können, hat der Konstrukteur der Maschine grosse Freiheiten, um die Spiele während transienter und stationärer Betriebszuständen einzustellen und zu steu-

ern.

**[0045]** Wenn man weiterhin bedenkt, dass auch die Möglichkeit besteht, die Kühl- und Leckluft-Ströme durch den Rotor und um die Rotor- und Statorteile herum zu beeinflussen, ist es auch möglich, das Verhalten der Selbstjustierzvorrichtung 20 aktiv zu steuern.

**[0046]** Im Rahmen der vorliegenden Offenbarung sind verschiedene Formgedächtnislegierungen, Bimetalle und/oder andere Materialien mit einem vergleichbaren Verhalten betrachtet worden. Ihre Herstellung und ihr Einbau in ein Bauteil sind nicht detailliert erörtert worden, da sie dem Fachmann auf dem Gebiet der Formgedächtnislegierungen und Bimetalle bekannt sind. So könnte beispielsweise eine NiTi- basierte Formgedächtnislegierung im Bereich des heissen Schaufelfusses in Betracht gezogen werden, deren zulässige Arbeitstemperatur bis hinauf zu 200 °C reicht, wenn eine Kühlung mit Sekundärluft in einer Gasturbine zur Verfügung steht. Ternäre Hochtemperatur-NiTiX-Legierungen und andere, die als Element X Hafnium Hf, Palladium Pd und/oder Platin Pt enthalten, erweitern den Arbeitstemperaturbereich bis hinauf zu 800 °C und mehr. Selbstverständlich können im Rahmen der Erfindung auch andere Materialien/Legierungen Anwendung finden, sofern die gewünschten und erforderlichen Eigenschaften aufweisen.

## BEZUGSZEICHENLISTE

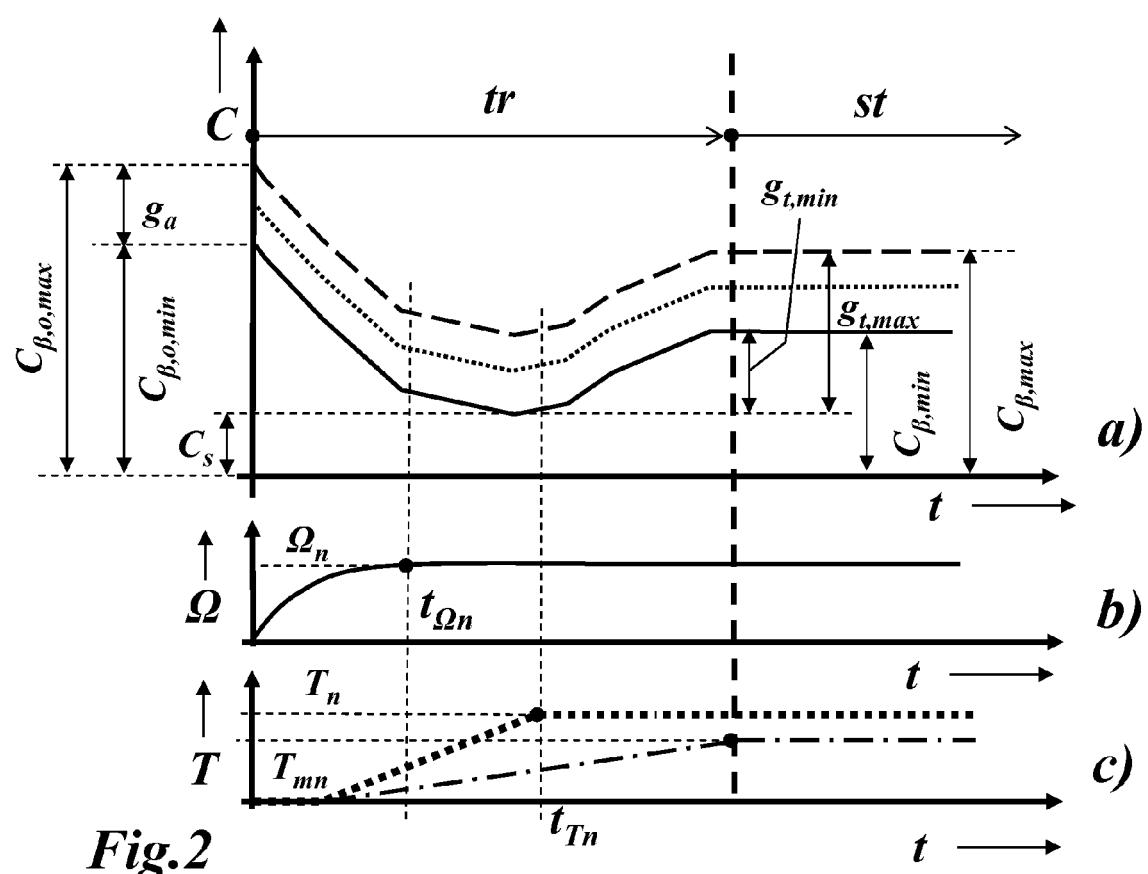
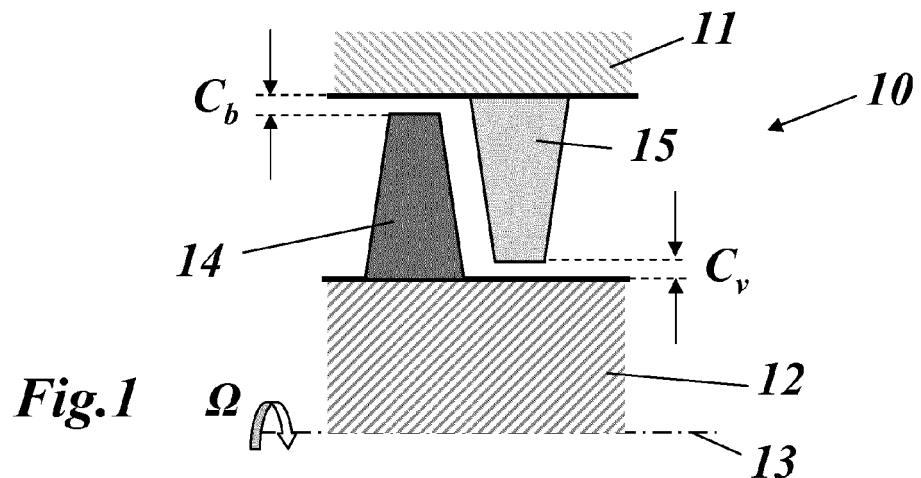
### [0047]

