



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 602 06 120 T2** 2006.06.22

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 304 463 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **602 06 120.2**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **02 256 983.4**

(96) Europäischer Anmeldetag: **04.10.2002**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **23.04.2003**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **14.09.2005**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **22.06.2006**

(51) Int Cl.⁸: **F02C 7/00** (2006.01)
G01H 1/00 (2006.01)

(30) Unionspriorität:

971524 05.10.2001 US

(73) Patentinhaber:

General Electric Co., Schenectady, N.Y., US

(74) Vertreter:

Rüger und Kollegen, 73728 Esslingen

(84) Benannte Vertragsstaaten:

DE, FR, GB

(72) Erfinder:

**Leamy, Kevin Richard, Loveland, Ohio 45140, US;
Simpson, William Joseph, Mason, Ohio 45040, US;
Watson, Thomas Ulmont, Hamilton, Ohio 45011,
US; Meyers, Jr., William Joseph, West Chester,
Ohio 45069, US**

(54) Bezeichnung: **Methode und System zur Lagerüberwachung**

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).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

[0001] Gegenstand der vorliegenden Erfindung sind allgemein ein Verfahren und ein System zur Überwachung des Zustands von Lagern, die an einer rotierenden Welle montiert sind, wobei der überwachende Sensor von den Lagern entfernt angeordnet ist. Gegenstand der vorliegenden Erfindung sind insbesondere ein Verfahren und ein System zur Fernüberwachung des Zustands von Differenziallagern, die an einer rotierenden Welle in einem Flugzeuggasturbinen-triebwerk montiert sind, um Defekte vor dem Ausfall des Lagers zu erkennen.

[0002] Um die Drehung einer Welle in Bezug auf eine stationäre oder rotierende Abstützung mit minimaler Reibung zu gestatten, werden Wälzlager verwendet. Diese bestehen typischerweise aus einem Innen- und einem Außenring, die zueinander konzentrisch angeordnet sind und zwischen denen Wälzkörper angeordnet sind. Die Wälzkörper können sphärische Kugeln (im Falle von Kugellagern) oder (im Falle von Rollenlagern) Zylinderrollen sein. Kugellager können sowohl radiale, als auch axiale Kräfte der Welle aufnehmen, während Rollenlager ausschließlich Radiallasten abstützen. Der primäre Wellenlager-ring dreht sich synchron mit der Welle. Bei stationären Lagergehäusen dreht sich der zweite Lagerring nicht und ist durch das stationäre Gehäuse abgestützt. Im Falle von Zwischenwellen- oder Differenziallagern dreht der zweite Lagerring synchron mit einer zweiten Welle. Die Benutzung von Differenziallagern kann wesentliche Vorzüge hinsichtlich signifikant reduzierter Systemgröße und -gewichts ergeben.

[0003] Wie jedes andere mechanische Teil können Lager in Folge von Verschleiß, fehlender Schmierung, Verschmutzung, Montagefehlern, Überlast oder anderen Faktoren ausfallen. Im Ergebnis hat die Überwachung des Zustands von Lagern seit einiger Zeit wesentliche Aufmerksamkeit erhalten, weil Lagerschäden katastrophal sein können, zu wesentlichen Folgeschäden und teurer Reparatur führen können und zur Ausfallzeit der Maschine beitragen. Die Überwachung der Lagerung zu bestimmen, wann sie wohl ausfallen werden, kann noch schwieriger sein, wenn in der Maschine viele Lageranordnungen benutzt werden, was für Gasturbinentriebwerke typisch ist. Die Überwachung des Lagerzustands kann außerdem durch andere Faktoren der Maschine erschwert sein, wie beispielsweise hohe Temperaturen, Schwierigkeiten bei der Anordnung der Überwachungssensoren in der Maschine, andere Vibrationsquellen und ähnliches. Außerdem müssen die Überwachungssysteme relativ leicht sein, wenn sie in Flugzeugtriebwerken benutzt werden.

[0004] Ein Beispiel für ein Gasturbinentriebwerk mit vielen Lageranordnungen ist in dem US-Patent 5 749

660 gezeigt (Dusserre-Telmon und andere), herausgegeben am 12. Mai 1998. Die in [Fig. 1](#) des Dusserre-Telmon-et-al-Patents veranschaulichte Gasturbine, weist sechs Lageranordnungen (**5 bis 10**) auf, die einer drehenden Welle mit einem coaxialen Vorderteil **1** und einem hinteren Teil **2** zugeordnet sind. Diese Lageranordnungen enthalten Kombinationen aus einem Kugellager **5** und einem Rollenlager **6**, das dem Vorderteil **1** der Welle an dem vorderen Ende des Triebwerks stützt, ein Paar Kugellager **7** und **8**, die ein Ende des hinteren Teils **2** der Welle stützen und ein Paar Rollenlager **9** und **10** an dem Hinterteil des Triebwerks, die das äußere Ende des hinteren Teils **2** der Welle abstützen.

[0005] In [Fig. 1](#) des Dusserre-Telmon-et-al-Patents ist das Rollenlager **9** in Form eines Zwischenwellen- oder Differenzialrollenlagers veranschaulicht, bei dem sowohl der Innenring als auch der Außenring rotiert. Es hat sich herausgestellt, dass Zwischenwellenlagerfehler, d. h. Fehler an der Position des Rollenlagers **9**, bei einigen Flugzeugtriebwerken zum Triebwerksausfall während des Fluges führen können. Ein häufiger Fehlermodus bei Wälzlagern dieser Bauart ist durch lokalisierte Defekte gegeben, bei denen ein gewisses Stück der Kontaktfläche während des Betriebs verlagert wird, meist durch Ermüdungsbruch des Lagermetalls und zyklische Kontaktbelastung. Die Überwachung des potentiellen Ausfalls solcher Wälzlager erfolgt somit häufig auf Basis der Erfassung des Beginns solcher lokaler Defekte.

[0006] Ein Verfahren zur Erfassung solcher lokaler Defekte liegt in der Überprüfung der Bruchstücke, die sich in dem Schmiermittel finden, das in dem Lager benutzt wird. Gasturbinentriebwerke haben typischerweise Metallspanndetektoren (MCD) in dem Triebwerksölreinigungssystem. Die MCD's sammeln Metallbruchstücke, die von dem Schmieröl mitgeführt werden, wobei die gesammelten Metallbruchstücke dann untersucht werden können, um zu ermitteln, ob Lagermaterial vorhanden ist. Unglücklicherweise ist die Untersuchung der Bruchstücke zur Erfassung von Defekten in Zwischenwellenlagern nicht verlässlich, weil die Bruchstücke durch Zentrifugalkräfte innerhalb der Welle gefangen bleiben können und somit durch einen MCD nicht erfasst werden.

