

(19)



(11)

EP 2 619 461 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
08.06.2016 Patentblatt 2016/23

(51) Int Cl.:
F04D 27/00 ^(2006.01) **F01D 21/00** ^(2006.01)
F01D 21/04 ^(2006.01) **G01H 1/00** ^(2006.01)
G07C 3/00 ^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **11813656.3**

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/DE2011/001739

(22) Anmeldetag: **19.09.2011**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2012/095062 (19.07.2012 Gazette 2012/29)

(54) **VORRICHTUNG UND VERFAHREN ZUM SICHEREN BETREIBEN EINES VERDICHTERS AN DER PUMPENGRENZE**

DEVICE AND METHOD FOR RELIABLY OPERATING A COMPRESSOR AT THE PUMP THRESHOLD

DISPOSITIF ET PROCÉDÉ POUR L'UTILISATION EN SÉCURITÉ D'UN COMPRESSEUR À LA LIMITE DE POMPAGE

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

(30) Priorität: **24.09.2010 DE 102010046490**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
31.07.2013 Patentblatt 2013/31

(73) Patentinhaber: **IAV GmbH**
10587 Berlin (DE)

(72) Erfinder:
• **KÖLLER, Malte**
18311 Ribnitz-Damgarten (DE)
• **MAGNOR, Olaf**
38104 Braunschweig (DE)
• **REITEBUCH, Daniel**
10715 Berlin (DE)

(56) Entgegenhaltungen:
EP-A2- 1 980 719 DE-A1-102008 036 305
US-A- 4 518 917 US-A- 4 573 358
US-A- 4 955 269 US-A1- 2009 078 051

EP 2 619 461 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

Technisches Gebiet

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine Vorrichtung gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 6 und ein Verfahren gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1 zum sicheren Betreiben eines Verdichters an der Pumpgrenze. Eine solche Vorrichtung und ein solches Verfahren ist z.B. aus der US-A-4 955 269 bekannt.

Stand der Technik

[0002] Verdichter sind thermische Strömungsmaschinen und werden zum Verdichten von Gasen, insbesondere Luft verwendet. Verdichter finden im Motorenbau für kontinuierlich oder periodisch arbeitende Brennkraftmaschinen weitreichende Anwendung und werden beispielsweise in Hubkolbenmotoren zur Leistungssteigerung, in Gasturbinen zur Erzeugung elektrischer Energie oder auch in Strahltriebwerken zum Antrieb von Flugzeugen eingesetzt, um die für die Verbrennung notwendige Luft zu verdichten. Der Antrieb des Verdichters erfolgt beispielsweise durch die Ausnutzung der im Abgas enthaltenen Energie, kann aber auch mechanisch oder elektrisch erfolgen.

[0003] Der Verdichter kann nach seinem Einsatzgebiet beispielsweise in einem Strahltriebwerk als Axialverdichter ausgeführt sein, um hohe Masseströme zu erreichen. Als Massestrom ist eine Luftmasse zu verstehen, welche während einer bestimmten Zeit durch den Verdichter gefördert wird. Alternativ können auch auf geometrische Bedingungen oder auf Umgebungsbedingungen bezogene Größen, wie Durchsatz oder Volumenstrom verwendet werden, um den Betrieb des Verdichters zu charakterisieren. Die zu verdichtende Luft strömt den Verdichter aus der Umgebung axial an und wird durch den Verdichter im Strahltriebwerk befördert und dabei verdichtet. Dazu ist der Verdichter im Allgemeinen aus einem auf einer Welle gelagerten Laufrad mit Verdichterschaukeln aufgebaut, welches sich in einem Gehäuse mit entsprechenden Leitschaufeln dreht und somit eine Verdichterstufe bildet. Die mit je einem Schaukelfuß versehenen Verdichterschaukeln sind am Laufrad spielend eingehangen, so dass sich die Verdichterschaukel bei einer ausreichend schnellen Drehung des Laufrades auf Grund der entstehenden nach außen gerichteten Fliehkraft selbst zentrieren und fest im Laufrad sitzen. Alternativ sind die Schaukeln fest mit dem Laufrad verbunden. Die Leitschaufeln sind fest am Gehäuse angeordnet. Zur Erhöhung der Verdichtung können in dem Verdichter für Strahltriebwerke mehrere Verdichterstufen hintereinander angeordnet sein, um so einen mehrstufigen Verdichter zu bilden. Weiterhin kann dem Verdichter ein Gebläse sowie ein zweiter Verdichter vorgeschaltet sein. Der Antrieb des Laufrades erfolgt über die Welle, welche durch eine Turbine am Ende des Strahltriebwerks angetrieben wird.

[0004] Beim Betrieb des Verdichters wird die Verdichterleistung durch die Laufraddrehzahl und durch den Massestrom im Verdichter eingestellt. Dafür kann beispielsweise die Antriebsleistung der Welle durch die Turbine verändert werden, um die Drehzahl des Laufrades einzustellen. Der Massestrom im Verdichter kann über verstellbare Leitschaufeln, Abblasventile oder Schaukel-spitzenspaltänderung variiert werden. Dadurch lässt sich ein Betriebspunkt des Verdichters einstellen, welcher sich beispielsweise durch ein Druckverhältnis und einen Massestrom, durch Verdichterleistung und Drehzahl oder andere Alternativen definiert.

[0005] Das Druckverhältnis einer Verdichterstufe wird dadurch nach oben begrenzt, dass die in der Verdichterstufe verdichtete Luft nicht beliebig der Verdichterschaukelkontur folgen kann, sondern sich beginnend von der Hinterkante der Verdichterschaukel ablöst. Das maximale Stufendruckverhältnis steigt mit zunehmendem Massestrom an und stellt die äußerste Grenze des stabilen Betriebsbereiches als Pumpgrenze dar. Der maximale Massestrom der Verdichterstufe wird durch eine Stopfgrenze begrenzt, sobald sich in einem Strömungsquerschnitt, üblicherweise am Verdichtereintritt eine Strömungsgeschwindigkeit in Höhe der Schallgeschwindigkeit ausbildet und dadurch den durchgesetzten Massestrom begrenzt.

