



PCT
WELTORGANISATION FÜR GEISTIGES EIGENTUM
Internationales Büro
INTERNATIONALE ANMELDUNG VERÖFFENTLICHT NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE
INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT)

<p>(51) Internationale Patentklassifikation ⁷ : F01D 21/00, 21/04</p>	A1	<p>(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: WO 00/36280</p> <p>(43) Internationales Veröffentlichungsdatum: 22. Juni 2000 (22.06.00)</p>
<p>(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP99/08717</p> <p>(22) Internationales Anmeldedatum: 12. November 1999 (12.11.99)</p> <p>(30) Prioritätsdaten: 198 57 552.1 14. Dezember 1998 (14.12.98) DE</p> <p>(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten ausser US): BMW ROLLS-ROYCE GMBH [DE/DE]; Hohemarkstrasse 60-70, D-61440 Oberursel (DE).</p> <p>(72) Erfinder; und (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): HAYESS, Burkhard [DE/DE]; Jühnsdorfer Strasse 20, D-15834 Rangsdorf (DE).</p> <p>(74) Anwalt: SCHMIDT, Günter; Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft, Patentabteilung AJ-3, D-80788 München (DE).</p>	<p>(81) Bestimmungsstaaten: US, europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).</p> <p>Veröffentlicht <i>Mit internationalem Recherchenbericht.</i></p>	

(54) Title: METHOD OF RECOGNITION OF A SHAFT RUPTURE IN A TURBO-ENGINE

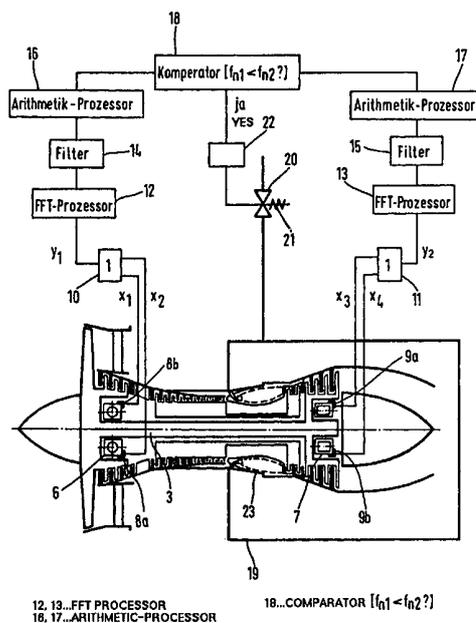
(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUM ERKENNEN EINES WELLENBRUCHES IN EINER STRÖMUNGSKRAFTMASCHINE

(57) Abstract

The invention relates to a method of recognition of a shaft rupture in a turbo-engine with the purpose of initiating a suitable speed range limiting measure, especially an emergency shut-down of the fuel supply in a gas turbine system of an aircraft. According to the inventive method, a torque-supplying turbine rotor and a torque-absorbing unit are linked with one another via the shaft (3) which is to be monitored for a rupture and the ends of which are arranged on at least two roller bearings (6, 7). The rotary frequencies (f_{n1} , f_{n2}) of the two ends of the shaft in the roller bearings (6, 7) of the shaft (3) are detected and compared continuously and substantially in real time. If the rotary frequency (f_{n1}) at the roller bearing (7) at the turbine rotor's end is higher than the rotary frequency (f_{n2}) at the roller bearing (6) of the torque-absorbing unit, rupture of the shaft (3) is assumed. Preferably, the rotary frequency of the respective end of the shaft is determined via fast-Fourier transmission and an arithmetic processor for both roller bearings (6, 7) via separate measuring channels. The measurement is based on one or several typical roller bearing frequencies that are emitted by said roller bearings when they rotate.

(57) Zusammenfassung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Erkennen eines Wellenbruchs in einer Strömungskraftmaschine mit dem Ziel, danach eine geeignete drehzahlbezogene Maßnahme, insbesondere eine Brennstoffschnellabschaltung bei einer Flug-Gasturbinenanlage, einzuleiten, wobei ein Drehmomentabgebender Turbinenläufer und ein Drehmomentaufnehmendes Aggregat über die hinsichtlich eines Bruches zu überwachende, endseitig in zumindest zwei Wälzlager (6, 7) gelagerte Welle (3) miteinander verbunden sind. Dabei werden die Drehfrequenzen (f_{n1} , f_{n2}) der beiden Wellenenden in den Wälzlager (6, 7) der Welle (3) kontinuierlich und im wesentlichen in Echtzeit ermittelt und miteinander verglichen, wobei bei einer gegenüber der Drehfrequenz (f_{n1}) am Wälzlager (6) des Drehmomentaufnehmenden Aggregates höheren Drehfrequenz (f_{n2}) am turbinenläuferseitigen Wälzlager (7) auf einen Bruch der Welle (3) geschlossen wird. Bevorzugt erfolgt mittels Fast-Fourier-Transmission und eines Arithmetik-Prozessors für beide Wälzlager (6, 7) über getrennte Meßkanäle die Bestimmung der Drehfrequenz des jeweiligen Wellenendes unter Rückgriff auf eine oder mehrere typische Wälzlagerfrequenzen, die von diesen Wälzlager bei deren Rotation emittiert werden.



12, 13...FFT-PROCESSOR
16, 17...ARITHMETIC-PROCESSOR
18...COMPARATOR [$f_{n1} < f_{n2}$?]

LEDIGLICH ZUR INFORMATION

Codes zur Identifizierung von PCT-Vertragsstaaten auf den Kopfbögen der Schriften, die internationale Anmeldungen gemäss dem PCT veröffentlichen.

AL	Albanien	ES	Spanien	LS	Lesotho	SI	Slowenien
AM	Armenien	FI	Finnland	LT	Litauen	SK	Slowakei
AT	Österreich	FR	Frankreich	LU	Luxemburg	SN	Senegal
AU	Australien	GA	Gabun	LV	Lettland	SZ	Swasiland
AZ	Aserbaidshjan	GB	Vereinigtes Königreich	MC	Monaco	TD	Tschad
BA	Bosnien-Herzegowina	GE	Georgien	MD	Republik Moldau	TG	Togo
BB	Barbados	GH	Ghana	MG	Madagaskar	TJ	Tadschikistan
BE	Belgien	GN	Guinea	MK	Die ehemalige jugoslawische Republik Mazedonien	TM	Turkmenistan
BF	Burkina Faso	GR	Griechenland	ML	Mali	TR	Türkei
BG	Bulgarien	HU	Ungarn	MN	Mongolei	TT	Trinidad und Tobago
BJ	Benin	IE	Irland	MR	Mauretanien	UA	Ukraine
BR	Brasilien	IL	Israel	MW	Malawi	UG	Uganda
BY	Belarus	IS	Island	MX	Mexiko	US	Vereinigte Staaten von Amerika
CA	Kanada	IT	Italien	NE	Niger	UZ	Usbekistan
CF	Zentralafrikanische Republik	JP	Japan	NL	Niederlande	VN	Vietnam
CG	Kongo	KE	Kenia	NO	Norwegen	YU	Jugoslawien
CH	Schweiz	KG	Kirgisistan	NZ	Neuseeland	ZW	Zimbabwe
CI	Côte d'Ivoire	KP	Demokratische Volksrepublik Korea	PL	Polen		
CM	Kamerun	KR	Republik Korea	PT	Portugal		
CN	China	KZ	Kasachstan	RO	Rumänien		
CU	Kuba	LC	St. Lucia	RU	Russische Föderation		
CZ	Tschechische Republik	LI	Liechtenstein	SD	Sudan		
DE	Deutschland	LK	Sri Lanka	SE	Schweden		
DK	Dänemark	LR	Liberia	SG	Singapur		
EE	Estland						

5

10

Verfahren zum Erkennen eines Wellenbruches in einer Strömungskraftmaschine

15 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Erkennen eines Wellenbruches in einer Strömungskraftmaschine mit dem Ziel, danach eine geeignete drehzahlbegrenzende Maßnahme, insbesondere eine Brennstoffschnellabschaltung bei einer Flug-Gasturbinenanlage, einzuleiten, wobei ein drehmomentabgebender Turbinenläufer und ein drehmomentaufnehmendes Aggregat über die hinsichtlich
20 eines Bruches zu überwachende, im wesentlichen endseitig in zumindest zwei Wälzlagern gelagerte Welle miteinander verbunden sind.