[0007] Ein anderes Verfahren zur Überwachung solcher lokalisierter Defekte liegt in der Schwingungsanalyse, siehe zum Beispiel die US 4 302 813 oder US 4 352 293. Während des Betriebs des Lagers ergeben sich Bursts akustischer Emissionen oder Vibrationen, in dem die Berührstelle zwischen Wälzkörper und Laufbahn die Fehlstelle passiert. Fehlstellen an unterschiedlichen Stellen eines Lagers (Innenring, Wälzkörper und Außenring) erzeugen charakteristische Frequenzen, mit denen die Bursts erzeugt werden. Theoretische Schätzungen dieser Frequenzen werden charakteristische Defektfrequenzen genannt.

Deshalb besteht das Signal eines beschädigten Lagers (nachfolgend als „Lagerdefektpeak“ bezeichnet) typischerweise aus periodischen Bursts akustischer Emissionen oder Vibrationen nahe oder ungefähr bei der charakteristischen Defektfrequenz. Zusätzlich kann die sich über der Zeit ändernde Amplitude dieser Lagerdefektfrequenz dazu benutzt werden, die Schwere des eingetretenen Lagerfehlers zu quantifizieren und zwar vorzugsweise ausreichend im Voraus, so dass eine Wartung und Reparatur vor einem Lagertotalausfall erfolgen kann. Unglücklicherweise sind die charakteristischen Frequenzen üblicherweise so hoch, dass sie in den umgebenden Strukturen schnell gedämpft werden. Aus diesem Grund ist es zu wünschen, Schwingungssensoren so nah an dem Lager wie möglich zu positionieren.

[0008] Ein spezielles Problem ergibt sich bei Gasturbinentriebwerken, wenn ein Differenziallager, wie das Lager 9 in dem Dusserre-Telmon-et-al-Patent, nahe an einem Hochtemperaturbereich des Triebwerks positioniert ist. Dieses macht es extrem schwer oder möglicherweise unmöglich, die Position eines verlässlichen Vibrationssensors so nahe an dem Lager anzuordnen, dass er überlebt und in einer Hochtemperaturumgebung funktioniert. Im Ergebnis ist bei Hochtemperatursektionen des Triebwerks die nächste praktikable Platzierung, in der Sensoren überleben und funktionieren können, die Umgebung des Triebwerks. Jedoch werden charakteristische Lagerdefektsignale in Folge ihrer hohen Frequenzen üblicherweise gedämpft, bevor sie den außen an dem Triebwerk angeordneten Sensor erreichen, was bedeutet, dass der Defekt typischerweise unentdeckt bleibt.

[0009] Außerdem kann die Unterscheidung der charakteristischen Lagerdefektfrequenz und -amplitude von anderen akustischen Emissionen schwierig sein. Typischerweise enthält das Vibrationssensorsignal einen breitbandigen Frequenzgehalt (d. h. viele Frequenzen über ein breites Frequenzband), wobei sich in diesem Frequenzgemisch die charakteristische Lagerdefektfrequenz mit anderen Frequenzen vermischt. Außerdem hat der Lagerdefektpeak bei der charakteristischen Frequenz nicht notwendigerweise die höchste Amplitude und ist typischerweise nicht selbstevident. Außerdem können andere Vibrationsquellen bei der gleichen Frequenz vorhanden sein, wie die charakteristische Lagerdefektfrequenz, was zu Fehldetektionen führen kann. Beispielsweise kann das Signal potentiell eine Abweichung in Folge von Fluktuationen der Drehzahl der Welle oder auch ein Fehler des Innen- oder Außenrings sein.

[0010] Entsprechend wäre es zu wünschen, ein Verfahren und ein System zur Fernüberwachung des Zustands von Lagern zu schaffen, die an einer drehenden Welle montiert sind, insbesondere einer solchen, wie sie bei einem Gasturbinentriebwerk verwendet

wird, wo mehrere Lageranordnungen vorhanden sind, wobei das Signal der charakteristischen Frequenz eines interessierenden Lagerfehlers aus einem Breitbandsignal ohne invasive Analysetechniken verlässlich erfasst und isoliert werden soll, wobei das Gewicht zur Verwendung in Flugzeugtriebwerken gering sein soll.

[0011] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren und ein System zur Überwachung des Zustands eines Lagers, das an einer drehenden Welle montiert ist, insbesondere eines in einem Gasturbinentriebwerk eines Flugzeugs vorhandenen Lagers, wobei der Vibrationssensor, der das Lager überwacht, von dem Lager entfernt, jedoch nahe an der drehenden Welle angeordnet ist. Das der vorliegenden Erfindung gemäße Verfahren beinhaltet folgende Schritte und das erfindungsgemäße System ist in der Lage dass:

- a) durch den Vibrationssensor ein Breitbandsignal erhalten wird, das Frequenzen aufweist, die den Lagerdefektpeak des überwachten Lagers enthalten,
- b) das Breitbandsignal analysiert wird, um das Vorhandensein des Lagerdefektpeaks zu identifizieren, und
- c) wenn ein Lagerdefektpeak vorhanden ist, die Amplitude dieses Peaks quantifiziert wird, um zu bestimmen, ob die Abnutzung des überwachten Lagers wenigstens ein vorher festgelegtes Schwellkriterium erreicht hat.

[0012] Das erfindungsgemäße Verfahren und System liefert eine Anzahl von Vorzügen und Vorteilen bei der Überwachung von Lagern, die an einer drehenden Welle montiert sind, insbesondere bei der Verwendung in einem Flugzeuggasturbinentriebwerk. Das erfindungsgemäße Verfahren und System gestattet die verlässliche Erfassung, Herauspräparierung, Identifikation und Quantifizierung des Lagerfehlersignals für das interessierende überwachte Lager auch dann, wenn an der rotierenden Welle mehrere Lageranordnungen montiert sind. Das erfindungsgemäße Verfahren und System liefert eine nichtinvasive, analytische Technik, so dass das überwachte Lager nicht entfernt werden muss, um die Analyse auszuführen. Weil der Vibrationssensor an dem vorderen kälteren Ende eines Gasturbinentriebwerks montiert werden kann, sind das Verfahren und System insbesondere zur Überwachung von Zwischenschaft- oder Differenziallagern zweckmäßig, die an dem hinteren heißeren Ende des Gasturbinentriebwerks angeordnet sind. Das erfindungsgemäße System ist außerdem leicht, was es für die Überwachung von Lagern in Flugzeuggasturbinentriebwerken ideal macht.