[0006] In Abhängigkeit vom Anströmwinkel oder der Anströmgeschwindigkeit der Luft an die Verdichterschaukel stellt man zwischen Ober- und Unterseite einen Druckunterschied fest. Da es sich bei einer Verdichterschaukel um ein elastisches Bauteil handelt, wird sie dem Druckunterschied zwischen Ober- und Unterseite nachgeben und sich durchbiegen. Mit zunehmender Belastung steigen die Durchbiegung und damit die Auslenkung der Verdichterschaukeln.

[0007] Der Betriebsbereich des Verdichters wird somit einerseits durch die Pumpgrenze und andererseits durch die Stopfgrenze begrenzt. Dabei ist die Pumpgrenze ein für den Verdichter ungünstiger, instabiler Betriebszustand, bei dem es zur Zerstörung des Verdichters kommen kann. Dieser instabile Betriebszustand ist vor allem beim Einsatz des Verdichters in Strahltriebwerken unbedingt zu vermeiden, um die Betriebssicherheit zu gewährleisten.

[0008] Pumpen tritt auf, wenn der für ein Druckverhältnis über eine Verdichterstufe erforderliche Massestrom zu gering ist, beziehungsweise das Druckverhältnis für einen bestimmten Massestrom zu groß ist und es dadurch zu einer Rückströmung und somit zu einem Strömungsabriss kommt. Dadurch werden das Druckverhältnis und der Massestrom kurzzeitig verändert, wodurch sich der Betriebspunkt kurzzeitig im stabilen Bereich befindet und sich danach wiederum der instabile Betriebszustand einstellt. Dieser zyklisch Wechsel zwischen stabilem und instabilem Betriebszustand nahe der Pumpgrenze kann beispielsweise nur an einigen Verdichterschaukeln eintreten, wobei nur einzelne Verdichterschaukeln einen Strömungsabriss aufweisen und sich dieser Effekt

entgegen der Drehrichtung des Verdichterrades fortsetzt. Durch den zyklischen Wechsel der Strömung kommt es zu zyklisch wechselnden Belastungen einzelner Verdichterschaukeln. Durch den zunehmenden Strömungsabriss und die damit verbundene Wechselbelastung beginnt die Verdichterschaukel zu schwingern, wobei sich die Verdichterschaukeln durch diese Wechselbelastung durchbiegen und brechen können. Stellt sich jedoch ein instabiler Betriebszustand über der Pumpgrenze ein, kommt es jedoch zu einem kompletten Strömungsabriss und erheblichen Druckstößen im Verdichter. Im Gesamttriebwerk stellt dieser Zustand eine erhebliche Gefahr durch verlöschende Flammen, brennenden Kraftstoff im Verdichter, Überhitzungen, Deformierungen und so weiter dar, wobei der Verdichter und somit das Strahltriebwerk komplett zerstört werden können.

[0009] Der Verlauf der Pumpgrenze des Betriebsbereiches unterliegt betriebsbedingten und alterungsbedingten Änderungen. So wird die Pumpgrenze durch die Veränderungen der Umgebungsbedingungen während des Flugbetriebs, Anströmbedingungen des Verdichters, durch die thermische Trägheit der Komponenten sowie durch das Eindringen von Fremdoobjekten beeinflusst. Auch Veränderungen im Spitzenspalt der Verdichterschaukeln zum Gehäuse hin, Veränderungen im Lagerpiel durch Alterung und Abnutzung, Verformungen und Ablagerungen der Schaukelgeometrien und am Gehäuse haben Einfluss auf die Pumpgrenze.

[0010] Durch einen ausreichend großen Druckverhältnisabstand der zulässigen Betriebszustände des Verdichters zur Pumpgrenze soll die durch die Einflüsse resultierende Absenkung der Pumpgrenze zu niedrigeren Druckverhältnissen berücksichtigt werden. Der kritischste Betriebszustand wird bei der Beschleunigung des Verdichters erreicht, bei dem der Pumpgrenzenabstand vorübergehend verringert wird. In der Praxis wird der Pumpgrenzenabstand für Neutriebwerke auf etwa 25% des Druckverhältnisses ausgelegt, so dass er sich bis zum Ende der Lebensdauer des Verdichters durch die alterungsbedingte Absenkung der Pumpgrenze auf 5% verringert hat.

[0011] Das Wirkungsgradoptimum eines Verdichters liegt im Allgemeinen nahe der Pumpgrenze im stabilen Betriebsbereich, wodurch ein Verbrauchsnachteil auf Grund der sicherheitsrelevanten Auslegung des Pumpgrenzerabstands entsteht. Deshalb sind aus dem Stand der Technik Vorrichtungen und Verfahren zum Betreiben von Verdichtern bekannt, mit denen die Verdichter vor diesem gefährlichen Betriebszustand bei optimalem Verdichterwirkungsrad geschützt werden sollen. Beispielsweise werden Abblasventile verwendet, um das Druckverhältnis über eine Verdichterstufe zu senken. In vielen Fällen ist eine Verstellung drehbar gelagerter Leitschaukeln vorgesehen, mit denen das Druckverhältnis beziehungsweise der Massestrom variiert werden kann, um somit einen sicheren, stabilen Betriebszustand zu gewährleisten. Weiterhin ist eine aktive Änderung des Spitzenspalts der Verdichterschaukel durch Erwärmung oder

Abkühlung des Verdichtergehäuses bekannt. Als Voraussetzung dafür ist jedoch eine sichere Erkennung des Betriebszustandes des Verdichters und dementsprechend der Abstand des aktuellen Betriebspunktes des Verdichters zur Pumpgrenze notwendig.