Insbesondere für Flugtriebwerke, aber auch für Industriegasturbinen zur Energieerzeugung sind eine Reihe von Verfahren und Vorrichtungen bekannt
25 geworden, die alle den Zweck verfolgen, daß sie wirksam eine Drehzahlbegrenzung bei nicht mehr erfolgreicher Lastabnahme durch das drehmomentaufnehmende Aggregat gewährleisten. Ziel ist es, ein unkontrolliertes Anwachsen der Drehzahl bis zur Selbstzerstörung der Strömungskraftmaschine, insbesondere Verbrennungs-Strömungskraftmaschine, zu unterbinden und Gefährdungen für Menschen und
30 Sachwerte auszuschließen. Derartig kritische Betriebszustände können sich z. B. bei Energieerzeugungsanlagen in Kraftwerken mit Verbrennungs-Strömungskraftmaschinen bei einer unkontrollierten Trennung zwischen dem Generator und dem elektrischen Landesnetz (Lastabwurf) einstellen. Ebenso kann ein Bruch der

Welle zwischen dem energieabgebenden System, d.h. dem Turbinenläufer und dem energieaufnehmenden System, insbesondere einem Verdichter, zu einem unkontrollierten Drehzahlanstieg des erstgenannten führen. Im Fall eines Flugtriebwerkes bzw. einer Flug-Gasturbinenanlage kann ein solches energieaufnehmendes bzw. drehmomentaufnehmendes System der Fan sein.

Drehzahlbegrenzende Einrichtungen für Flugtriebwerke für den Fall eines Wellenbruches zwischen dem energiekonsumierenden Teil (z.B. dem Verdichter) und dem energieerzeugenden Teil (z.B. dem Turbinenläufer) wurden in einer Reihe von bekannten Erfindungen durch ein mechanisches Wirkprinzip derart gestaltet, daß es zu einer axialen Relativbewegung zwischen dem Leitapparat und den Laufschaufeln des Turbinenläufers dergestalt kommt, daß eine Kollision zwischen dem Leitapparat und den Laufschaufeln erzeugt wird. Bei dieser Kollision (auch „Tangling“ genannt) wird die Rotationsenergie des Turbinenläufers bis zum Stillstand des Turbinenläufers durch Verformung, Reibung und Zerstörung der betroffenen Turbinenbeschaufelung abgebaut. Für dieses Wirkprinzip seien die Patentschriften US 4.505.104, US 4.503.667 und US 4.498.291 als Beispiele genannt.

Eine weitere mechanische Lösung zur Begrenzung von Überdrehzahlzuständen bei einem Wellenbruch zwischen der Niederdruckturbine und dem Fan wird bei Flugtriebwerken mit kleineren Antriebsleistungen angewendet, wobei die Antriebswelle zwischen dem Fan und der Niederdruckturbine mit einer Referenzwelle ausgestattet ist. Kommt es zu einem Wellenbruch, so verändern die gebrochene Antriebswelle und die Referenzwelle ihre Position zueinander. Ein vorgespannter Mitnehmer wird freigegeben und verhakt sich in einer Drahtschlinge. Durch eine resultierende Zugbewegung an der Drahtschlinge infolge der sich weiterdrehenden Niederdruckturbine wird über den Seilzug eine Brennstoffschneellabschaltung realisiert.

30

Hinsichtlich einer elektronischen Lösung der Überdrehzahlproblematik wurde für eine Dampfturbine eine Schaltung in der US 4.474.013 veröffentlicht. Dort werden bis zu vier Geschwindigkeitssensoren verwendet, die redundant arbeiten und zu einer Zahnradwelle angeordnet sind. Die resultierenden Signale der Geschwindigkeits-

sensoren sind proportional zur Drehzahl der Zahnradwelle. Ein entsprechend gestaltetes elektronisches Meßdatensystem ist in der Lage, das Geschwindigkeitssignal zu differenzieren und eine Ableitung in Form der Beschleunigung zu bilden. Bei einer vorausbestimmten Überdrehzahlsituation durch Verarbeitung der ermittelten Beschleunigungswerte und bei Überschreitung einer Drehzahlschwelle wird auf die in Reihe geschalteten Frischdampfventile (ein Stop-Ventil und ein Regelventil) eingewirkt.

Eine weitere elektronische Lösung des Überdrehzahlproblemes für eine Flug-Gasturbinenanlage ist in der US 4.712.372 dargelegt. An der gezahnten Turbinenwelle sind zwei Sensoren angeordnet, die ein der Zähneanzahl der Welle drehzahlproportionales Signal erzeugen. Beide Sensoren arbeiten zueinander redundant, wobei ein Kanal analog und der zweite eine digitale Signalverarbeitung und Signalweiterleitung realisiert. Im Fall einer von beiden Sensoren festgestellten Überdrehzahl-situation wird ein magnetisch gesteuertes Kraftstoffventil angesteuert und die Kraftstoffverstoffversorgung unterbrochen.

Ebenso bekannt geworden ist durch die US 4.635.209 eine elektronische Lösung zur Steuerung von Überdrehzahlzuständen, die eine Dampfturbine betreffen. Dabei wird das Meßprinzip ebenfalls auf ein gepulstes Meßsignal aufgebaut, das an einer Zahnwelle erzeugt wird. Zur Verbesserung der Meßwertgenauigkeit werden drei voneinander unabhängige Meßkanäle an der gleichen Meßstelle eingesetzt. Einer der drei Meßkanäle arbeitet mit einer Überwachungsfunktion. Jeder der Meßkanäle kommuniziert über einen programmierbaren Computer.

Die bereits bekannten und veröffentlichten Systeme zur Überwachung und Begrenzung von Überdrehzahlzuständen unterteilen sich somit in mechanische und elektromechanische/elektronische Systeme.

Ein kommerzieller Nachteil für ein dergestalt zu lösendes Problem besteht daher in der Vielzahl der verwendeten Systeme, die an die konkreten Bedingungen des jeweiligen Flugtriebwerkes auslegungsseitig neu angepaßt werden müssen. Bei Flugtriebwerken, die nach dem Tangling-Prinzip einen Wellenbruch zwischen Fan und Niederdruckturbine sicher abfangen, ist stets mit dem Totalverlust der

Beschaufelung bei entsprechendem hohen Wiederbeschaffungskosten zu rechnen. Ein mechanisches System mit einer Referenzwelle ist im Anforderungsfall zumindest dem teilweisen Verlust von Komponenten unterworfen, neben dem Umstand, daß ein solches System zusätzliche Masse für das Triebwerk bedeutet, was bei einem Flugtriebwerk selbstverständlich unerwünscht ist.

Das Masse-Kostenverhältnis mechanischer Lösungen zur Realisierung der geforderten Funktion einer Sicherheitsabschaltung bei einem Wellenbruch zwischen Fan und Niederdruckturbine ist aus Sicht der Herstellkosten und der Betriebskosten als nachteilig einzustufen. Elektromechanische oder elektronische Lösungen sind aus dem Blickwinkel der Gesamtkosten hier klar im Vorteil.

Bisherig bekannt gewordene elektromechanische und elektronische Lösungsvorschläge wurden bislang nur zur Überwachung einer Soll-Drehzahl von Rotoren verwendet. Wellenbrüche können mit derartigen Systemen bisher nicht erkannt werden. Insbesondere Flug-Gasturbinen größerer Leistungsklassen und Turbinen von industriellen Energierzeugungsanlagen, bei denen der Leichtbau keine Rolle spielt, verfügen über ein ausreichend hohes Trägheitsmoment, sodaß genügend Zeit verbleibt, um mit konventionellen elektromechanischen und elektronischen Methoden (Drehzahlmeßverfahren und Stellglieder) bei entsprechend großen Tot- und Verzugszeiten einer Überdrehzahl entgegenzusteuern. Derartig angewendete Drehzahlmeßverfahren beruhen auf der Aufsummierung diskreter Einzelimpulse über einen Meßzeitraum. Für Flugtriebwerke kleinerer Antriebsleistungen wurden die bekannten elektromechanischen und elektronischen Verfahren bisher als technisch ungeeignet eingestuft, da sie in Verbrennungs-Strömungskraftmaschinen mit sehr kleinen Trägheitsmomenten im Anforderungsfall nicht schnell genug reagieren. Der erforderliche Meßzeitraum ist zu groß im Verhältnis zur Zeit, die verbleibt, um bei einem Wellenbruch bei kleineren Triebwerken schnell genug einen solchen Zustand zu erkennen, das erforderliche Stellsignal zu bilden und die Schnellabschaltung auszuführen.

Bisher bekannt gewordene Meßeinrichtungen für die Drehzahl und deren abgeleitete Größen, wie Winkelgeschwindigkeit und Winkelbeschleunigung, besitzen weiterhin eine zu geringe Empfindlichkeit bzw. Meßauflösung, so daß ein verwertbares

Meßsignal nicht schnell genug für die Auslösung einer Schnellabschaltung und Drehzahlbegrenzung bereitgestellt werden kann.