[0013] Das erfindungsgemäße Verfahren und System nutzen einen alternativen, weniger offensichtlichen Übertragungsweg für die Überwachung des Zustands des an einer drehenden Welle montierten La-

gers, insbesondere eines solchen, das bei einem Flugzeuggasturbinentriebwerk genutzt wird. Es hat sich herausgestellt dass, wenn der Vibrationssensor praktischerweise nahe oder in Nachbarschaft zu der Welle angeordnet ist und zwischen dem Sensor und dem überwachten Lager relativ wenig Masse vorhanden ist, die charakteristische Defektfrequenz auch dann erfasst werden kann, wenn der Sensor relativ weit von dem überwachten Lager entfernt ist. Insbesondere kann der Vibrationssensor in einem Abschnitt des Gasturbinentriebwerks mit niedrigerer Temperatur angeordnet werden, wobei ein Defekt an einem davon entfernten Lager in dem Hochtemperaturbereich des Triebwerks angeordneten Lagers erfasst werden kann, wenn: (1) der Vibrationssensor nahe der Welle angeordnet ist und (2) der Teil der Welle zwischen dem Sensor und dem überwachten Lager eine relativ geringe Masse hat, so dass akustische Vibrationen von dem Lager durch die Welle übertragen und von dem Sensor aufgenommen werden.

[0014] Ausführungsformen der Erfindung werden nun als Beispiel mit Bezug auf die beigefügten Zeichnungen beschrieben, in denen:

[0015] [Fig. 1](#) eine seitliche Schnittansicht eines Gasturbinentriebwerks ist, bei dem das erfindungsgemäße Verfahren und System verwendet werden kann.

[0016] [Fig. 2](#) eine schematische Vibrations- und Drehzahl-signalerfassungs- und Verarbeitungskomponente ist, die bei dem erfindungsgemäßen Verfahren und System genutzt werden können.

[0017] [Fig. 3](#) ein Flussbild repräsentiert, das die Schritte veranschaulicht, die bei einer Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens und Systems ausgeführt werden können.

[0018] [Fig. 4](#) eine repräsentative graphische Veranschaulichung eines Breitbandvibrationssignals ist, das bei dem erfindungsgemäßen Verfahren und System durch den Vibrationssensor erhalten worden ist.

[0019] [Fig. 5](#) ist eine repräsentative graphische Veranschaulichung der Amplituden des Lagerdefekt-peakwerts über der Zeit.

[0020] Der hier verwendete Begriff „Lagerdefekt-peak“ bezieht sich auf die Spitze in dem Signal, das von dem überwachten Lager erhalten wird und einen Lagerdefekt anzeigt, der identifiziert und quantifiziert werden kann, um die Schwere des Lagerausfalls oder -schädigung über der Zeit zu bestimmen.

[0021] Die hier verwendeten Begriffe „Übertragen“ und „Übertragung“ beziehen sich auf jede Art der Übertragung und können elektronisch, leitungsge-

bunden, durch drahtlose Verfahren oder Kombinationen derselben ausgeführt werden. Typische elektronische Übertragungen, die im Bereich der Erfindung liegen, können durch eine Vielzahl von elektronischen Fernübertragungsverfahren, wie beispielsweise mittels lokalem Netzwerk oder weitreichendem Netzwerk (LAN oder WAN), internetbasierter oder webbasierter Übertragung, Kabeltelevision oder drahtlosen Telekommunikationsnetzwerken oder in jedem anderen geeigneten Fernübertragungsverfahren erfolgen.

[0022] Der hier verwendete Begriff „Software“ bezieht sich auf jede Form programmierter maschinenlesbarer Sprache oder Instruktionen (z. B. Objekt-code) der, wenn er geladen oder anderweitig installiert wird, einer Maschine Betriebsanweisungen liefert, die in der Lage ist, diese Instruktionen zu lesen, wie beispielsweise einen Computer oder eine andere Computerprogrammleseeinrichtung. Die bei der vorliegenden Erfindung nutzbare Software kann auf einer oder mehrerer Disketten, CD-Rom, Harddisk oder jeder anderen geeigneten Form nicht flüchtiger, elektronischer Speichermedien gespeichert angeordnet, sowie von diesen geladen oder installiert werden. Die bei der Erfindung zweckmäßige Software kann außerdem heruntergeladen oder durch andere Formen der Fernübertragung installiert werden.

[0023] Der hier verwendete Begriff „aufweisen“ bedeutet, dass verschiedene Komponenten Fähigkeiten und/oder Schritte für die vorliegende Erfindung gleichzeitig genutzt werden können. Entsprechend umfasst der Begriff „aufweisen“ die restriktiveren Begriffe „bestehen im Wesentlichen aus“ und „bestehend aus“.

[0024] In [Fig. 1](#) ist ein Gasturbinentriebwerk veranschaulicht und insgesamt mit **10** bezeichnet, bei dem das erfindungsgemäße Verfahren und System zweckmäßig angewendet werden kann. Während die insbesondere zur Überwachung von Lagern zweckmäßig ist, die an rotierenden Wellen in Flugzeuggasturbinentriebwerken montiert sind, können das erfindungsgemäße Verfahren und System außerdem zur Überwachung von Lagern eingesetzt werden, die an rotierenden Wellen montiert sind, die in anderen Maschinen genutzt werden, wie beispielsweise bei Dampfturbinen, Hubschraubergetrieben, elektrischen Gasturbinengeneratoren, Pumpen, Elektromotoren, hin- und hergehenden Maschinen usw., bei denen der Vibrationssensor von dem überwachten Lager entfernt, jedoch nahe der rotierenden Welle angeordnet ist.

[0025] Das Triebwerk **10** ist mit zwei Rotoren und fünf Lagern und zwei Trägern zur Rotorabstützung, d. h. als Triebwerk mit vielen Lageranordnungen veranschaulicht. Das Triebwerk **10** enthält eine drehende Niederdruckwelle **14** (LP), die sich entlang einer

Längsachse von dem vorderen Ende zu dem hinteren Ende des Triebwerks erstreckt. Wie in [Fig. 1](#) veranschaulicht, ist an dem vorderen Ende des Triebwerks **10** ein Bläserotor **18** angeordnet, während an dem hinteren Ende des Triebwerks **10** ein Niederdruckturbinenrotor **30** (LPT) angeordnet ist. Der Bläserotor **18** und der LPT-Rotor **30** bilden zusammen die LP-Rotoranordnung des Triebwerks **10** und sie sind durch die LP-Welle **14** verbunden.

[0026] Das Triebwerk **10** enthält außerdem einen Hochdruckkompressorrotor **22** (HPC), der hinter dem Bläserotor **18** angeordnet ist, sowie einen Hochdruckturbinenrotor **26** (HPT), der vor dem LPT-Rotor **30** angeordnet ist. Der HPC-Rotor **22** ist direkt mit dem HPT-Rotor **26** verbunden, wobei sie zusammen die Hochdruckrotoranordnung HP des Triebwerks **10** bilden. Die LP-Welle **14** und die HP-Rotoranordnung (d. h. der HPC-Rotor **22** und der HPT-Rotor **26**) sind konzentrisch zueinander angeordnet, wobei die LP-Welle **14** so positioniert ist, dass sie innerhalb der HP-Rotoranordnung dreht.