[0012] Die Auslenkung der Verdichterschaukelspitze kann aus der Zeitdifferenz des gemessenen Durchgangszeitpunktes der Verdichterschaukelspitze an einem Sensor am Gehäuse und einem idealen Durchgangszeitpunkt, der sich bei einer ideal steifen Verdichterschaukel ergeben würde, und der bekannten Tangentialgeschwindigkeit der Verdichterschaukelspitze berechnet werden. Als Durchgangszeitpunkt wird der Zeitpunkt verstanden, zu dem sich die Verdichterschaukelspitze wenigstens teilweise im Sensorbereich des Sensors am Gehäuse des Verdichters befindet. Dabei kann beispielsweise der Eintritt in den Sensorbereich, der Durchgang durch den Sensorbereich oder der Austritt aus dem Sensorbereich definiert werden, um den Durchgangszeitpunkt zu definieren.

[0013] Die Patentschrift US 6,474,935 B1 beschreibt die Erkennung rotierender Ablösungen basierend auf der Messung der Auslenkung der Verdichterschaukelspitzen infolge von Druckschwankungen, die durch die umlaufende Ablösezone entstehen.

[0014] Das Verfahren beruht demnach auf der Identifikation von Vorzeichen eines instabilen Verdichterzustandes. Bekannt ist, dass sich diese Vorzeichen wenige Millisekunden vor Einsetzen der Verdichterinstabilität zeigen, so dass zur Durchführung von Gegenmaßnahmen, zum Beispiel Verringerung der Brennstoffmasse, Öffnen der Abblasventile oder Verstellen der Leitschaukeln, nicht mehr ausreichend Zeit verbleibt.

[0015] Die Offenlegungsschrift DE 10 2008 036 305 A1 beschreibt ein Verfahren, bei dem aus den Durchgangszeiten der einzelnen Verdichterschaukeln eine Leistungsaufnahme des Verdichters ermittelt wird. Dafür werden die realen Durchgangszeiten mit den idealen Modelldurchgangszeiten verglichen und deren Differenz als Folge der Durchbiegung der Verdichterschaukeln ausgewertet. Aus der Durchbiegung der Verdichterschaukeln lässt sich ein Verdichtermoment und dementsprechend mit der Verdichterdrehzahl eine Verdichterleistung berechnen. Im stabilen Betriebszustand stellt sich ein Gleichgewicht zwischen der Antriebsleistung und der Verdichterleistung ein. Eine Störung dieses Leistungsgleichgewichtes wird als beginnende Instabilität gewertet und das Annähern an die Pumpgrenze angezeigt.

[0016] Gemäß der US 4,955,269 A ist es vorbekannt, zur Überwachung von Ermüdungserscheinungen, beispielsweise des Rotors einer Turbine, eine ruhende Belastung und eine schwingende Belastung zu messen.

[0017] Gemäß der US 4,518,917 A ist es vorbekannt, bei einer Turbine mehrere Abstandssensoren vorzusehen und den Abstand zwischen der Strömungsführung und den Schaukelspitzen der Turbine zu überwachen.

[0018] Gemäß der EP 1 980 719 A2 ist es vorbekannt,

mittels eines Mikrowellenmeßsystems, den Zustand des Läufers einer Turbomaschine zu überwachen.

[0019] Gemäß der US 4,573,358 A ist es vorbekannt, zum Aufzeigen von Vibrationen der Schaufelblätter einer rotierenden Maschine, eine Vielzahl von Sensoren um die Schaufelblätter anzuordnen und die Signale der Sensoren so zu kombinieren, dass ein Signal erhalten wird, das die Vibrationen charakterisiert.

[0020] Gemäß der US 2009/078051 A1 ist es vorbekannt, zur Überwachung der Vibrationen der Schaufelblätter einer Turbine, einen Sensor versetzt gegenüber der Rotationsachse eines Prüfkopfes anzuordnen.

[0021] Der Zustand, wie Verschleiß, Verschmutzung, Erosion und Deformationen an den Verdichterschaufeln, sowie die Veränderung der Lage der Verdichterschaufeln, die sich bei jedem Triebwerksstart durch das Schaufelfußspiel neu ausrichten, haben Einfluss auf den gemessenen Durchgangszeitpunkt im Bezug auf den nominalen Durchgangszeitpunkt, auf deren Basis die Durchbiegung beziehungsweise die Auslenkung der Verdichterschaufeln ermittelt und auf den Betriebspunkt und dessen Abstand zur Pumpgrenze geschlossen wird. Die im Stand der Technik bekannten Verfahren können diesen Einfluss nicht erkennen und eliminieren, so dass es zu Fehlerkennungen kommen kann. Eine sichere Ermittlung des Betriebspunktes des Verdichters und damit des Pumpgrenzenabstands des Betriebspunktes ist nicht möglich.

Aufgabe der Erfindung

[0022] Die Aufgabe der Erfindung besteht darin, ein Verfahren sowie eine Vorrichtung bereitzustellen, mit denen eine sichere Erkennung des Betriebszustandes des Verdichters ermöglicht wird. Die Erkennung soll unabhängig von Einflüssen aus einem veränderten Zustand oder einer veränderten Lage der Verdichterschaufeln erfolgen.

Lösung der Aufgabe

[0023] Die Aufgabe wird durch das Verfahren nach den Merkmalen des Patentanspruches 1 und der Vorrichtung nach Patentanspruch 6 gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen des Verfahrens und der Vorrichtung ergeben sich aus den jeweiligen Unteransprüchen.

Beschreibung der Erfindung

[0024] Der Zustand jeder einzelnen Verdichterschaufel, wie Verschleiß, Verschmutzung, Erosion und Deformationen definiert eine Abweichung von einem Idealzustand und hat Einfluss auf den realen, gemessenen Durchgangszeitpunkt. Als Durchgangszeitpunkt wird der Zeitpunkt verstanden, zu dem sich die Verdichterschaufelspitze wenigstens teilweise in einem Sensorbereich eines Sensors am Gehäuse des Verdichters befindet.