5 Ein demgegenüber verbessertes, insbesondere kostengünstiges und sicheres Verfahren zum Erkennen eines Wellenbruches in einer Strömungskraftmaschine aufzuzeigen, ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung.

Die Lösung dieser Aufgabe ist dadurch gekennzeichnet, daß die Drehfrequenzen der beiden Wellenenden in den Wälzlagern der hinsichtlich eines Bruches zu überwachenden Welle kontinuierlich und im wesentlichen in Echtzeit ermittelt und
10 miteinander verglichen werden, und daß bei einer gegenüber der Drehfrequenz am Wälzlager des drehmomentaufnehmenden Aggregates höheren Drehfrequenz am turbinenläuferseitigen Wälzlager auf einen Bruch der Welle geschlossen wird.

Vorteilhafte Weiterbildungen sind Inhalt der Unteransprüche, insbesondere sind
15 hierin auch vorteilhafte Merkmale einer bevorzugten Vorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens angegeben.

Die vorliegende Erfindung betrifft vorzugsweise das Problem eines Wellenbruches zwischen dem Fan als drehmomentaufnehmendem Aggregat und dem drehmomentabgebenden Niederdruck-Turbinenläufer eines Flugtriebwerkes bzw.
20 einer Flug-Gasturbinenanlage und die erforderliche Drehzahlbegrenzung des Niederdruck-Turbinenläufers, ist jedoch analog an jeder beliebigen Strömungskraftmaschine einsetzbar. Dabei ist es Ziel, ein solches Verfahren und die dazugehörige Vorrichtung zu verwenden, das auf einer elektromechanischen/
elektronischen Ausführung basiert.

25 Erfindungsgemäß soll daher an einer Welle einer Strömungskraftmaschine, die im wesentlichen jeweils endseitig in Wälzlagern gelagert ist, die Drehfrequenz des jeweiligen Wellenendes im jeweiligen Wälzlager bestimmt werden. Unterscheiden sich die Drehfrequenzen der beiden Wellenenden signifikant voneinander, so liegt
30 offensichtlich ein Wellenbruch vor, so daß daraufhin eine geeignete drehzahlbegrenzende Maßnahme eingeleitet wird.

Zwar erscheint dieser Vorschlag auf den ersten Blick relativ einfach, jedoch sind die Anforderungen an die Meßtechnik und an die zugehörige Auswerteelektronik äußerst

hoch, um die erforderliche Sicherheit bspw. für das Flugtriebwerk zu gewährleisten. Der gesamte Drehfrequenz-Ermittlungsprozess muß nämlich äußerst schnell ablaufen, d.h. die Ermittlung der Drehfrequenzen und die weitere Auswertung sollte in Echtzeit erfolgen, um möglichst kurzfristig auf einen so festgestellten Wellenbruch reagieren zu können. Daher ist bevorzugt für jedes Wälzlager ein getrennt funktionierender Meßkanal zur Bestimmung der Drehfrequenz des jeweiligen Wellenendes in den Wälzlagern vorhanden, wobei die beiden Meßkanäle in einem Komperator zwecks Vergleiches der Drehfrequenzen zusammengeführt werden, und wobei die Meßsignalgewinnung, deren Weiterleitung und Verarbeitung bis hin zum Vergleich beider Drehfrequenzen im Echtzeitbereich abläuft. Ebenso in Echtzeit kann dann eine elektrische Stellgröße gebildet werden, die bei einer signifikanten Abweichung zwischen den beiden Drehfrequenzen unverzüglich die geeignete drehzahlbegrenzende Maßnahme einleitet, so beispielsweise ein Brennstoffschnellschlußventil schließt.

15

Nun bestehen verschiedene Möglichkeiten zur Ermittlung der Drehfrequenzen der Wellenenden in ihren Wälzlagern, wobei jedoch gängige Drehzahlsensoren zumeist zu langsam arbeiten, als daß der gesamte Prozeß in Echtzeit durchgeführt werden könnte. Daher kann mittels eines Arithmetik-Prozessors und unter Verwendung einer Fast-Fourier-Transformation für beide Wälzlager über getrennte Meßkanäle die Bestimmung der Drehfrequenz des jeweiligen Wellenendes unter Rückgriff auf eine oder mehrere typische Wälzlagerfrequenzen erfolgen, die von diesen Wälzlagern bei deren Rotation emittiert werden. Ein solches Meßverfahren zeichnet sich durch höchste Schnelligkeit und eine der Luftfahrt adäquate Sicherheit aus. Bevorzugt können hierzu über eine Filtereinheit echtzeitgerecht für beide Wälzlager die Rotationsfrequenz des Wälzlager-Käfigs und/oder die Überrollfrequenz des Wälzlager-Außenrings und/oder die Überrollfrequenz des Wälzlager-Innenrings und/oder die Wälzkörperrotationsfrequenz festgestellt und hieraus die Drehfrequenzen der in den Wälzlagern gelagerten Wellenenden getrennt bestimmt werden.

30

Ehe dieses Verfahren anhand eines bevorzugten Ausführungsbeispiels näher erläutert wird sollen jedoch zunächst die physikalischen Gesetzmäßigkeiten, auf denen das verwendete Meßprinzip beruht, beschrieben werden:

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, daß sich die kraftübertragende Welle zwischen dem Fan und dem Niederdruck-Turbinenläufer im wesentlichen an den beiden Wellenenden auf Wälzlagern abstützt. Die Rollbewegungen der Wälzkörper im Wälzlagerkäfig erzeugen auf deren Laufflächen periodische Druckkräfte. Infolge der hervorgerufenen Deformationen entstehen periodische Schwingungen. Imperfektionen (z.B. Pitting-Bildung) an den überrollten Flächen wirken vorteilhafterweise verstärkend auf die auftretenden Schwingungen.

Für Wälzlager wurden von Sturm, A. et al. in „Wälzlagerdiagnose an Maschinen und Anlagen“, veröffentlicht vom Verlag TÜV Rheinland GmbH 1986 in Köln, die Zusammenhänge zwischen der Lagergeometrie und den typischen Emissionsfrequenzen eines Wälzlagers wie im Folgenden wiedergegeben dargestellt. Dabei wird auf die beigefügten Figuren 2 bis 4 verwiesen, die der genannten Literaturstelle entnommen sind.

Figur 2 zeigt die Geometrie und die Bewegungsverhältnisse an einem Schrägkugellager unter Verwendung folgender Bezugsziffern bzw. Bezeichnungen:

1 = Außenring, 2 = Kugel, 3 = Innenring

v_A = Umfangsgeschwindigkeit des Berührungspunktes A

v_{KA}, v_W = Umfangsgeschwindigkeit des Wälzkörpermittelpunktes W

v_I = Umfangsgeschwindigkeit des Berührungspunktes I

v_{IR} = Umfangsgeschwindigkeit der Innenringwälzfläche

ω_{IR} = Winkelgeschwindigkeit des Innenringes

α_B = Druckwinkel

n = Drehzahl

In Figur 3 sind die Krümmungsradien eines Rillenkugellagers mit folgenden Bezeichnungen dargestellt:

r_a = Krümmungsradius der Außenringwälzbahn

r_i = Krümmungsradius der Innenringwälzbahn

r_0 = Abstand der Krümmungsmittelpunkte

D_W = Durchmesser des Wälzkörpers

Figur 4 schließlich gibt die Bestimmung des Nenndruckwinkels α_0 und des Betriebsdruckwinkels α_B für Schrägkugellager wieder.

- 5 Damit ergeben sich für Wälzlager die folgenden in Form von Gleichungen (A) bis (E) angegebenen charakteristischen Frequenzen für den Fall des idealen Rollens:

(A): Rotationsfrequenz des Käfigs: $f_{k,i} = \frac{1}{2} f_n \cdot \left(1 - \frac{D_W}{D_T} \cos \alpha_B \right)$

(B): Überrollfrequenz des Außenringes: $f_A = \frac{1}{2} f_n \cdot z \cdot \left(1 - \frac{D_W}{D_T} \cos \alpha_B \right)$

(C): Überrollfrequenz des Innenringes: $f_I = \frac{1}{2} f_n \cdot z \cdot \left(1 + \frac{D_W}{D_T} \cos \alpha_B \right)$

10 (D): Wälzkörperrotationsfrequenz: $f_{w,A} = \frac{1}{2} f_n \cdot \frac{D_T}{D_W} \cdot \left[1 - \left(\frac{D_W}{D_T} \cdot \cos \alpha_B \right)^2 \right]$

(E): Überrollfrequenz einer Kugelunregelmäßigkeit auf beiden Wälzbahnen:

$$f_W = 2 f_{w,A} = f_n \cdot \frac{D_T}{D_W} \left[1 - \left(\frac{D_W}{D_T} \cdot \cos \alpha_B \right)^2 \right]$$

Dabei wird in den Gleichungen (A) bis (E) mit f_n die Drehfrequenz des jeweiligen Wellenendes im Wälzlager und mit z die Wälzkörperanzahl bezeichnet.