[0027] Wie in [Fig. 1](#) veranschaulicht, sind die LP-Rotoranordnung (d. h. der Bläserotor **18**, der LPT-Rotor **30** und die LP-Welle **14**), sowie die HP-Rotoranordnung (d. h. der HPC-Rotor **22** und der HPT-Rotor **26**) unter Verwendung vieler Lageranordnungen abgestützt oder montiert, von denen fünf allgemein mit **42**, **46**, **50**, **54**, **58** bezeichnet sind. Die erste und die dritte Lageranordnung **42** und **50** sind Kugellager, während die zweite, vierte und fünfte Lageranordnung **46**, **54** und **58** Rollenlager sind. Jede Rotoranordnung erfordert ein Kugellager zur axialen Abstützung, während die übrige Abstützung durch die Rollenlager erbracht wird. Die LP-Rotoranordnung ist durch das Kugellager **42** und das Rollenlager **46** an dem vorderen Ende und durch das Rollenlager **58** an dem hinteren Ende abgestützt. Die HP-Rotoranordnung ist durch das Kugellager **50** an dem vorderen Ende und das Rollenlager **54** an dem hinteren Ende abgestützt. Die Lager **42**, **46** und **50** sind Lager mit stationärem Gehäuse, die durch den vorderen Rahmen **34** abgestützt sind, während das Lager **58** ein von dem hinteren Rahmen **38** gestütztes Lager mit stationärem Gehäuse ist.

[0028] Das Lager **54** ist ein Zwischenwellen- oder Differenziallager, das typischerweise als Rollenlager ausgebildet ist, bei dem sowohl der innere, als auch der äußere Lagerring rotieren. Das Lager **54** stützt das hintere Ende der HP-Rotoranordnung (d. h. den HPC-Rotor **22** und den HPT-Rotor **26**) an der LP-Rotorwelle **14** ab. Die Verwendung einer Zwischenwellenlageranordnung an dieser Stelle des Lagers **54**, macht einen weiteren Rahmen (zusätzlich zu den Rahmen **34** und **38**) überflüssig und reduziert somit Größe und Gewicht des Triebwerks wesentlich. Wegen seiner Anordnung in dem LPT-Teil **60** des Triebwerks **10**, ist das Lager **54** nur schwer direkt zu über-

wachen, um zu entscheiden, wann das Lager ausreichend abgenutzt und fehlerhaft ist, um eine Wartung oder Reparatur zu erfordern. Dies liegt primär an den höheren Temperaturen, die in dem LPT-Abschnitt des Triebwerks **10** auftreten, die darin angeordnete Vibrationssensoren nachteilig beeinflussen können. Im Ergebnis wird der Vibrationssensor, der das Differenzialrollenlager **54** überwacht, von diesem entfernt angeordnet, so dass er sich in dem Abschnitt **64** des Triebwerks **10** mit niedrigerer Temperatur befindet. Wie in [Fig. 1](#) veranschaulicht, kann der Vibrationssensor die Bauart eines Beschleunigungsaufnehmers **62** aufweisen, der an dem vorderen Ende des Triebwerks **10** nahe der Lageranordnung **42** und der Welle **14** benachbart angeordnet ist. Weil der Beschleunigungsaufnehmer **62** der Welle **14** nahe angeordnet ist, kann er akustische Emissionen oder Vibrationen aufnehmen, die von dem fern angeordneten Differenzialrollenlager **54** ausgehen und die (über die Welle **14**) in Folge der relativ niedrigen Rotormasse zwischen dem Beschleunigungsaufnehmer **62** und dem Lager **54** übertragen werden. Die Positionierung des Beschleunigungsaufnehmers **62** nahe an dem vorderen Rahmen **34** gestattet es außerdem, Übertragungsleitungen bequem zu einem Triebwerksvibrationsmonitor herauszuführen (nicht veranschaulicht).

[0029] Bei der Entscheidung ob ein Fehler in dem Differenzialrollenlager **54** auftritt, muss die Drehzahl des Innenrings und des Außenrings bestimmt werden. Zur Überwachung der Drehzahl des inneren LP-Rings des Differenzialrollenlagers **54** wird ein erster, nahe der zweiten Lageranordnung **46** angeordneter, mit **66** bezeichneter Drehzahlsensor verwendet. Zur Überwachung der Drehzahl des Außenrings (HP) des Differenzialrollenlagers **54** wird ein zweiter, nahe dem Getriebe **74**, mit **70** bezeichneter Drehzahlsensor verwendet.

[0030] Wie in [Fig. 2](#) schematisch veranschaulicht, liefert der Beschleunigungsaufnehmer **62** ein allgemein mit **78** bezeichnetes Breitbandsignal auf der Basis aufgenommener akustischer Emissionen oder Vibrationen, die Anteile von dem Differenzialrollenlager **54** enthalten. Der erste Drehzahlsensor **66** enthält ein Signal **82** in Abhängigkeit von der Drehzahl des Innenrings des Differenzialrollenlagers **54**, während der zweite Drehzahlsensor **70** ein Signal **68** anhand der Drehzahl des Außenrings des Differenzialrollenlagers **54** erzeugt. Wie in [Fig. 2](#) veranschaulicht, werden die Signale **78**, **82** und **68** von einem Triebwerksvibrationsmonitor **90** (EVM) oder einer ähnlichen Überwachungseinheit aufgenommen, die an dem Flugzeug oder Triebwerk **10** angeordnet ist und typischerweise Prozessorfähigkeiten hat (z. B. ein digitaler Signalprozessor), Speicher mit wahlfreiem Zugriff (RAM) und nicht flüchtige Speicherfähigkeit (z. B. eine Festplatte), wobei der Monitor **90** typischerweise computerisiert ist. Im Ergebnis hat der Monitor **90** üb-

licherweise die Fähigkeit, die aufgenommenen Signale **78**, **82** und **86** weiterzuverarbeiten und zu analysieren, sowie die Ergebnisse dieser Verarbeitung und Analyse zu speichern. Der Monitor **90** kann außerdem die aufgenommenen oder verarbeiteten Signale an ein anderes fernes System übertragen (z. B. während das Flugzeug noch immer in der Luft ist) oder kann die aufgenommenen oder verarbeiteten Signale einfach zur späteren Übertragung oder zum Download an ein anderes System speichern (zum Beispiel nachdem das Flugzeug gelandet ist). Beispielsweise können die gesammelten oder verarbeiteten Signale an einen Computer übertragen oder heruntergeladen werden (z. B. einen tragbaren Computer).