[0025] Dabei kann beispielsweise der Eintritt in den

Sensorbereich, der Durchgang durch den Sensorbereich oder der Austritt aus dem Sensorbereich verwendet werden, um den Durchgangszeitpunkt zu definieren.

[0026] Die Lage jeder einzelnen Verdichterschaufel am Laufrad kann sich bei jedem Start verändern. Da die Verdichterschaufeln im Laufrad spielend gelagert sind und erst beim Hochfahren des Verdichters bei einer Mindestdrehzahl aufgrund der Fliehkraft sich in der Führung selbstständig ausrichten und verankern, kommen diese Abweichungen von Betriebseinsatz zu Betriebseinsatz zu Stande. Auch bei Verdichtern mit fest am Laufrad angebrachten Verdichterschaufeln kann eine Lageveränderung beispielsweise durch Montagearbeiten erfolgen.

[0027] Alle Abweichungen beeinflussen den Durchgangszeitpunkt und bedingen somit eine Differenz zwischen gemessenem und idealem Durchgangszeitpunkt. Als idealer Durchgangszeitpunkt wird jener Zeitpunkt verstanden, welcher sich bei einem idealen Laufrad mit äquidistanter Verdichterschaufelanordnung und unendlich steifen Verdichterschaufeln ohne Abweichungen aus Zustand und Lage ergeben würde.

[0028] Als Durchgangszeitpunkt wird der Zeitpunkt verstanden, zu dem sich die Verdichterschaufelspitze wenigstens teilweise im Sensorbereich des Sensors am Gehäuse des Verdichters befindet. Dabei kann beispielsweise der Eintritt in den Sensorbereich, der Durchgang durch den Sensorbereich oder der Austritt aus dem Sensorbereich definiert werden, um den Durchgangszeitpunkt zu definieren.

[0029] Die Abweichungen vom idealen Durchgangszeitpunkt der Verdichterschaufeln aus Zustand und Lage wird während eines Betriebseinsatzes des Verdichters als unveränderlich angenommen. Als Betriebseinsatz soll der Betrieb des Verdichters zwischen dem Anfahren und dem Abstellen, also dem Starten und Stoppen, verstanden werden.

[0030] Hat der Verdichter beim Hochfahren die Mindestdrehzahl für das selbstständige Ausrichten der Verdichterschaufeln erreicht, richten sich die Verdichterschaufeln aus. Die Abweichungen der Verdichterschaufel vom Idealzustand hinsichtlich Zustand und Lage bleiben für diesen Betriebseinsatz konstant und können kompensiert werden. Erst beim Herunterfahren des Verdichters unter einer bestimmten Mindestdrehzahl lockern sich die Verdichterschaufeln entsprechend dem Fußspiel und die Abweichungen sind wieder unbestimmt..

[0031] Die Erfindung stellt ein Verfahren bereit, mit dem eine sichere Erkennung des Betriebszustandes unabhängig vom Zustand und Lage der Verdichterschaufeln und dadurch ein optimaler Verdichterbetrieb ermöglicht wird. In erfindungsgemäß vorteilhafter Weise werden die Abweichungen vom Idealzustand jeder einzelnen Verdichterschaufel beim Hochfahren des Verdichters nach dem Erreichen der Mindestdrehzahl zum Ausrichten der Verdichterschaufeln ermittelt. Basierend auf dieser verdichterschaufelindividuell bestimmten Abweichung kann eine Korrektur der im Betrieb gemessenen

Durchgangszeitpunkte jeder Verdichterschaukel erfolgen. Diese Korrektur ermöglicht eine genaue Bestimmung des Betriebszustands sowie einen wirkungsgrad-optimalen Betrieb des Verdichters unterhalb der Pumpgrenze. Bei jedem Start des Verdichters werden die Abweichungen der Verdichterschaukel gegenüber dem Idealzustand neu ermittelt, adaptiert und in die Auswertung einbezogen. Die so korrigierten gemessenen Durchgangszeitpunkte werden zur Ermittlung der Auslenkung infolge der Durchbiegung der Verdichterschaukel herangezogen, wobei erfindungsgemäß vorteilhaft nur die Durchbiegung infolge der Strömungsmechanik ermittelt wird. Eine vom Zustand und der Lage der Verdichterschaukel unabhängige Betriebspunktermittlung wird erreicht.

[0032] Die Erfindung stellt weiterhin eine Vorrichtung bereit, mit welcher die Abweichungen ermittelt werden und eine Korrektur der Durchgangszeitpunkte erfolgt. Die Vorrichtung beinhaltet wenigstens einen Sensor zur Anzeige des Durchgangs einer Verdichterschaukel, fortan Verdichterschaukelsensor genannt, und wenigstens einen Sensor zur Anzeige der Drehung des Laufrades, fortan Laufradsensor genannt. Der Verdichterschaukelsensor gibt ein Triggersignal aus, wenn sich eine Verdichterschaukel vorbeibewegt. Zur Verbesserung des Triggersignals kann an der Verdichterschaukelspitze eine Markierung oder ähnliches vorgesehen sein. Aus dem Signal wird der Durchgangszeitpunkt ermittelt. Der Laufradsensor gibt ein Triggersignal entsprechend der Drehung des Laufrades aus. Daraus kann beispielsweise die Drehzahl des Laufrades berechnet werden. Auch hier können entsprechende Markierungen vorgesehen sein. Um die Genauigkeit der Drehzahlerfassung zu erhöhen, können mehrere Markierungen vorgesehen sein, um während einer Umdrehung des Laufrades mehrere Triggersignale zu erfassen, um mögliche Drehzahlschwankungen genauer abzubilden. Jedoch wird im Allgemeinen eine Markierung ausreichen, da die Drehzahl äußerst geringen Drehzahlschwankungen aufgrund der Trägheit des Laufrades unterliegt.