- 15 Für ein Rillenkugellager mit radialer und axialer Belastung gilt für den sog. Betriebsdruckwinkel α_B gemäß Figuren 3 und 4 der folgende Zusammenhang:

$$\sin \alpha_B = \frac{\sin \alpha_0 + \Delta a / r_0}{\sqrt{\cos^2 \alpha_0 + (\sin \alpha_0 + \Delta a / r_0)^2}}$$

Im Übrigen genügen Wälzlager ohne axiale Belastung ebenfalls den Gleichungen (A) bis (E), wobei $\alpha_B = 90^\circ$ gilt.

20

Weitere Bestandteile des Schwingungsspektrums können auch durch Anregungen außerhalb des Wälzlagers hervorgerufen werden. Als permanente konstante Resonanzen bilden sich die Geber- und die Koppelresonanz ab. Ein typisches Schwingungsspektrum für ein Wälzlager mit einem Beschleunigungsaufnehmer als

- 25 Meßsignalaufnehmer zeigt Figur 5.

Die nähere Beschreibung der Erfindung erfolgt nun anhand eines bevorzugten Ausführungsbeispiels an einem zweiwelligen Flugtriebwerk bzw. an einer grundsätzlich üblichen Zweiwellen-Flug-Gasturbinenanlage, die stark vereinfacht in Fig. 6 dargestellt ist:

Das in Fig.6 dargestellte Flugtriebwerk besteht aus einem Hochdrucksystem 1 und einem Niederdrucksystem 2, die mit Wellen 3 und 4 zur Kraftübertragung ausgestattet sind. Die beiden Wellen 3, 4 sind mechanisch nicht miteinander verbunden und drehen sich somit unabhängig voneinander. Das Niederdrucksystem 2 besteht aus dem Fan 2a, dem Rotor der Boosterstufe 2b und dem Niederdruck-Turbinenläufer 2c, die über die Welle 3 miteinander verbunden sind. Über die Welle 4 hingegen sind der Hochdruckkompressorläufer 1a und der Hochdruck-Turbinenläufer 1b miteinander verbunden.

Kommt es - was in der Praxis jedoch äußerst unwahrscheinlich ist - aufgrund von Überbeanspruchung infolge eines äußeren Ereignisses wie Vogelschlag, Werkstoffermüdung oder anderer Ursachen zu einem Bruch der Welle 3, so ist der Niederdruck-Turbinenläufer 2c ohne Last. Die Folge hiervon wäre ein unkontrolliert schnelles Anwachsen der Drehzahl des Niederdruck-Turbinenläufers 2c. Ungünstigstenfalls könnte dann innerhalb kurzer Zeit die maximal zulässige Drehzahl für den Niederdruck-Turbinenläufer 2c überschritten werden. Infolge der zentrifugalen Überbeanspruchung und der nicht mehr ausreichenden Festigkeit könnte es dann möglicherweise zu einer Zerstörung durch plötzliches Explodieren des Niederdruck-Turbinenläufers 2c kommen.

Diese Probleme können dadurch vermieden werden, daß bei einem Bruch der Welle 3 eine unmittelbare, nahezu verzögerungsfreie Brennstoffschnellabschaltung initiiert wird, um hierdurch der Niederdruckturbine 2c keine weitere Energie zuzuführen. Infolge der inneren Reibungsvorgänge im Flugtriebwerk wird der Niederdruck-Turbinenläufer 2c bis hin zum Stillstand abgebremst. Das dazu vorgeschlagene Verfahren und die dazu notwendige Vorrichtung ist der Figur 1 zu entnehmen, worin nochmals das Flugtriebwerk sowie in einem vereinfachten Flußdiagramm das

erfindungsgemäße Verfahren zum Erkennen eines Wellenbruches und zur bejahendenfalls durchzuführenden Brennstoffschnellabschaltung dargestellt ist.

Wie ersichtlich, ist die Welle 3 auf der Seite des Drehmomentaufnehmenden
5 Aggregates in Form des Fans 2a und der Boosterstufe 2b über ein als Rillenkugellager ausgebildetes Wälzlager 6 gelagert. Auf der Seite des Drehmomentabgebenden Niederdruck-Turbinenläufers 2c ist die Welle 3 über ein Wälzlager 7 mit zylindrischen Wälzkörpern gelagert.

10 Am fanseitigen Wälzlager 6 sind zwei Meßsignalaufnehmer 8a und 8b in Form von Beschleunigungsaufnehmern angekoppelt. Auch am turbinenläuferseitigen Wälzlager 7 sind zwei derartige als Beschleunigungsaufnehmer ausgebildete Meßsignalaufnehmer 9a und 9b vorgesehen. Dabei ist insbesondere aus Gründen einer verbesserten Funktionszuverlässigkeit die genannte redundante Anordnung der
15 Beschleunigungsaufnehmer an den Wälzlagern 6, 7 vorgesehen. Somit ist bei Ausfall eines einzelnen Beschleunigungsaufnehmers 8a oder 8b bzw. 9a oder 9b ein zweiter solcher vorhanden, der ein Meßsignal bereitstellt.

Für die beiden Wälzlager 6 und 7 ist jeweils ein separater Meßkanal in identischer
20 Ausführung vorgesehen. Da nur ein einziges Meßsignal pro Wälzlager 6 bzw. 7 benötigt wird, werden die beiden Meßsignalaufnehmer 8a und 8b auf ein ODER-Glied 10 aufgeschaltet. In analoger Weise ist für die Meßsignalaufnehmer 9a und 9b ein ODER-Glied 11 zuständig.

25 Diese ODER-Glieder 10 und 11 verläßt jeweils ein komplexperiodisches Meßsignal im Zeitbereich, das den jeweiligen Wälzlagern 6 und 7 zuzuordnen ist. Mittels einer Fast-Fourier-Transmission (wie üblich "FFT" genannt) werden anschließend die anstehenden Signalfunktionen $\{f(t) = f(t + nT), n = 0; 1; 2 \dots\}$ vom Zeitbereich in den Frequenzbereich gewandelt. Wie üblich bezeichnet dabei "t" einen Zeitpunkt
30 und "T" die Periodendauer der periodischen Funktion.

Die Grundgleichungen für ein fouriertransformiertes komplexperiodisches Meßsignal sind dem entsprechenden Fachmann bekannt und werden daher hier nicht wiedergegeben. Erwähnt sei lediglich, daß die Fouriertansformation durch die FFT-Prozessoren 12 und 13 vorgenommen wird.

- Die Fourier-transformierte Meßfunktion liegt nun in Form der Frequenzdarstellung vor. Würde hingegen die Berechnung als diskrete Fourier-Transformation erfolgen, so läge der Rechenaufwand nicht mehr im echtzeitfähigen Bereich. Daher verwendet man Rekursionsformeln, die den Rechenaufwand um den Faktor 10^3 verkürzen. Ausgereifte Verfahren für diese Fast-Fourier-Transformation stehen in unterschiedlichen Versionen zur Verfügung. Durch die FFT-Prozessoren 12 und 13 wird diese Aufgabe echtzeitgerecht abgewickelt.
- 10 Anschließend passieren die so aufbereiteten Meßwertfunktionen, die eine erhebliche Datenreduktion ohne Informationsverlust erfahren haben, die Filter 14 und 15. Dabei sind diese Filter 14, 15 so ausgelegt, daß sie nur ein Frequenzband von 0 Hz bis zur maximalen Frequenz passieren lassen, die sich nach der weiter oben (in Zusammenhang mit den Figuren 2 - 4) angegebenen Gleichung (C), die die
- 15 Überrollfrequenz des Wälzlager-Innenringes wiedergibt, ermittelt. Dabei entspricht der Wert f_n in dieser Gleichung (C) der maximal zulässigen Drehfrequenz des Niederdruck-Turbinenläufers 2c. Die genannte Filterung erfolgt dabei nahezu verzögerungsfrei unter Echtzeitbedingungen.
- 20 Das vorverarbeitete und gefilterte Meßwterergebnis wird dann den Arithmetikprozessoren 16 und 17 zur Verfügung gestellt. Beide Arithmetikprozessoren 16 und 17 arbeiten unabhängig voneinander und haben eine Datenverarbeitungsgeschwindigkeit, die Echtzeitanforderungen gerecht wird. Durch die Arithmetikprozessoren 16 und 17 können durch nicht näher beschriebene
- 25 Berechnungsverfahren aus den zur Verfügung gestellten Amplitudenspektren jeweils für die Wälzlager 6 und 7 die folgenden Werte ermittelt werden, nämlich
- die Rotationsfrequenz des Käfigs,
 - die Überrollfrequenz des Außenringes,
 - die Überrollfrequenz des Innenringes und
 - die Wälzkörperrotationsfrequenz.
- 30

Aus diesen voranstehend aufgelisteten Frequenzen errechnen die Arithmetikprozessoren 16 und 17 nach den weiter oben angegebenen Gleichungen (A) bis (D)

jeweils gesondert die Drehfrequenz f_{n1} am Wälzlager 6 sowie die Drehfrequenz f_{n2} am Wälzlager 7. Dabei entspricht die Drehfrequenz f_{n1} derjenigen des drehmomentaufnehmenden Aggregates bzw. Fan's 2a und die Drehfrequenz f_{n2} derjenigen des Niederdruck-Turbinenläufers 2c.