[0031] Weil das Signal **78** ein Breitbandsignal ist (z. B. typischerweise in dem Bereich von 0 bis ungefähr 4000 Hz), ist es üblicherweise schwierig oder unmöglich, ein Signal **78** des relevanten Lagerdefektpeaks für die Differenzialrollenlageranordnung **54** zu identifizieren. Tatsächlich ist der Peak mit der höchsten Amplitude in dem Signal **78** nicht immer derjenige, der den Lagerdefektpeak bildet. Entsprechend wird das Breitbandsignal **78** typischerweise gefiltert, um die Bandbreite einzuengen, die den Bereich der Frequenzen abdeckt, die den Lagerdefektpeak enthalten (z. B. typischerweise in dem Bereich von ungefähr 2000 bis ungefähr 3000 Hz). Diese Filterung auf eine engere Bandbreite, gestattet üblicherweise eine einfachere Identifikation und Quantifizierung des Lagerdefektpeaks. Die Bereiche dieser Breitband und Schmalbandsignale können in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren variieren (nach oben oder nach unten), wie beispielsweise in Abhängigkeit von der Anzahl der Wälzkörper in den Lagern, der Rotorrelativdrehzahlen und den Grad des Lagerschlupfs (d. h. wenn die Tangentialgeschwindigkeit der Lagerelemente nicht zu der Tangentialgeschwindigkeit der Ringe passt).

[0032] Zusätzlich wird die Kenntnis der Drehzahl des LP-Rings und des HP-Rings, die von den Signalen **82** bzw. **86** angezeigt wird und die außerdem die Triebwerkswellendrehzahlen kennzeichnet benötigt, um sicherzustellen, dass die zu verschiedenen Zeiten aufgenommenen Signale **78** vergleichbar sind. Die Signale **78** können während einer Zeitspanne aufgenommen worden sein, bei der sich die Triebwerksdrehzahlen ändern (nachstehend als Triebwerksübergangsdrehzahlzustände bezeichnet) oder wenn die Triebwerksdrehzahlen konstant oder stabil sind (hiernach bezeichnet als Triebwerksstationärdrehzahlbedingung). Die Analyse der sowohl unter den Übergangszuständen, als auch den Stationärzuständen aufgenommenen Signale **78**, kann bei der Erfassung potentieller Fehler des Differentialrollenlagers **54** nützlich sein. Außerdem erfordert die Erfassung eines potentiellen Fehlers des Differentialrollenlagers **54** das Sammeln und Analysieren von vielen Signalen **78** über eine Zeitspanne hinweg. Dies stellt

sicher, dass die Erfassung eines Lagerfehlers auf wiederholten objektiven Erfassungen einer ausreichenden Anzahl von gesammelten Daten und nicht auf einem potentiell vorübergehenden Phänomen.

[0033] Durch den insgesamt mit **100** bezeichneten Ablaufplan gemäß [Fig. 3](#) ist eine Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens veranschaulicht. In [Fig. 3](#) wird in Schritt **101** durch die Überwachungseinrichtung **90** eine Datenprobe erhalten, die gesammelte Signale **78**, **82** und **86** enthält. Wie durch Schritt **102** angezeigt, wird eine Anfangsabfrage ausgeführt, um zu entscheiden, ob die Datenprobe unter entsprechenden Übergangsbedingungen erhalten worden ist. Wenn die Datenprobe nicht unter entsprechenden Übergangsbedingungen erhalten worden ist (die Antwort auf „Übergang festgestellt?“ in Schritt **102** ist „Nein“) wird eine andere Abfrage ausgeführt, wie durch Schritt **103** angedeutet ist, um festzustellen, ob die Datenprobe unter entsprechenden Stationärzustandsbedingungen erhalten worden ist. Wenn die Datenprobe unter entsprechenden Übergangsbedingungen erhalten worden ist (die Antwort auf „Übergang festgestellt?“ in Schritt **102** ist „Ja“) wird die Datenprobe dann in Schritt **104** weiterverarbeitet. Wenn die Datenprobe nicht unter entsprechenden Stationärbedingungen (die Antwort auf „Stationärzustand festgestellt?“ in Schritt **103** ist „Nein“) wird die Datenprobe nicht weiterverarbeitet, weil sie keine verlässlichen oder vergleichbaren Ergebnisse bringen würde, wie in Schritt **105** angezeigt ist. Wenn die Datenprobe unter angemessenen Stationärzustandsbedingungen erhalten worden ist (die Antwort auf „Stationärzustand festgestellt?“ in Schritt **103** ist „Ja“) wird die Datenprobe in Schritt **104** weiterverarbeitet.

[0034] In Schritt **104** wird die Datenprobe dann unter Nutzung der Analysetechnik der schnellen Fouriertransformation (FFT) analysiert, um ein Spektrum oder eine graphische Wiedergabe des Breitbandsignals **78** zu erbringen. Das periodische Breitbandsignal enthält typischerweise Beiträge vieler Frequenzen. Die FFT-Analyse liefert ein Spektrum der einzelnen Frequenzen, die in einem Breitbandsignal vorhanden sind und kennzeichnet die Stärke des Beitrags jeder Frequenz. Typischerweise hat die normale FFT eines Gasturbinentriebwerks einen vorhersehbaren Gehalt ganzzahliger und spezieller nichtganzzahliger Harmonischer der Frequenzen, die den LP- und HP-Rotoranordnungsdrehzahlen entsprechen, sowie Festfrequenzerscheinungen. Die charakteristische Defektfrequenz ist allgemein aus der Lagergeometrie und den Rotordrehzahlen vorhersehbar. Jedoch kann die charakteristische Defektfrequenz in Folge von Lagerschlupf variieren und außerdem Frequenzseitenbänder enthalten, die eine höhere Amplitude haben können, als die primäre charakteristische Defektfrequenz. Aus diesem Grund ist es üblicherweise notwendig, einen charakteristischen Defektfre-

quenzbereich festzulegen, der die charakteristische Defektfrequenz, sowie erwartete Abweichungen und mögliche Seitenbänder enthält. Der Anteil der FFT innerhalb des charakteristischen Defektfrequenzbereichs wird dann zur weiteren Bewertung extrahiert.

[0035] In [Fig. 4](#) ist eine graphische Wiedergabe einer solchen FFT dargestellt, bei der der Peak mit der höchsten Amplitude, der mit **94** bezeichnet ist, der Lagerdefektpeak ist. Jedoch ist dies nicht immer der Fall. In Fällen, bei denen der Lagerdefektpeak eine geringere Amplitude als die anderen Frequenzkomponenten hat, ist es typischerweise notwendig, ihn von den anderen Frequenzen zu isolieren. Entsprechend wird der gesamte vorhersehbare, nicht mit dem Lagerdefekt zusammenhängende Gehalt (einschließlich ganzzahliger und spezieller nichtganzzahliger Harmonischer von Frequenzen, die den LP- und HP-Rotoranordnungs-drehzahlen entsprechen, sowie Festfrequenzphänomene) in Schritt **106** aus dem FFT Signal beseitigt oder gefiltert, um einen Schmalbandbereich von Frequenzen zu bilden, der die Frequenzen enthält, die den Lagerdefektpeak beinhalten.