30	10	Turbomaschine
	11	Gehäuse
	12	Welle (Rotor)
	13	Achse
35	14	Laufschaufel
	15	Leitschaufel
	16	Fuss (Schaufelfuss)
	17	Nut
	18	Finger
40	19	Federelement
	20	Selbstjustierzvorrichtung
	C	Spiel
	$C_b$	Laufschaufelspiel
	$C_s$	Sicherheitsspiel
45	$C_v$	Leitschaufelspiel
	$C_{\beta,o,max}$	Maximalspiel (kalt)
	$C_{\beta,o,min}$	Minimalspiel (kalt)
	$C_{\beta,max}$	Maximalspiel (heiss)
	$C_{\beta,min}$	Minimalspiel (heiss)
50	$C_\beta(t)_{min}$	Kurve für Minimalspielverlauf
	$C_\beta(t)_{max}$	Kurve für Maximalspielverlauf
	$C_\beta(t)_{min\ red}$	Kurve für Minimalspielverlauf mit Selbstjustierzvorrichtung 20
	$g_a$	Toleranzband
55	$g_t$	transienter Spaltbeitrag
	$g_{t,max}$	Maximaldifferenz (transienter Spaltbeitrag)
	$g_{t,min}$	Minimaldifferenz (transienter Spaltbei-

	trag)
$\Omega$	Rotationsgeschwindigkeit
$\Omega_n$	Rotationsgeschwindigkeit (nominal)
st	stationäre Betriebsphase
tr	transiente Betriebsphase
$T_n$	Heissgastemperatur (nominal)
$T_{mn}$	Metalltemperatur (nominal)
t	Zeit
T	Temperatur
$\epsilon$	Dehnung
$\sigma$	Spannung
E	Elastizitätsmodul