5

Aufgrund der Physik des Meßprozesses handelt es sich hierbei um vier zueinander redundante Frequenzinformationen, die alle auf die sog. Anregungsfrequenz f_n zurückgeführt werden können. Somit weist das Meßsignal an sich einen hohen Sicherheitsstandard hinsichtlich Redundanz und Genauigkeit der Meßinformation auf.

10

Aufgrund der Normalverteilung des Meßfehlers statistischer Meßprozesse können die Arithmetikprozessoren 16 und 17 einem Vergleich der nach den Gleichungen (A) bis (D) bestimmten Drehfrequenzen für die Wälzlager durchführen, wobei eine vorher definierte Streubreite nicht überschritten werden darf.

15

Bevorzugt wird die Gauß'sche Methode der kleinsten Fehlerquadrate zur Bestimmung der Effektivwerte f_{n1} und f_{n2} und der Standardabweichungen σ_1 und σ_2 der Meßergebnisse angewandt, die dann für eine anschließende Bewertung zugrunde gelegt werden. Damit liegt für beide Wälzlager 6, 7 die Drehfrequenzinformation in der Form $\{ f_{n1} \pm \sigma_1 \}$ und $\{ f_{n2} \pm \sigma_2 \}$ vor.

20

Diese beiden Informationen werden daraufhin zur Bewertung einem Komperator 18 zugeführt, der ebenfalls echtzeitfähig ist. Dabei ist es nicht erheblich, ob der Vergleich beider Drehfrequenzen f_{n1} , f_{n2} , mittels Hardware oder/und Software realisiert wird. Wesentlich ist nur die echtzeitgerechte Verarbeitung der Informationen. Im Ergebnis des Vergleiches werden die Drehfrequenzen $\{ f_{n1} \pm \sigma_1 \}$ und $\{ f_{n2} \pm \sigma_2 \}$ als gleich bewertet, wenn eine Überlappung der Meßverteilungen in den nachfolgend beschriebenen Grenzen festgestellt wird.

25

Die Fälle $\{ f_{n1} + \sigma_1 \} = \{ f_{n2} - \sigma_2 \}$ und $\{ f_{n2} + \sigma_2 \} = \{ f_{n1} - \sigma_1 \}$ gelten dabei als Grenzfälle der Übereinstimmung.

30

Liegt nun gemäß den vorangestellten Bedingungen eine Übereinstimmung der Drehfrequenz f_{n1} des Fan's 2a und der Drehfrequenz f_{n2} des Turbinenläufers 2c vor, so besteht keine Veranlassung, eine geeignete drehzahlbegrenzende Maßnahme,

insbesondere eine Schnellabschaltung bezüglich des der Brennkammer 23 des Flugtriebwerkes zugeführten Brennstoffes vorzunehmen.

Sollte allerdings der Vergleich ergeben, daß $\{f_{n1} + \sigma_1\}$ kleiner als ($<$) $\{f_{n2} - \sigma_2\}$ ist, so kann davon ausgegangen werden, daß ein Bruch der Welle 3 stattgefunden hat.

5 Dieser Zustand erfordert dann die Einleitung einer drehzahlbegrenzenden Maßnahme, insbesondere die Sicherheitsschnellabschaltung der Brennstoffzufuhr, die mittels einer Brennstoff-Ringleitung 19 erfolgt.

Dabei ist der Zufluß zu der Brennstoff-Ringleitung 19 mit einem Kraftstoff-
10 Schnellschlußventil 20 ausgerüstet. Dieses mit einem nicht näher dargestellten elektromagnetischen Stellantrieb 22 versehene Kraftstoff-Schnellschlußventil 20 wird mittels einer Feder 21 im elektrisch spannungslosen Zustand stets geschlossen gehalten.

Bei einer Übereinstimmung der Drehfrequenzen f_{n1} , f_{n2} bzw. $\{f_{n1} + \sigma_1\}$, $\{f_{n2} - \sigma_2\}$ der
15 an beiden Wälzlagern 6 und 7 wird somit das Kraftstoff-Schnellschlußventil 20 unter elektrischer Spannung gehalten und ist im geöffneten Zustand.

Tritt jedoch der Fall $f_{n1} < f_{n2}$ bzw. $\{f_{n1} + \sigma_1\} < \{f_{n2} - \sigma_2\}$ ein, so wird ein Stellsignal durch den Komperator 18 gebildet, das umgehend und ohne Verzögerung den
20 spannungslosen Zustand am Magnet-Stellantrieb 22 herstellt. Das Kraftstoff-Schnellschlußventil 20 schließt dann augenblicklich unter der Wirkung der Vorspannkraft der Feder 21. Resultierend erlöscht der Verbrennungsprozeß in der Brennkammer 23, nachdem dann kein weiterer Brennstoff zugeführt wird. Über interne Reibungsvorgänge wird der Niederdruck-Turbinenläufer 2c daraufhin an
25 einem weiteren unkontrollierten Anstieg seiner Drehzahl gehindert und bis zum Stillstand abgebremst.

Mit dem beschriebenen Verfahren ist es somit möglich, die Verzögerungszeit von elektronischen/elektrischen Systemen zur Drehzahlbegrenzung einer Strömungskraftmaschine derart zu verringern, daß sie auch für solche und insbesondere für
30 Flug-Gasturbinenanlagen mit geringen Trägheitsmomenten eingesetzt werden können. Eine Ansprechverzögerung für die Drehzahlbegrenzung und Sicherheits-

schnellabschaltung in Höhe vergleichbarer direkt wirkender mechanischer Systeme für Flugtriebwerke schafft die Voraussetzung für folgende Vorteile:

- signifikant geringerer Masseinsatz bei den Bauteilen zur Sicherung der Funktion Drehzahlbegrenzung/Sicherheitsschnellabschaltung bei Wellenbruch zwischen Fan und Niederdruckturbine,
- aufgrund der Masseneinsparung ergeben sich geringere Betriebskosten für Flugtriebwerke,
- besseres Masse-Kostenverhältnis im Vergleich zu mechanisch wirkenden Drehzahlbegrenzungseinrichtungen/Sicherheitsschnellabschaltung,
- Sicherstellung der Funktion ohne unnötige Zerstörung von Bauteilen und Baugruppen zum Aufbau der Zwangskräfte zum Abbremsen und zum Abbau der überschüssigen Rotationsenergie,
- kostengünstiger realisierbar als bestehende mechanische Lösungen,
- Anwendung des Kommonalitätskonzeptes für Hersteller von Triebwerksfamilien
- keine sicherheitsbedingten Kompromisse hinsichtlich der Aerodynamik von Turbinenbeschaufelungen,
- geringere Betriebskosten aufgrund des besseren spezifischen Brennstoffverbrauches bei optimal aerodynamisch gestalteter Beschaufelung der Niederdruckturbine
- das beschriebene Verfahren bzw. eine nach diesem Verfahren arbeitende Vorrichtung ist nachrüstbar.

Eine vergleichbare Zuverlässigkeit gegenüber direkt wirkenden Systemen ist abgesichert durch entsprechende Redundanzen der Meßstellen, der Meßsignalinformationen und deren Verarbeitung. Dabei können durchaus eine Vielzahl von Details auch abweichend vom beschriebenen Ausführungsbeispiel gestaltet sein, ohne den Inhalt der Patentansprüche zu verlassen.