[0033] Die Triggersignale der Sensoren sind mittels einer zentralen Zeitbasis zueinander bezogen, so dass eine genaue Zuordnung der Triggersignale von Laufrad und Verdichterschaukel erfolgen kann. Demnach kann über den Bezug von Verdichterschaukelsensor und Laufradsensor ein Vergleich zwischen gemessenem und idealem Durchgangszeitpunkt für jede einzelne Verdichterschaukel erfolgen.

[0034] Parallel zum realen Laufrad wird in erfindungsgemäß vorteilhafter Weise ein Verdichternominalmodell verwendet, welches das Laufrad mit den Verdichterschaukel als ideales Laufrad mit äquidistanter Verdichterschaukelanordnung mit unendlich steifen idealen Verdichterschaukel ohne Abweichungen aus Zustand und Lage abbildet. Das Verdichternominalmodell kann als ein Speicherfeld abgebildet werden, in dem Speicherzellen gleich der Anzahl der Verdichterschaukel vorhanden sind. Es wird dabei jeder individuellen Verdichterschaukel

eine individuelle Speicherzelle zugeordnet. Mittels eines beliebigen Reglers, vorzugsweise eines PID-Reglers, wird das Verdichternominalmodell der gemessenen Drehzahl des Laufrades phasengleich angepasst, so dass ein direkter Vergleich zwischen realem Laufrad und dem idealen Laufrad, dargestellt durch das Verdichternominalmodell, möglich ist. Dadurch wird eine Speicherzellenrotation gleich der Rotation des realen Laufrades erreicht. Alternativ kann ein mit der Rotation des Laufrades synchronisierter Zähler verwendet werden, mit dem die individuelle Speicherzelle des Speicherfeldes angesprochen werden kann. Das Verdichternominalmodell liefert nun für jede am Verdichterschaukelsensor durchgehende individuelle Verdichterschaukel den individuellen idealen Durchgangszeitpunkt, also die Zeit, die eine geometrisch ideale und unendlich steife Verdichterschaukel am Sensor erzeugen würde. Die Differenz aus idealem Durchgangszeitpunkt und dem real am Verdichterschaukelsensor gemessenen Durchgangszeitpunkt der jeweiligen Verdichterschaukel ergibt die Abweichung, also den relativen Durchgangszeitpunkt. Dafür ist in der erfindungsgemäßen Vorrichtung ein Differenzierer vorgesehen, um die entsprechende Operation durchzuführen. Der relative Durchgangszeitpunkt ist für den Idealfall gleich null und setzt sich im Realfall aus einer zustands- und lagebedingten Abweichung und dem eigentlichen Nutzsignal, also der strömungsmechanisch bedingten Abweichung, zusammen.

[0035] Bei sehr geringer Verdichterdrehzahl, beispielsweise im Leerlaufzustand oder beim Starten der Triebwerke kann der strömungsmechanisch bedingte Anteil der Abweichung als vernachlässigbar gering angesehen werden, so dass die zustands- und lagebedingte Abweichung überwiegt. Diese zustands- und lagebedingte Abweichung wird verdichterschaukelindividuell einem Verdichteradaptionsmodell zugeordnet, wobei das Verdichteradaptionsmodell analog zum Verdichternominalmodell entsprechend gleich viele Speicherzellen aufweist. Dazu ist in der Vorrichtung erfindungsgemäß neben dem Verdichternominalmodell das Verdichteradaptionsmodell mit einer Umschalteneinheit integriert, mit welcher zwischen Arbeitsmodus und Lernbeziehungsweise Adaptionsmodus umgeschaltet wird. Wenn der Adaptionsmodus freigegeben ist, beispielsweise durch Drehzahlschwellen des Laufrades, kann die Adaption erfolgen. Im Arbeitsmodus nach dem Hochlaufen und dem Betrieb des Strahltriebwerks werden die verdichterschaukelindividuellen zustands- und lagebedingten Abweichungen aus dem Verdichteradaptionsmodell verwendet, um den relativen Durchgangszeitpunkt der jeweiligen Verdichterschaukel zu einem korrigierten relativen Durchgangszeitpunkt zu korrigieren, so dass nur noch der strömungsmechanisch bedingte Anteil zur Berechnung der Auslenkung der Verdichterschaukel berechnet wird. Die im Verdichteradaptionsmodell abgelegten zustands- und lagebedingten Abweichungen können als Abstand oder als Faktor in Form einer Zeit, eines Weges oder eines Winkels und so weiter hinterlegt sein.

Zur Korrektur der zustands- und lagebedingten Abweichungen jeder individuellen Verdichterschaukel kann der gemessene Durchgangszeitpunkt oder der daraus berechnete relative Durchgangszeitpunkt herangezogen werden. Weiterhin wird die Laufraddrehzahl beziehungsweise die Tangentialgeschwindigkeit der Verdichterschaukelspitzen verwendet, um eine absolute Abweichung als Weg oder Winkel gegenüber dem Idealzustand zu berechnen. Weiterhin können geometrische Parameter des Verdichters und dessen Bestandteile in die Auswertung einbezogen werden. In vorteilhafter Weise kann das Verdichternominalmodell mit dem Verdichteradaptionsmodell zusammengefasst werden.

[0036] Da die Auslenkung der Verdichterschaukel in Abhängigkeit vom Massestrom nicht monoton ist, sondern ein Maximum unterhalb der Pumpgrenze aufweist, ist die aus der Auslenkung berechnete Verdichterleistung zweideutig. Dieses Problem wird dadurch gelöst, dass die Änderung der Auslenkung während Betriebspunktänderungen beobachtet wird. Prinzipiell kann die Betriebspunktänderung durch die zwangsweise Modulation des Brennstoffmassenstroms erfolgen. Dies ist jedoch nicht erforderlich, da der Brennstoffmassenstrom sowohl durch Schubhebelverstellungen durch den Luftfahrzeugführer, als auch durch Ausregelaktivitäten des Autopiloten ohnehin fortwährend variiert wird.