### Patentansprüche

1. Turbomaschine (10), welche mit erhöhter Betriebstemperatur arbeitet, mit stationären und rotierenden Komponenten (11, 15 bzw. 12, 14), zwischen denen zur Vermeidung eines reibenden Kontaktes ein Spiel (C) vorgesehen ist, das im Stillstand der Maschine einen ersten Wert ( $C_{\beta,\text{omin}}$ ;  $C_{\beta,\text{omax}}$ ) und im stationären Betrieb (st) der Maschine einen zweiten Wert ( $C_{\beta,\text{min}}$ ;  $C_{\beta,\text{max}}$ ) einnimmt, und das in einer transienten Betriebsphase (tr) zwischen Stillstand und stationärem Betrieb (st) aufgrund unterschiedlicher zeitlicher Verläufe der Rotationsgeschwindigkeit und der thermischen Ausdehnung unterschiedlicher Komponenten eine einen Extremwert ("pinch-point";  $g_t$ ) aufweisende Kurve durchläuft, **dadurch gekennzeichnet, dass** kompensierende Mittel (20) mit einem nicht-linearen Kompensationsmechanismus zum Abbau bzw. Ausgleich des Extremwertes in der transienten Betriebsphase (tr) vorgesehen werden.
2. Turbomaschine nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die kompensierenden Mittel eine Selbstjustierzvorrichtung (20) umfassen, welche in Abhängigkeit von äusseren Parametern das Spiel (C) vergrössert oder verkleinert.
3. Turbomaschine nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Selbstjustierzvorrichtung (20) zur Vergrösserung oder Verkleinerung des Spiels (C) seine Form ändert.
4. Turbomaschine nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Selbstjustierzvorrichtung (20) eine vorgegebene Höhe aufweist, und dass die Selbstjustierzvorrichtung (20) zur Vergrösserung oder Verkleinerung des Spiels (C) seine Höhe ändert.
5. Turbomaschine nach einem der Ansprüche 2-4, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Selbstjustierzvorrichtung (20) das Spiel (C) in Abhängigkeit von ihrer Temperatur vergrössert oder verkleinert.
6. Turbomaschine nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Selbstjustierzvorrichtung (20) in ihrem Temperaturverhalten eine Hysterese aufweist.
7. Turbomaschine nach Anspruch 5 oder 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Selbstjustierzvorrichtung (20) ein Bimetall enthält.
8. Turbomaschine nach Anspruch 5 oder 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Selbstjustierzvorrichtung (20) eine Formgedächtnislegierung enthält.
9. Turbomaschine nach einem der Ansprüche 1-8, **dadurch gekennzeichnet, dass** die rotierenden Komponenten Laufschaufeln (14) sind, und dass das zu beeinflussende Spiel ( $C_b$ ) zwischen den Spitzen der Laufschaufeln (14) und dem gegenüberliegenden stationären Gehäuse (11) besteht.
10. Turbomaschine nach einem der Ansprüche 1-8, **dadurch gekennzeichnet, dass** die stationären Komponenten Leitschaufeln (15) sind, und dass das zu beeinflussende Spiel ( $C_v$ ) zwischen den Spitzen der Leitschaufeln (15) und dem gegenüberliegenden Rotor (12) besteht.
11. Turbomaschine nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Laufschaufeln (14) jeweils mit einem Schaufelfuss (16) in einer Aufnahme im Rotor (12) sitzen und sich mit Abstützmitteln (18) gegen angreifende Zentrifugalkräfte am Rotor (17) abstützen, und dass die Selbstjustierzvorrichtung (20) zwischen den Abstützmitteln (18) und den Rotor (12, 17) angeordnet ist.
12. Turbomaschine nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Selbstjustierzvorrichtung (20) ihre Höhe in radialer Richtung temperaturgesteuert zwischen einem ersten Wert und einen zweiten Wert verändert, und dass die Differenz der beiden Werte zum Extremwert ( $g_t$ ) der Kurve des Spiels (C) korrespondiert.