Patentansprüche

- 5 1. Verfahren zum Erkennen eines Wellenbruches in einer Strömungs-
kraftmaschine mit dem Ziel, danach eine geeignete drehzahlbegrenzende
Maßnahme, insbesondere eine Brennstoffschnellabschaltung bei einer Flug-
Gasturbinenanlage, einzuleiten, wobei ein drehmomentabgebender Tur-
binenläufer und ein drehmomentaufnehmendes Aggregat über die
10 hinsichtlich eines Bruches zu überwachende, im wesentlichen endseitig in
zumindest zwei Wälzlager (6, 7) gelagerte Welle (3) miteinander verbunden
sind,
dadurch gekennzeichnet, daß die Drehfrequenzen (f_{n1} , f_{n2}) der beiden
Wellenenden in den Wälzlager (6, 7) kontinuierlich und im wesentlichen in
15 Echtzeit ermittelt und miteinander verglichen werden, und daß bei einer
gegenüber der Drehfrequenz (f_{n1}) am Wälzlager (6) des
drehmomentaufnehmenden Aggregates höheren Drehfrequenz (f_{n2}) am
turbinenläuferseitigen Wälzlager (7) auf einen Bruch der Welle (3)
geschlossen wird.
- 20
2. Verfahren nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, daß für jedes Wälzlager (6, 7) ein getrennt
funktionierender Meßkanal zur Bestimmung der Drehfrequenz (f_{n1} , f_{n2}) des
jeweiligen Wellenendes in den Wälzlager (6, 7) vorhanden ist und die
25 beiden Meßkanäle in einem Komperator (18) zwecks Vergleiches der
Drehfrequenzen (f_{n1} , f_{n2}) zusammengeführt werden, wobei die Meßsig-
nalgewinnung, Weiterleitung und Verarbeitung bis hin zum Vergleich beider
Drehfrequenzen (f_{n1} , f_{n2}) im Echtzeitbereich abläuft und in Echtzeit eine
elektrische Stellgröße gebildet wird, die bei einer signifikanten Differenz
30 zwischen den beiden Drehfrequenzen (f_{n1} , f_{n2}) unverzüglich die genannte
geeignete drehzahlbegrenzende Maßnahme einleitet, insbesondere ein
Brennstoffschnellschlußventil (20) unverzüglich schließt.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei das an den Wälzlager (6, 7) mittels Meßsignalaufnehmern (8a, 8b, 9a, 9c) ermittelte Meßsignal eine Redundanz in der Meßinformation enthält und vorzugsweise ein komplex-periodisches Signal ist.
- 5
4. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei das komplexperiodische Meßsignal $\{ f(t) = f(t + nT) \}$ mit $n = 0; 1; 2 \dots \}$ vom Zeitbereich in den Frequenzbereich mittels Fast Fourier Transformation echtzeitgerecht in ein Amplitudenspektrum überführt wird.
- 10
5. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei über eine Filtereinheit (14, 15) echtzeitgerecht für beide Wälzlager (6, 7) die Rotationsfrequenz des Wälzlager-Käfigs und/oder die Überrollfrequenz des Wälzlager-Außenrings und/oder die Überrollfrequenz des Wälzlager-Innenrings und/oder die Wälzkörperrotationsfrequenz festgestellt und hieraus die Drehfrequenzen (f_{n1} ; f_{n2}) der in den Wälzlager (6, 7) gelagerten Wellenenden bestimmt werden.
- 15
6. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei echtzeitgerecht mittels eines Arithmetik-Prozessors (16, 17) für beide Wälzlager (6, 7) über getrennte Meßkanäle die Bestimmung der Drehfrequenz (f_{n1} ; f_{n2}) des jeweiligen Wellenendes unter Rückgriff auf eine oder mehrere typische Wälzlagerfrequenzen erfolgt, die von den Wälzlager (6, 7) bei deren Rotation emittiert werden.
- 20
7. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei bei Verwendung von mehr als einer typischen Wälzlagerfrequenz die Bestimmung der Drehfrequenzen (f_{n1} ; f_{n2}) nach der Gauß'schen Methode der kleinsten Fehlerquadrate in der Form ($f_{n1} \pm \sigma_1$) und ($f_{n2} \pm \sigma_2$) erfolgt.
- 25
8. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei im möglichen Drehzahlbereich der beiden Wälzlager (6, 7) bei Auftreten einer signifikanten Differenz zwischen den beiden Drehfrequenzen (f_{n1} ; f_{n2}) ein
- 30

Schnellschluß des ansonsten unter elektrischer Spannung stehenden und dabei geöffnet Brennstoffschnellschlußventils (20) durch unverzügliche Spannungsschaltung erfolgt.

- 5 9. Verfahren nach Anspruch 7 und 8,
dadurch gekennzeichnet, daß im möglichen Drehzahlbereich der beiden
Wälzlager (6, 7) von $\{ f_{n2} + \sigma_2 = f_{n1} - \sigma_1 \}$ bis $\{ f_{n1} + \sigma_1 = f_{n2} - \sigma_2 \}$ das
Brennstoffschnellschlußventil (20) unter elektrischer Spannung steht und
geöffnet ist und daß ein Schnellschluß des Brennstoffschnellschlußventils
10 (20) durch unverzügliche Spannungsschaltung erfolgt, wenn die Bedin-
gung $\{ f_{n1} + \sigma_1 < f_{n2} - \sigma_2 \}$ erfüllt ist.
10. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorangegan-
genen Ansprüche, wobei an beiden Wälzlagern (6, 7) jeweils zumindest zwei
15 Meßsignalaufnehmer (8a, 8b, 9a, 9c) angebracht sind, deren Anordnung
und Funktion je Wälzlager (6, 7) redundant ausgeführt ist und wobei es sich
bei den Meßsignalaufnehmern (8a, 8b, 9a, 9c) um Geschwindigkeits- oder
Beschleunigungsaufnehmer jeweils gleichen Typs handelt.
- 20 11. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorangegan-
genen Ansprüche, wobei das drehmomentaufnehmenden Aggregat (6) ein
Verdichter, ein Fan, ein Booster, ein Propeller oder eine Kombination
hiervon ist.
- 25 12. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorangegan-
genen Ansprüche, wobei das Brennstoff-Schnellschlußventil (20)
federbelastet ist und mittels einer stromdurchflossenen elektromagnetischen
Stelleinrichtung (22) im geöffneten Zustand gehalten wird.