[0037] Aus diesen Informationen zum korrigierten relativen Durchgangszeitpunkt, Verdichterschaukelauslenkung und deren Verlauf zusammen mit der Kenntnis über Verdichterdrehzahl, Gesamttriebswerksdruckdifferenz kann auf den momentanen Betriebspunkt des Verdichters und damit auf den momentanen Abstand des Betriebspunktes von der Pumpgrenze geschlossen werden.

[0038] Zur Verbesserung des erfindungsgemäßen Verfahrens kann eine Sensorkonfiguration verwendet werden, welche aus wenigstens zwei Verdichterschaukelsensoren und einem Laufradsensor besteht. Bei Vorhandensein nur eines Sensors können Blattschwingungen mit gleicher oder vielfacher Frequenz der Laufradfrequenz nicht erkannt werden. Durch die Erhöhung der Anzahl der Verdichterschaukelsensoren und deren unregelmäßige Verteilung über dem Verdichtenumfang können auch diese Frequenzen erfasst werden. Es können Sensoren mit verschiedenen Funktionsweisen verwendet werden. Eine Kombination aus Durchgangssensitivität und Abstandssensitivität würde jedoch den Vorteil mit sich bringen, eine Spaltregelung für die Verdichterschaukeln zu ermöglichen.

[0039] Als Erweiterung des erfindungsgemäßen Verfahrens bietet sich die Berechnung des Anströmwinkels aus den vorliegenden Informationen an. Der berechnete Anströmwinkel wird kontinuierlich in ein beschreibbares Kennfeld eingetragen und so im Laufe der Betriebszeit des Triebwerkes dessen Betriebskennfeld ermittelt und festgehalten. Es ist zudem aus Experimenten am Prüfstand bekannt, bei welchem Anströmwinkel es zur Strömungsablösung und somit zum Verdichterpumpen

kommt, so dass die Pumpgrenze fest im Kennfeld hinterlegt wird. Durch nichtflüchtiges Speicherverhalten bleiben diese Informationen auch nach Herunterfahren des Triebwerks erhalten, so dass eine feste Sicherheitsschwelle für den stabilen Betrieb des Strahltriebwerks vorliegt.

[0040] Das erfindungsgemäße Verfahren kann auf eine Verdichterstufe oder auf mehrere beziehungsweise ausgewählte Verdichterstufen angewendet werden, die besonders von der Gefahr des Pumpens betroffen sind.

[0041] Das erfindungsgemäße Verfahren ist geeignet, nicht nur Verdichterstabilitäten durch verdichterschaukelweise Betrachtung zu erkennen, sondern auch zwischen rotierenden Ablösungen und Verdichterschaukelklappen zu unterscheiden, da rotierende Ablösungen im Gegensatz zu Verdichterschaukelklappen umlaufen. Das erfindungsgemäße Verfahren erlaubt eine optimale Einstellung der Aktuatoren eines Verdichters, da der tatsächliche Betriebszustand des Verdichters und die Lage der Pumpgrenze bekannt sind. Der Verdichter kann somit wirkungsgradoptimal betrieben werden, ohne dass in den instabilen Betriebszustand hineingefahren werden muss. Als Folge davon wird der spezifische Verbrauch gesenkt. Der Verdichter kann beispielsweise leichter und auch kleiner ausgelegt werden.

[0042] Das erfindungsgemäße Verfahren bedarf nicht des Anfahrens an die Pumpgrenze, um deren Lage bestimmen zu können. Als Folge davon wird die Sicherheit erhöht.

[0043] Das erfindungsgemäße Verfahren adaptiert laufend das Betriebskennfeld, so dass der Betrieb des Verdichters fortlaufend an seinen Alterungszustand angepasst wird. Als Folge davon sinkt der spezifische Verbrauch. Sollte es beispielsweise zu einer Verdichterstabilität kommen, welche durch das Verfahren erkannt werden kann, wird dieses Verhalten im Betriebskennfeld durch Anpassen der Pumpgrenze korrigiert.

[0044] Das erfindungsgemäße Verfahren prädiziert das Ausfallverhalten des Kompressors, so dass unplanmäßige Wartungen vermieden werden und die verfügbare Lebensdauer bekannt ist. Als Folge davon werden Betriebskosten, Wartungskosten, Konventionalkosten und Lagerhaltungskosten gesenkt und die Verfügbarkeit erhöht.

[0045] Das erfindungsgemäße Verfahren ist zudem kompatibel zu Verfahren der aktiven Spaltkontrolle, bei denen der Spalt zwischen den Verdichterschaukelspitzen und dem Gehäuse kontrolliert beziehungsweise geregelt wird. Weiterhin kann der Einsatz variabler Leitschaukeln und die Zapfluftabnahme optimiert werden.

Ausführungsbeispiel

[0046] Beispielhaft wird hier eine Ausführung der erfindungsgemäßen Vorrichtung dargestellt. In der dazugehörigen Figur zeigt:

FIGUR 1: eine schematische Darstellung der Vor-

richtung zum sicheren Betreiben eines Verdichters an der Pumpgrenze.