[0036] Nach dem Ausfiltern bekannter, nicht mit dem Defekt zusammenhängender Frequenzen, wird in Schritt **107** die Amplitude und die Frequenz des höchsten verbleibenden Peaks in dem charakteristischen Defektfrequenzbereich gemessen. Die Amplitude wird als Lagerdefektpeak und die Frequenz wird als charakteristische Defektfrequenz aufgezeichnet. Nach Quantifizierung der Amplitude des Lagerdefektpeaks können die Ergebnisse einer solchen Quantifizierung zusammengestellt oder gespeichert werden, wie in Schritt **108** veranschaulicht. Wie in Schritt **109** veranschaulicht, wird die Bestimmung, ob die Amplitude dieses Peaks ein vorher festgelegtes Schwellwertkriterium für eine vorbestimmte Anzahl von Ereignissen bei konsistenten charakteristischen Defektfrequenzen erreicht oder überschritten hat. (Dies erfordert typischerweise wiederholte Untersuchungen, die zeigen, dass das Schwellkriterium fortwährend erreicht oder überschritten wird). Wenn die Frequenzkriteriumsschwelle fortwährend erreicht oder überschritten worden ist (die Antwort auf „Schwellkriterium erreicht?“ ist „Ja“), wird in Schritt **110** eine Nachricht (z. B. ein Alarm) ausgegeben, so dass eine angemessene Maßnahme (z. B. Wartung oder Reparatur des Lagers) getroffen werden kann. Wenn die Frequenzkriteriumsschwelle nicht fortwährend erreicht oder überschritten wird (die Antwort auf „Schwellkriterium erreicht?“ ist „Nein“) endet der Prozess wiederum mit Schritt **105**. Falls gewünscht, kann der Schritt **110** in Abhängigkeit von dem Grad der Lagerschädigung oder des durch die Höhe der Amplitude des Lagerdefektpeaks gezeigten Fehlers viele Schritte unterschiedlicher Niveaus auszugebender Nachrichten (z. B. Alarmnachrichten) aufweisen.

[0037] Üblicherweise werden unter Nutzung der Ausführungsform des in den Schritten **101** bis **110** veranschaulichten Verfahrens viele Datenproben analysiert, um einen Verlauf der Amplitudenwerte des Lagerdefektpeaks zu erhalten. Ein solcher Verlauf ist in [Fig. 5](#) graphisch veranschaulicht, der außerdem verschiedene Schwellkriteriumslinien enthält, um anzuzeigen, wie schwerwiegend der Lagerverschleiß ist und welche und wann eine angemessene Aktion unternommen werden sollte. Beispielsweise repräsentiert die mit **96** bezeichnete Linie eine „Vorsicht“-Schwelle (d. h. das überwachte Lager könnte eine Wartung oder Reparatur relativ bald erfordern), während die mit **98** bezeichnete Linie eine „Alarm“-Schwelle repräsentiert (z. B. erfordert das überwachte Lager sofortige Wartung oder Reparatur). Tatsächlich kann durch Abbilden dieser Amplitudenwerte über der Zeit der Trend des Lagerverschleißes fortschreitend überwacht werden, um eine ausreichende Warnung zu liefern, wann entsprechend korrigierend eingegriffen werden sollte.

[0038] Die durch die Schritte **101** bis **110** veranschaulichte Ausführungsform des Verfahrens, kann vollständig durch die Überwachungseinrichtung **90**, d. h. ein automatisiertes computerisiertes System zur Überwachung des Zustands des Lagers und zur Bestimmung, wann Wartung oder Reparatur desselben ratsam oder unmittelbar erforderlich ist, durchgeführt werden. Bei einem solchen computerisierten System kann die Überwachungseinrichtung **90** mit einer Anzeigeeinrichtung versehen sein, um in Schritt **110** eine Nachricht auszugeben, ob ein Schwellkriterium zum Ergreifen einer speziellen Aktion erreicht oder überschritten worden ist oder es könnte eine solche Nachricht ausgeben, wenn die gesammelten oder verarbeiteten Daten auf ein anderes System heruntergeladen oder übertragen werden. Alternativ kann die Überwachungseinrichtung **90** die gesammelten oder verarbeiteten Daten (z. B. in Schritt **108**) einfach speichern. Diese gesammelten oder überwachten Daten können dann nachfolgend zur weiteren Analyse heruntergeladen oder übertragen werden, um potentielle Trends zur Vorhersage, wann ein Schwellkriterium wahrscheinlich erreicht oder überschritten werden wird (in Schritt **109**) und wann eine Wartungs- oder Reparaturnachricht für ein oder mehrere Niveaus herausgegeben werden sollte (in Schritt **110**) zu bestimmen.

[0039] Die vorliegende Erfindung kann außerdem in Form einer herunterladbaren oder anderweitig installierbaren Software bereitgestellt werden, die in einer computerisierten Überwachungseinrichtung **90** installiert und auf dieser benutzt werden kann, um die Ausführungsform des in den Schritten **101** bis **110** beschriebenen Verfahrens auszuführen. Diese Software kann mit einem Satz von Instruktionen zum Download oder zur Installation der Software an einer Überwachungseinrichtung **90** und/oder Verwendung

der Software mit der Überwachungseinrichtung **90** geliefert oder verbunden sein, die auf einem oder mehreren Blättern von Papier geschrieben oder gedruckt, in einem mehrseitigen Handbuch an der Stelle wo die Software zum Ferndownload oder zur Installation (z. B. auf einer serverbasierten Website) bereitsteht oder innerhalb der Packung, in der die Software geliefert oder verkauft wird und/oder im elektronischen Medium (zum Beispiel der Diskette oder der CD-Rom), von der die Software geladen oder installiert wird oder durch jedes andere Verfahren geliefert werden, um Instruktionen über das Laden, Installieren und/oder die Verwendung der Software zu liefern.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Überwachung des Zustandes eines Lagers (**54**), das an einem Ende einer drehbaren Welle (**14**) angeordnet ist, wobei ein das Lager (**54**) überwachender Vibrationssensor (**62**) an dem anderen Ende der drehbaren Welle (**14**) jedoch in der Nähe derselben angeordnet ist, wobei das Verfahren die folgende Schritte aufweist:

(a) Erhalt (**101**) eines Breitbandsignals (**78**) durch den Vibrationssensor (**62**), das Frequenzen enthält zu denen eine Lagerdefektspitze (**94**) des überwachten Lagers gehört;

(b) Analysieren (**107**) des Breitbandsignals (**78**) um das Vorhandensein einer Lagerdefektspitze (**94**) zu erkennen; und

(c) falls eine Lagerdefektspitze (**94**) vorhanden ist, Quantifizieren (**107**, **109**) der Amplitude der Lagerdefektspitze, um zu bestimmen, ob der Verschleiß des überwachten Lagers (**54**) wenigstens eine vorausgehend definierte Schwelle erreicht hat, wobei die drehbare Welle (**14**) zu einem Gasturbinentriebwerk (**10**) eines Flugzeugs gehört und wobei das Triebwerk (**10**) einen Hochtemperaturabschnitt (**60**) und einen Niedertemperaturabschnitt (**64**) aufweist, **dadurch gekennzeichnet**, dass das überwachte Lager (**54**) in dem Hochtemperaturabschnitt (**60**) und der Vibrationssensor (**62**) in dem Niedertemperaturabschnitt (**64**) angeordnet ist.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Lager (**54**) als Differentialwälzlager ausgebildet ist, mit einem drehbaren Innenring und einem drehbaren Außenring, wobei die Drehzahl des Innenrings (**82**) und die Drehzahl des Außenrings (**86**) in Schritt (b) (**107**) durch die Analyse des Breitbandsignals (**78**) bestimmt und in diese einbezogen ist.