FIG. 1

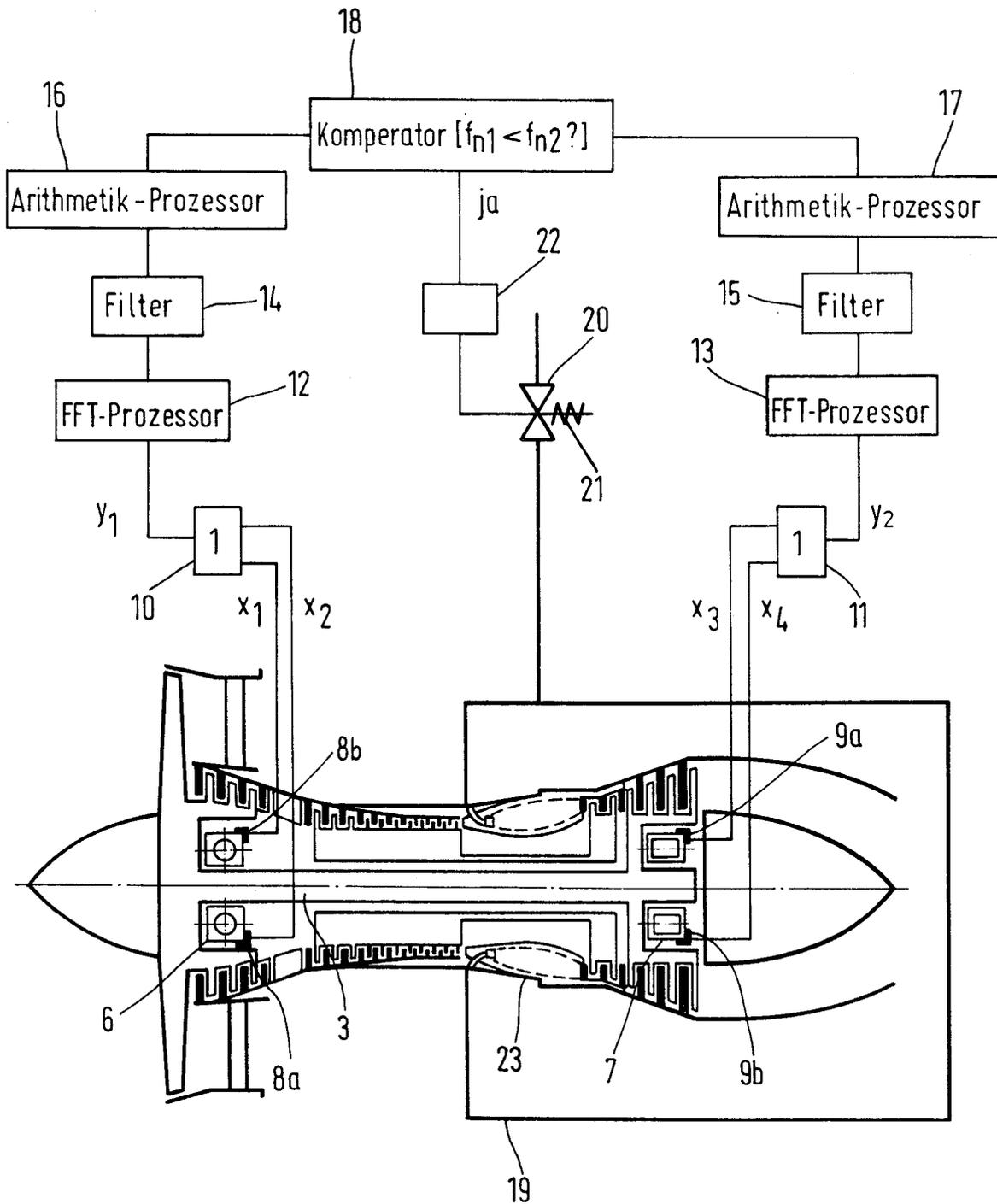


FIG. 2

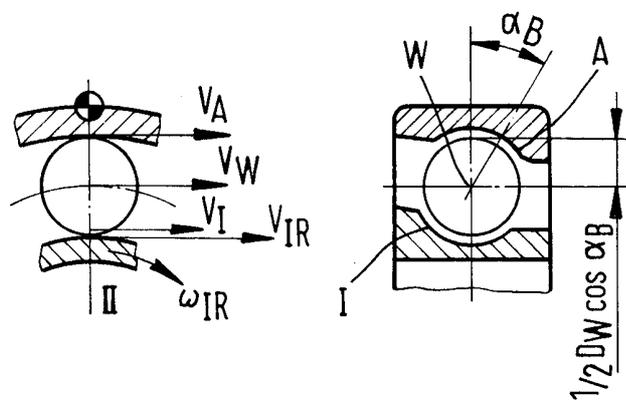
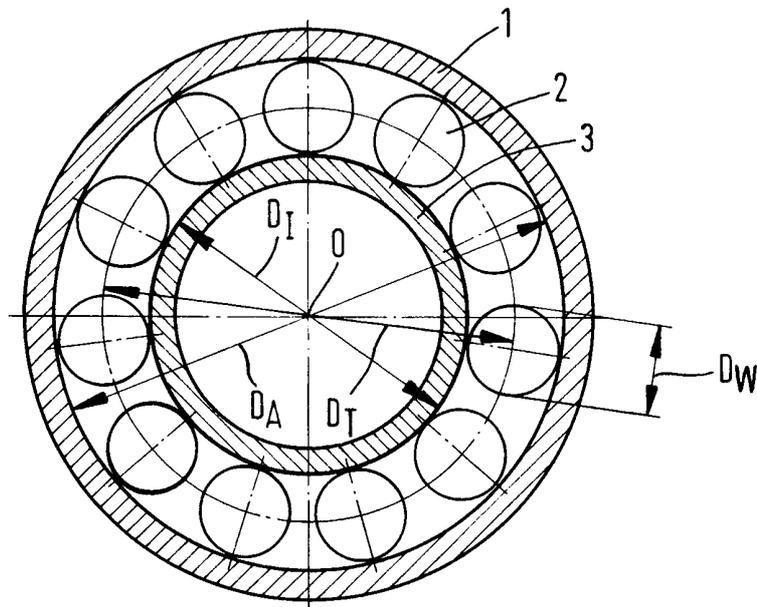


FIG. 3

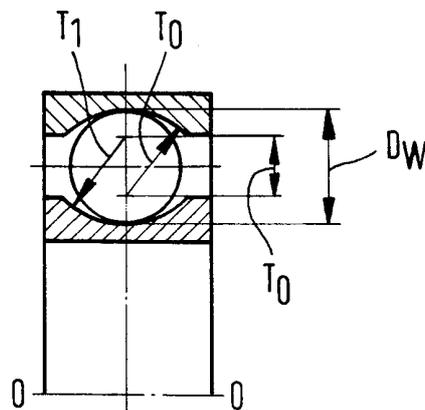


FIG. 4

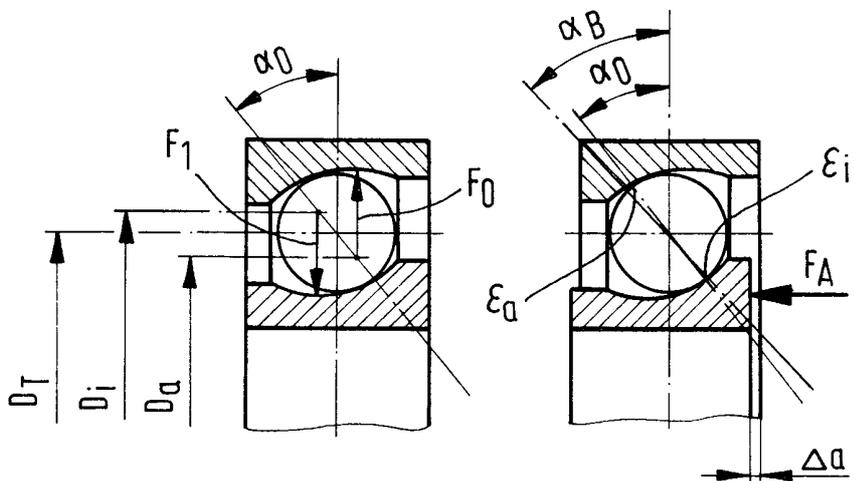


FIG. 5

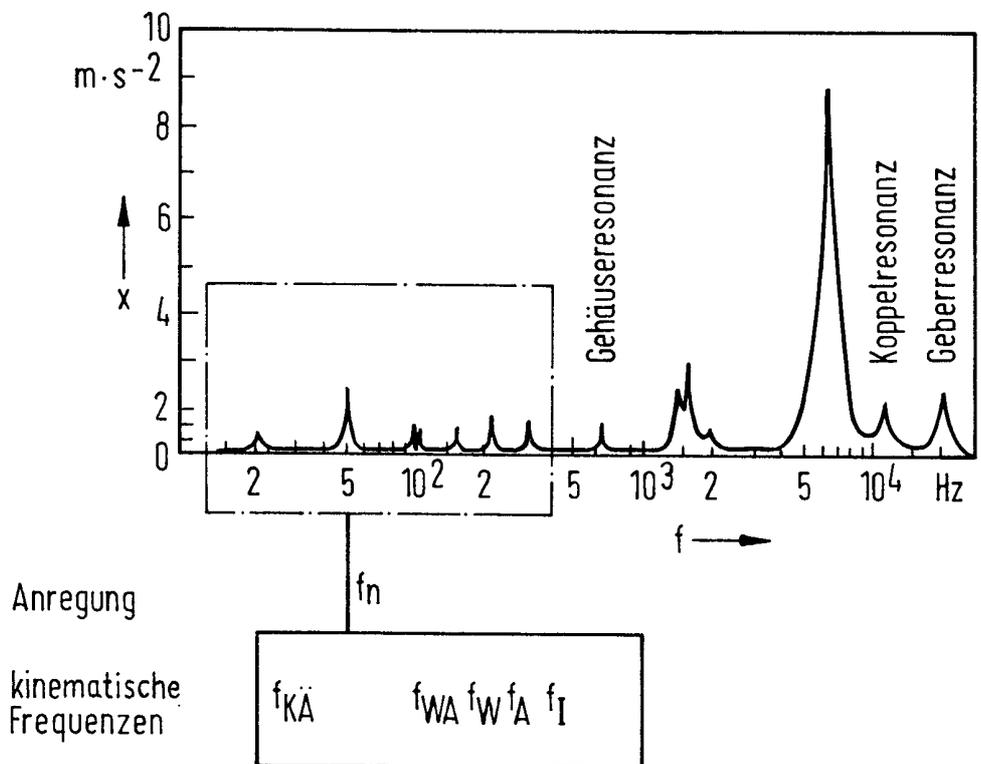
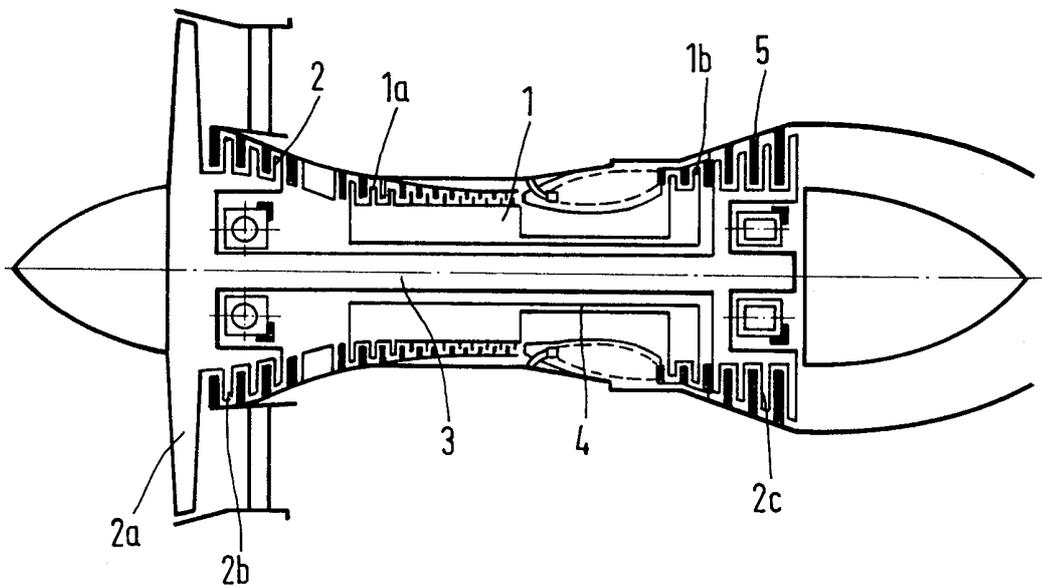