[0047] Die beispielhaft ausgestaltete Vorrichtung besteht aus einem Verdichterschaufelsensor (1), welcher entsprechend des Durchgangs einer Verdichterschaufel ein Triggersignal ausgibt und einem Laufradsensor (2), welcher entsprechend einer Umdrehung des Laufrades des Verdichters ein Triggersignal ausgibt. Mittels einer zentralen Zeitbasis (3) werden die beiden Triggersignale mit einem Zeitstempel versehen. Des Weiteren ist die Vorrichtung mit einem Verdichternominalmodell (4) und einem Verdichteradaptionsmodell (5) ausgestattet, welche mittels eines Reglers (6) zur Drehzahl des Laufrades phasengleich durchlaufen. Der Regler (6) nimmt einen Eingriff entsprechend der Regelabweichung vor. Das Verdichternominalmodell (4) als auch das Verdichteradaptionsmodell (5) besteht dazu aus mehreren Speicherzellen (4a, 5a), wobei die Anzahl der Speicherzellen jedes Modells der Anzahl der Verdichterschaufeln entspricht. Die Speicherzellen werden entsprechend der Drehzahl des Laufrades durch den Regler (6) phasengleich angesprochen. Das Verdichternominalmodell (4) gibt einen idealen Durchgangszeitpunkt entsprechend der aktuellen Verdichterschaufel aus, welches in einem Differenzierer (7) mit dem gemessenen Durchgangszeitpunkt verglichen wird und einen relativen Durchgangszeitpunkt ausgibt. Danach werden die in einem Lemmodus adaptierten Zustands- und Lageabweichungen der jeweiligen Verdichterschaufel aus dem Verdichteradaptionsmodell (5) mit dem relativen Durchgangszeitpunkt verrechnet. Damit das Verdichteradaptionsmodell (5) adaptiert werden kann, ist ein Schalter (8) vorgesehen, welcher bei einer erfüllten Bedingung (9) in einen Adaptionsmodus umschaltet. Ist die Bedingung (9) nicht erfüllt, wird die Vorrichtung im Arbeitsmodus betrieben. Die Vorrichtung gibt wenigstens eine Betriebspunktinformation aus, die aus dem korrigierten relativen Durchgangszeitpunkt und weiteren Größen in einer Auswerteeinheit (10) berechnet wurde.

[0048] In einer alternativen Ausgestaltung der Vorrichtung kann das Verdichternominalmodell (4) durch eine Funktion ersetzt werden, die den idealen Durchgangszeitpunkt in Abhängigkeit der Laufraddrehzahl ausgibt, da diese für alle Verdichterschaufeln und der Modellannahme des idealen Laufrades gleich ist.

[0049] In einer alternativen Ausgestaltung der Vorrichtung kann das Verdichteradaptionsmodell (5) durch ein Kennfeld ersetzt werden, dessen Kennfeldpunkte diskret angesprochen werden können und die Abweichung der jeweiligen Verdichterschaufel ausgeben. Die Kennfeldpunkte können beispielsweise mittels eines mit dem Laufrad synchronisierten Zählers erfolgen.

Aufstellung der verwendeten Bezugszeichen

[0050]

- 1 Verdichterschaufelsensor
- 2 Laufradsensor
- 3 Zeitbasis
- 4 Verdichternominalmodell
- 5 4a Speicherzelle
- 5 Verdichteradaptionsmodell
- 5a Speicherzelle
- 6 Regler
- 7 Differenzierer
- 10 8 Schalter
- 9 Bedingung
- 10 Auswerteeinheit

15 Patentansprüche

1. Verfahren zum Ermitteln des Betriebspunktes eines Verdichters mit wenigstens einem Laufrad, mit am Laufrad befestigten Verdichterschaufeln, einem Gehäuse und wenigstens zwei Sensoren (1,2), wobei eine Berechnung der Auslenkung der Verdichterschaufeln erfolgt, auf deren Basis der Betriebspunkt und dessen Abstand zur Pumpgrenze ermittelt werden, indem Durchgangszeitpunkte der Verdichterschaufeln an einem Sensor (1,2) gemessen werden und ein drehzahlrepräsentatives Signal des Verdichterschaufels ermittelt wird, **dadurch gekennzeichnet, dass** während eines Lern- oder Adaptionsmodus verdichterschaufelindividuelle, zustands- und lagebedingte Abweichungen von einem Idealzustand ermittelt werden, indem verdichterschaufelindividuelle Durchgangszeitpunkte gemessen und mit idealen Durchgangszeitpunkten verglichen werden, und dass während eines Arbeitsmodus .. verdichterschaufelindividuelle Durchgangszeitpunkte gemessen werden und mit den ermittelten zustands- und lagebedingten Abweichungen korrigiert werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die verdichterschaufelindividuellen, zustands- und lagebedingten Abweichungen der Verdichterschaufeln beim Hochfahren des Verdichters nach dem Ausrichten der Verdichterschaufeln ermittelt werden.
3. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Ermittlung der verdichterschaufelindividuellen, zustands- und lagebedingten Abweichungen nach dem Erreichen einer Minstdrehzahl des Laufrades erfolgt.
4. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die verdichterschaufelindividuellen, zustands- und lagebedingten Abweichungen als Abstand oder als Faktor, in Form einer Zeit, eines Weges oder eines Winkels gespeichert werden.

5. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die verdichterschaufelindividuellen, zustands- und lagebedingten Abweichungen während eines Adaptionsmodus in einem Verdichteradaptionsmodell (5) gespeichert werden und in einem Arbeitsmodus ausgelesen werden. 5
6. Vorrichtung zum Ermitteln des Betriebspunktes eines Verdichters, mit wenigstens einem Verdichterschaufelsensor (1), wenigstens einem Laufradsensor (2), einer Einrichtung zur Vorgabe der Systemzeit, wobei wenigstens ein Speicherfeld integriert ist, **dadurch gekennzeichnet, dass** das wenigstens eine Speicherfeld eine Anzahl an Speicherzellen (4a, 5a) gleich der Anzahl zu überwachender Verdichterschaukeln aufweist, wobei eine Einrichtung zur Synchronisierung des Speicherfelds mit der Laufraddrehung vorgesehen ist, so dass die gemessenen Durchgangszeitpunkte mit idealen Durchgangszeitpunkten vergleichbar und mit den verdichterschaufelindividuellen zustands- und lagebedingten Abweichungen korrigierbar sind. 10
7. Vorrichtung zum Ermitteln des Betriebspunktes eines Verdichters gemäß Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine Auswerteeinheit (10) vorgesehen ist, mit welcher der Betriebspunkt des Verdichters und dementsprechend der Abstand zu einer Pumpgrenze bestimmbar ist, wobei die Auswerteeinheit (10) wenigstens einen Eingang besitzt, über welchen korrigierte Durchgangszeitpunkte zugeführt werden. 15
8. Vorrichtung zum Ermitteln des Betriebspunktes eines Verdichters gemäß Anspruch 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein Schalter (8) vorgesehen ist, der bei der Erfüllung einer Bedingung (9) schaltbar ist, um zwischen einem Lern- und Arbeitsmodus und einem Adaptionsmodus umzuschalten. 20