3. System zur Überwachung des Zustands eines Lagers (**54**), das an einem Ende einer drehbaren Welle (**14**) angeordnet ist, wobei ein Vibrationssensor (**62**) der das Lager (**54**) überwacht, an dem anderen Ende der drehbaren Welle (**14**) jedoch in der Nähe derselben angeordnet ist, wobei das System aufweist:

(a) einen Vibrationssensor (**62**) im Abstand zu dem überwachten Lager (**54**) jedoch in der Nähe der drehbaren Welle (**14**), wobei der Vibrationssensor (**62**) dazu eingerichtet ist, von der drehbaren Welle (**14**) ein Breitbandsignal (**78**) abzunehmen, das Frequenzen enthält, zu denen eine Lagerdefektspitze (**94**) des überwachten Lagers (**54**) gehört; und

(b) einen Vibrationsmonitor (**90**), der in der Lage ist:

(1) ein Breitbandsignal (**78**) von dem Sensor (**62**) abzunehmen (**101**);

(2) das Breitbandsignal (**78**) zu analysieren (**107**), um das Vorhandensein der Lagerdefektspitze (**94**) zu erkennen; und

(3) um, wenn die Lagerdefektspitze (**94**) vorhanden ist, die Amplitude der Lagerdefektspitze (**94**) zu quantifizieren (**107**, **109**), um zu bestimmen, ob der Verschleiß des überwachten Lagers (**54**) wenigstens ein vorstehend bestimmtes Verschleißkriterium erreicht hat, wobei

die drehbare Welle (**14**) zu einem Gasturbinentriebwerk (**10**) eines Luftfahrzeugs gehört; und wobei das Triebwerk (**10**) einen Hochtemperaturbereich (**60**) und einen Niedertemperaturbereich (**64**) aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass das überwachte Lager (**54**) in dem Hochtemperaturbereich (**60**) und der Vibrationssensor (**62**) in dem Niedertemperaturbereich (**64**) angeordnet ist.

4. System nach Anspruch 3, bei dem das überwachte Lager (**54**) ein Differentialwälzlager mit einem drehenden Innenring und einem drehenden Außenring ist, wobei das System außerdem einen ersten Drehzahlsensor (**66**) und einen zweiten Drehzahlsensor (**70**) aufweist, wobei der erste Drehzahlsensor (**66**) ein Signal (**82**) über die Drehzahl des Innenrings und der zweite Drehzahlsensor (**70**) ein Signal (**86**) über die Drehzahl des Außenrings erhält und wobei der Vibrationsmonitor (**90**) die Signale (**82**, **86**) aufnimmt und bereithält, die bei der Analyse des Breitbandsignals in Schritt (b) (**107**) von dem ersten und dem zweiten Drehzahlsensor (**66**, **70**) erhalten worden sind.

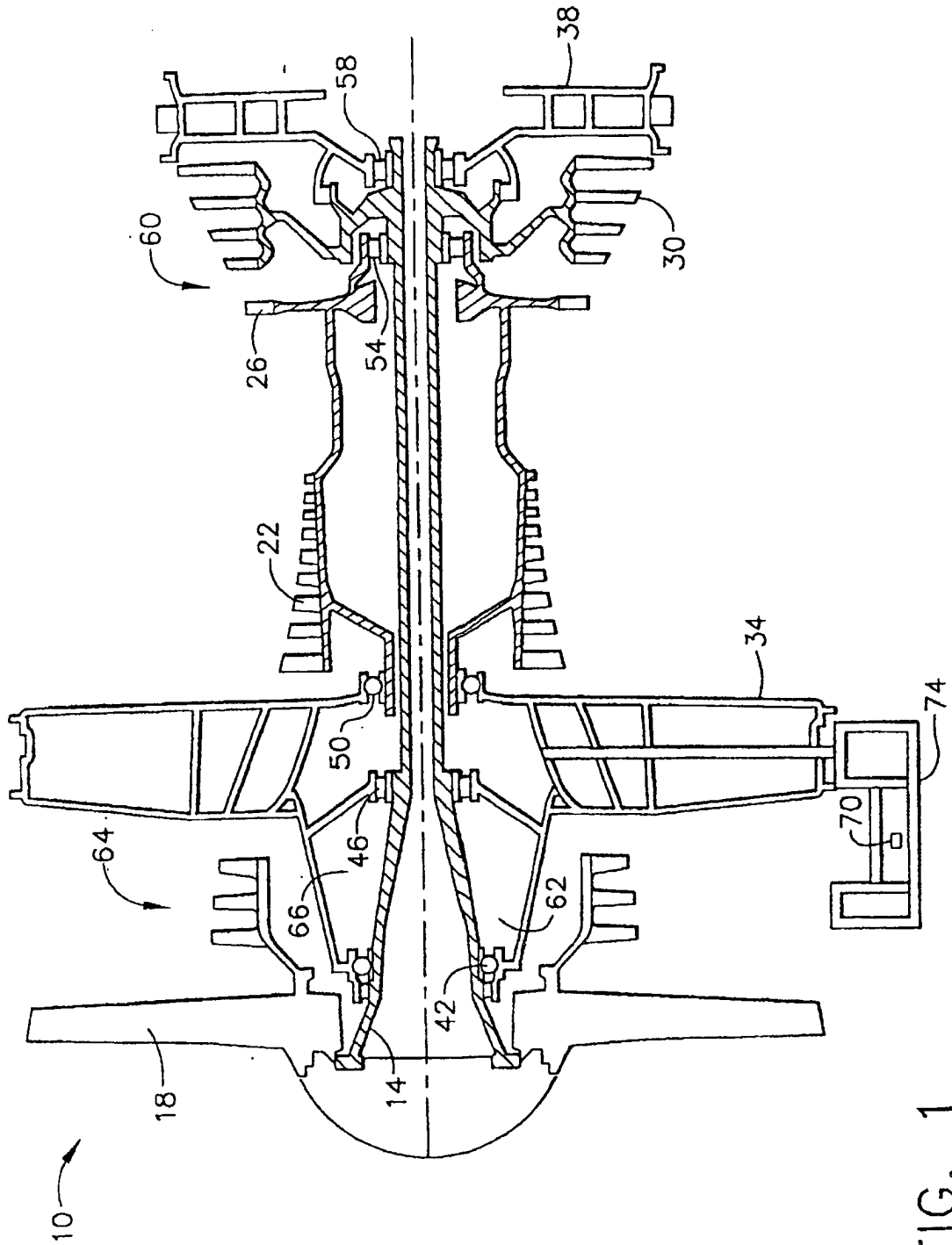
5. System nach Anspruch 3, bei dem der Vibrationsmonitor (**90**) dazu eingerichtet ist, eine Nachricht über die angemessene zu ergreifende (**110**) Aktion auszugeben, wenn in Schritt (c) bestimmt wird, dass das Schwellkriterium wenigstens erreicht worden ist (**107**, **109**).