FIG. 6



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/EP 99/08717

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
 IPC 7 F01D21/00 F01D21/04

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 F01D F02C

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 4 217 617 A (BEHRINGER DONALD F ET AL) 12 August 1980 (1980-08-12) column 2, line 24 - column 3, line 6	1, 2, 8-12
Y	column 4, line 6 - line 14 ---	1, 3-7
Y	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 003, no. 069 (M-062), 14 June 1979 (1979-06-14) -& JP 54 044106 A (HITACHI LTD), 7 April 1979 (1979-04-07) abstract ---	1, 3
Y	US 5 804 726 A (GEIB RICHARD CARTER ET AL) 8 September 1998 (1998-09-08) column 4, line 17 - line 31 column 7, line 1 - line 5 figure 1 --- -/-	1, 4-7

Further documents are listed in the continuation of box C.

Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents :

- "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- "E" earlier document but published on or after the international filing date
- "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

22 February 2000

Date of mailing of the international search report

17/03/2000

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
 NL - 2280 HV Rijswijk
 Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
 Fax (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Steinhauser, U

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/EP 99/08717

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	<p>US 5 234 315 A (OGIHARA KUNIHIRO ET AL) 10 August 1993 (1993-08-10) column 3, line 9 - line 48 column 3, line 61 -column 4, line 7 claims 1,2 figure 6</p>	1,2,8,11
A	<p>EP 0 718 608 A (SKF ENG & RES CENTRE BV) 26 June 1996 (1996-06-26) column 1, line 58 -column 2, line 9</p>	1-12
A	<p>US 4 302 813 A (KURIHARA NOBUO ET AL) 24 November 1981 (1981-11-24) column 1, line 53 - line 59 column 2, line 60 -column 3, line 3 figure 10</p>	1-12
A	<p>DATABASE COMPENDEX 'Online! ENGINEERING INFORMATION, INC., NEW YORK, NY, US J W LUND; J TONNESEN: "Analysis and experiments on multi-plane balancing of a flexible rotor" Database accession no. EIX72080002265 XP002131209 abstract -& J W LUND; J TONNESEN: "Analysis and experiments on multi-plane balancing of a flexible rotor (ASME PAP 71-VIBR-74 1971)" JOURNAL OF VIBRATION AND ACOUSTICS., 8 September 1971 (1971-09-08), XP002131208 AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS., XX ISSN: 1048-9002</p>	1-12

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/EP 99/08717

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 4217617	A	12-08-1980	ES 484251 A	16-05-1980
			JP 55043283 A	27-03-1980
			JP 59018524 B	27-04-1984
			PL 218239 A	16-06-1980
			YU 189579 A	30-06-1982
JP 54044106	A	07-04-1979	NONE	
US 5804726	A	08-09-1998	AU 1682497 A	07-05-1997
			AU 7261596 A	07-05-1997
			CA 2187994 A	17-04-1997
			WO 9714940 A	24-04-1997
			WO 9715044 A	24-04-1997
US 5234315	A	10-08-1993	JP 4287803 A	13-10-1992
EP 0718608	A	26-06-1996	NL 9401949 A	01-07-1996
			DE 69511229 D	09-09-1999
			DE 69511229 T	20-01-2000
			JP 8219873 A	30-08-1996
			US 5698788 A	16-12-1997
US 4302813	A	24-11-1981	JP 1025408 B	17-05-1989
			JP 1544880 C	15-02-1990
			JP 54111871 A	01-09-1979
			CA 1143040 A	15-03-1983

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Intn. nationales Aktenzeichen
PCT/EP 99/08717

A. KLASIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
IPK 7 F01D21/00 F01D21/04

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE
Recherchiertes Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
IPK 7 F01D F02C

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der Internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	US 4 217 617 A (BEHRINGER DONALD F ET AL) 12. August 1980 (1980-08-12) Spalte 2, Zeile 24 - Spalte 3, Zeile 6	1,2,8-12
Y	Spalte 4, Zeile 6 - Zeile 14	1,3-7
Y	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 003, no. 069 (M-062), 14. Juni 1979 (1979-06-14) -& JP 54 044106 A (HITACHI LTD), 7. April 1979 (1979-04-07) Zusammenfassung	1,3
Y	US 5 804 726 A (GEIB RICHARD CARTER ET AL) 8. September 1998 (1998-09-08) Spalte 4, Zeile 17 - Zeile 31 Spalte 7, Zeile 1 - Zeile 5 Abbildung 1	1,4-7

Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absenddatum des internationalen Recherchenberichts
22. Februar 2000	17/03/2000

Name und Postanschrift der internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl, Fax: (+31-70) 340-3016	Bevollmächtigter Bediensteter Steinhauser, U
---	---

C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie°	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	<p>US 5 234 315 A (OGIHARA KUNIHIRO ET AL) 10. August 1993 (1993-08-10) Spalte 3, Zeile 9 - Zeile 48 Spalte 3, Zeile 61 - Spalte 4, Zeile 7 Ansprüche 1,2 Abbildung 6</p>	1,2,8,11
A	<p>EP 0 718 608 A (SKF ENG & RES CENTRE BV) 26. Juni 1996 (1996-06-26) Spalte 1, Zeile 58 - Spalte 2, Zeile 9</p>	1-12
A	<p>US 4 302 813 A (KURIHARA NOBUO ET AL) 24. November 1981 (1981-11-24) Spalte 1, Zeile 53 - Zeile 59 Spalte 2, Zeile 60 - Spalte 3, Zeile 3 Abbildung 10</p>	1-12
A	<p>DATABASE COMPENDEX 'Online! ENGINEERING INFORMATION, INC., NEW YORK, NY, US J W LUND; J TONNESEN: "Analysis and experiments on multi-plane balancing of a flexible rotor" Database accession no. EIX72080002265 XP002131209 Zusammenfassung -& J W LUND; J TONNESEN: "Analysis and experiments on multi-plane balancing of a flexible rotor (ASME PAP 71-VIBR-74 1971)" JOURNAL OF VIBRATION AND ACOUSTICS., 8. September 1971 (1971-09-08), XP002131208 AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS., XX ISSN: 1048-9002</p>	1-12

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationale Aktenzeichen

PCT/EP 99/08717

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 4217617 A	12-08-1980	ES 484251 A	16-05-1980
		JP 55043283 A	27-03-1980
		JP 59018524 B	27-04-1984
		PL 218239 A	16-06-1980
		YU 189579 A	30-06-1982
JP 54044106 A	07-04-1979	KEINE	
US 5804726 A	08-09-1998	AU 1682497 A	07-05-1997
		AU 7261596 A	07-05-1997
		CA 2187994 A	17-04-1997
		WO 9714940 A	24-04-1997
		WO 9715044 A	24-04-1997
US 5234315 A	10-08-1993	JP 4287803 A	13-10-1992
EP 0718608 A	26-06-1996	NL 9401949 A	01-07-1996
		DE 69511229 D	09-09-1999
		DE 69511229 T	20-01-2000
		JP 8219873 A	30-08-1996
		US 5698788 A	16-12-1997
US 4302813 A	24-11-1981	JP 1025408 B	17-05-1989
		JP 1544880 C	15-02-1990
		JP 54111871 A	01-09-1979
		CA 1143040 A	15-03-1983