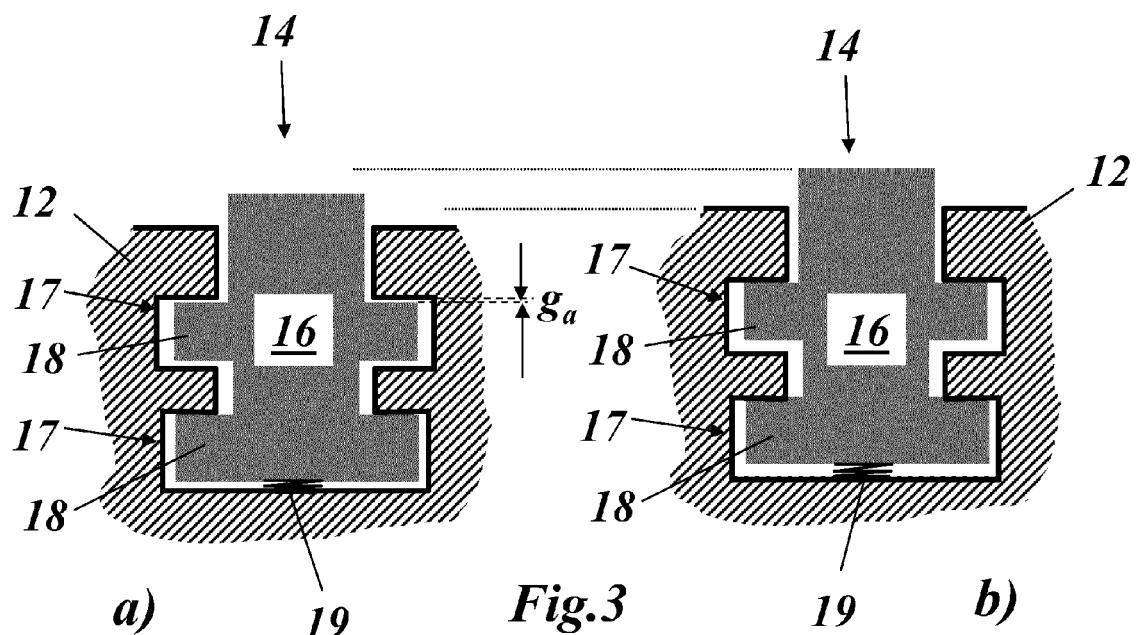


Fig.3

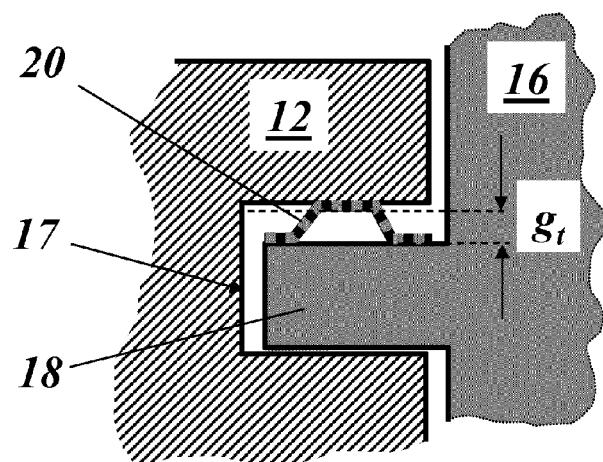


Fig.4

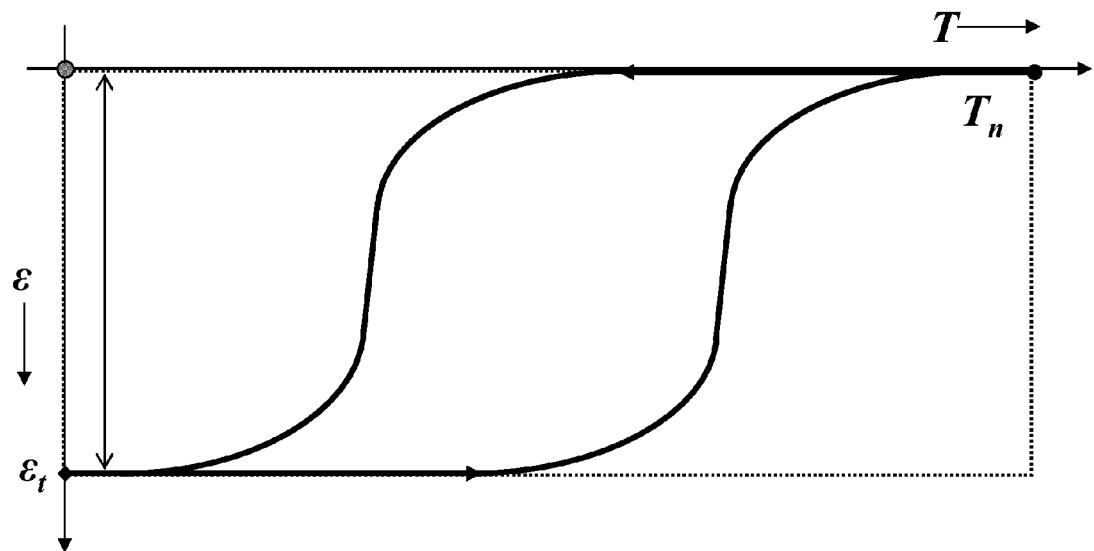


Fig.5

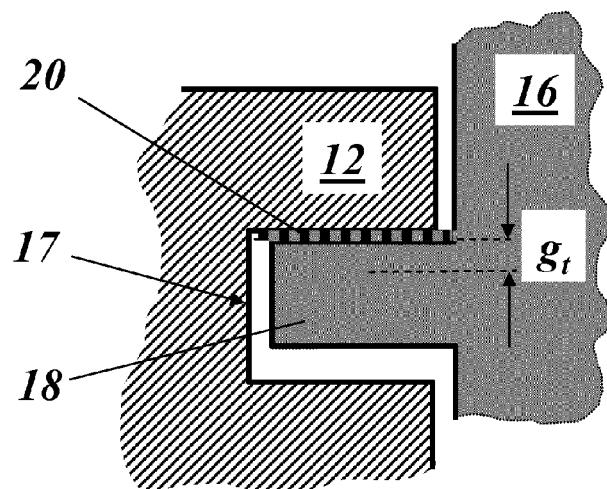


Fig.6

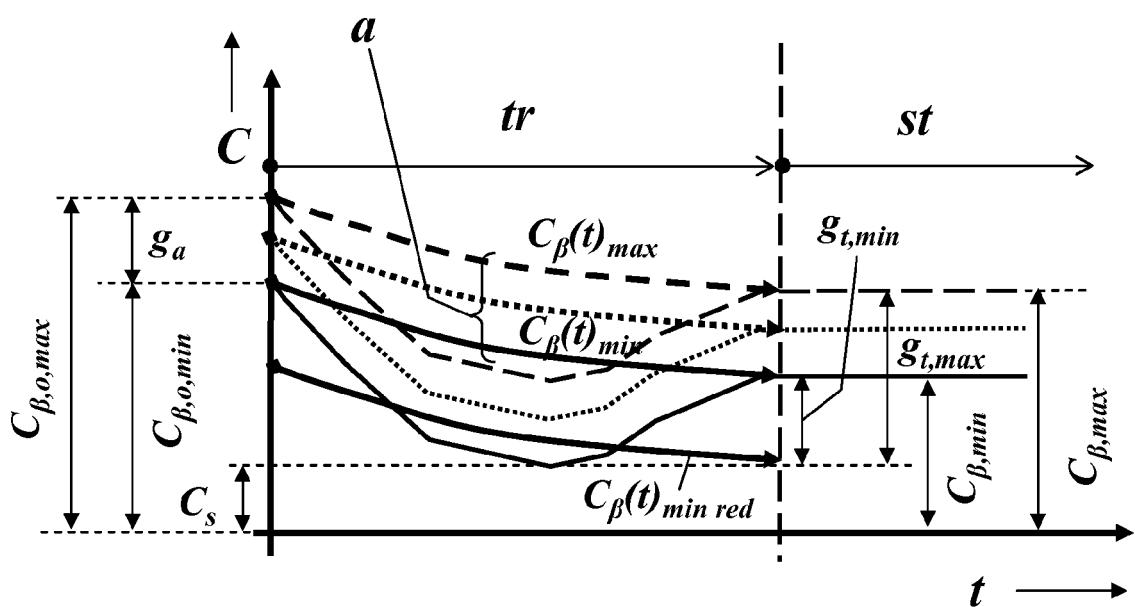


Fig. 7



## EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung  
EP 12 16 7451

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betreift Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	EP 1 467 066 A2 (ROLLS ROYCE PLC [GB]) 13. Oktober 2004 (2004-10-13) * Absätze [0019], [0048]; Abbildungen 2,7,11 *	1-12	INV. F01D11/18 F01D11/24
X	JP 60 111004 A (HITACHI LTD) 17. Juni 1985 (1985-06-17)	1-6,8	
A	* Zusammenfassung; Abbildungen 2,3 *	12	
X	JP 58 206807 A (HITACHI LTD) 2. Dezember 1983 (1983-12-02)	1-6,8	
A	* Zusammenfassung *	12	
X	EP 1 686 243 A2 (GEN ELECTRIC [US]) 2. August 2006 (2006-08-02)	1-3,5,6, 8	
	* Zusammenfassung *	-----	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
			F01D
1	Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt		
	Recherchenort	Abschlußdatum der Recherche	Prüfer
	Den Haag	26. September 2012	Gebker, Ulrich
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE			
X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : nichtschriftliche Offenbarung P : Zwischenliteratur			
T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument ..... & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument			

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

EP 12 16 7451

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

Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am  
Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

26-09-2012

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
EP 1467066	A2	13-10-2004	DE 602004010562 T2 EP 1467066 A2 US 2008267770 A1		30-04-2008 13-10-2004 30-10-2008
JP 60111004	A	17-06-1985	KEINE		
JP 58206807	A	02-12-1983	KEINE		
EP 1686243	A2	02-08-2006	CA 2533576 A1 EP 1686243 A2 JP 4805682 B2 JP 2006207584 A US 2006165518 A1		26-07-2006 02-08-2006 02-11-2011 10-08-2006 27-07-2006

**IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE**

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

**In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente**

- EP 1467066 A2 [0010]
- US 20090226327 A1 [0011]
- GB 2354290 A [0012]
- US 7686569 B [0013]