6. Software zur Verwendung in einem Computersystem zur Überwachung des Zustands eines an einem Ende einer drehbaren Welle (**14**) montierten Lagers (**54**), gemäß einem der vorausgehenden Ansprüche, wobei zu dem System ein Vibrationssensor (**62**) gehört, der das Lager (**54**) überwacht und der an dem anderen Ende der drehbaren Welle (**14**) jedoch der drehbaren Welle (**14**) benachbart angeordnet ist, wobei der Vibrationssensor (**62**) in der Lage ist, ein Breitbandsignal (**78**) aufzunehmen, das Frequenzen

enthält, zu denen eine Lagerdefektspitze (94) des überwachten Lagers (54) gehört, wobei ein Vibrationsmonitor (90) vorgesehen ist, auf dem die Software installiert und benutzt werden kann, wobei die Software, wenn sie auf dem Vibrationsmonitor (90) installiert ist, in der Lage ist:

- (a) das Breitbandsignal (78) von dem Vibrationssensor (62) aufzunehmen (101);
- (b) das Breitbandsignal (78) zu analysieren (107), um das Vorhandensein einer Lagerdefektspitze (94) zu erkennen; und
- (c) um, wenn einer Lagerdefektspitze (94) vorhanden ist, die Amplitude der Lagerdefektspitze (94) zu quantifizieren, um zu bestimmen, ob der Verschleiß des überwachten Lagers (54) wenigstens ein vorausgehend bestimmtes Schwellkriterium erreicht hat.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen



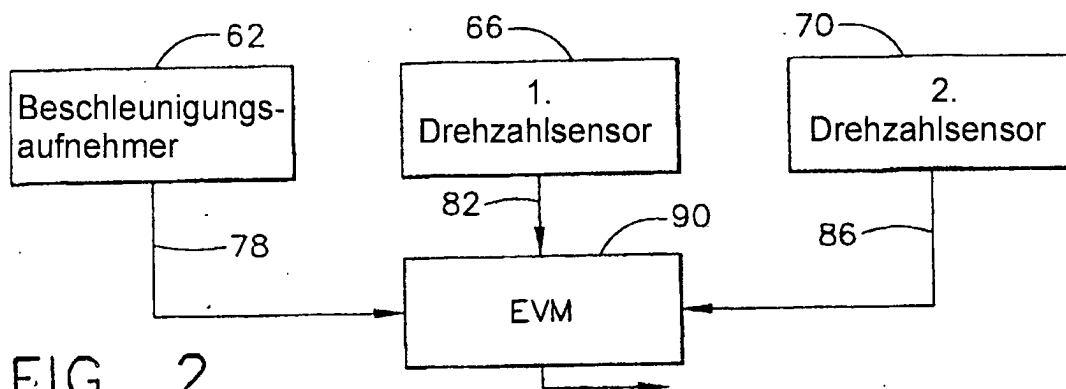


FIG. 2

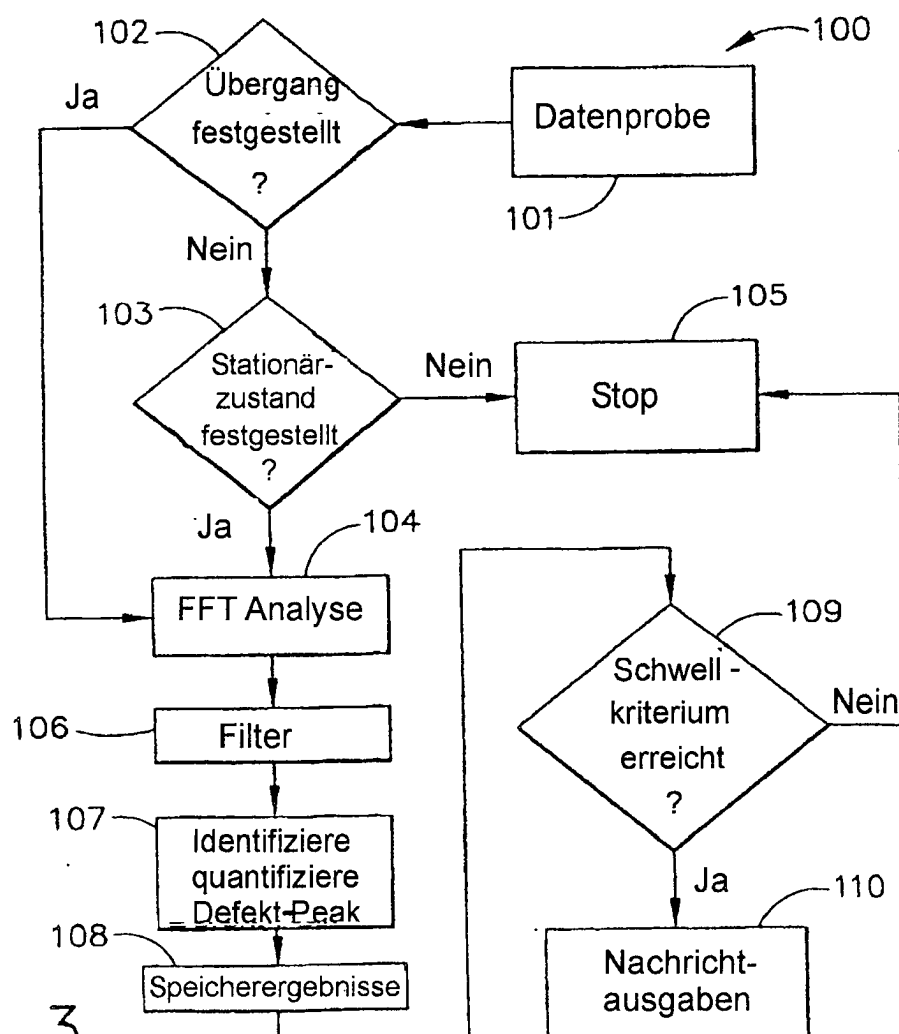


FIG. 3

3/3