Claims

1. Method for ascertaining the operating point of a compressor with at least one impeller, with compressor blades attached to the impeller, a housing and at least two sensors (1, 2), wherein a calculation of the deflection of the compressor blades is performed, on the basis of which the operating point and its distance from the pumping limit are ascertained by times at which the compressor blades pass by a sensor (1, 2) being measured and a signal that is representative of the rotational speed of the compressor impeller being ascertained, **characterized in that**, during a learning or adaptation mode, compressor-blade-specific, state- and position-induced deviations from an ideal state are ascertained by com- 45

pressor-blade-specific passing times being measured and compared with ideal passing times, and **in that**, during a working mode, compressor-blade-specific passing times are measured and corrected by the ascertained state- and position-induced deviations. 5

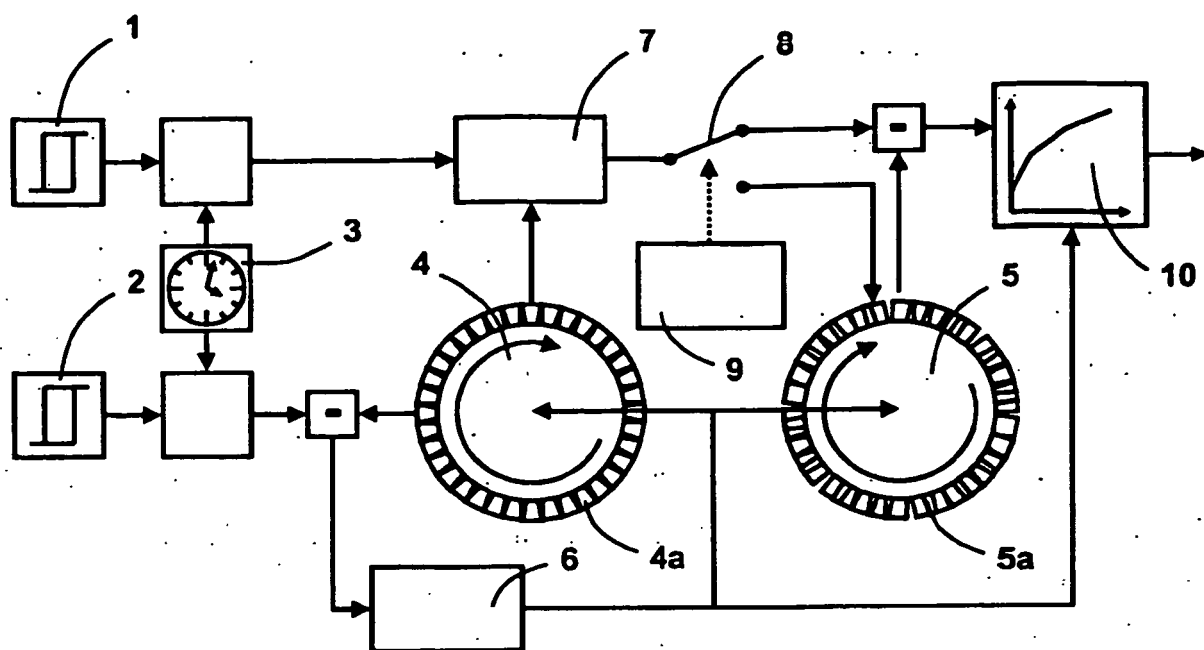
2. Method according to Claim 1, **characterized in that** the compressor-blade-specific, state- and position induced deviations of the compressor blades are ascertained during the starting up of the compressor after alignment of the compressor blades. 10
3. Method according to one of the preceding claims, **characterized in that** the ascertainment of the compressor-blade-specific, state- and position-induced deviations is performed after reaching a minimum rotational speed of the impeller. 15
4. Method according to one of the preceding claims, **characterized in that** the compressor-blade-specific, state- and position-induced deviations are stored as a distance or as a factor, in the form of a time, a displacement or an angle. 20
5. Method according to one of the preceding claims, **characterized in that** the compressor-blade-specific, state- and position-induced deviations are stored during an adaptation mode in a compressor adaptation model (5) and are read out in a working mode. 25
6. Apparatus for ascertaining the operating point of a compressor, with at least one compressor blade sensor (1), at least one impeller sensor (2), a device for presetting the system time, wherein at least one memory array is integrated, **characterized in that** the at least one memory array has a number of memory cells (4a, 5a) equal to the number of compressor blades to be monitored, wherein a device for synchronizing the memory array with the impeller rotation is provided, so that the measured passing times can be compared with ideal passing times and can be corrected with the compressor-blade-specific, state- and position-induced deviations. 30
7. Device for ascertaining the operating point of a compressor according to Claim 6, **characterized in that** an evaluation unit (10) is provided, with which the operating point of the compressor, and correspondingly the distance from a pumping limit, can be determined, wherein the evaluation unit (10) has at least one input, by way of which corrected passing times are supplied. 35
8. Device for ascertaining the operating point of a compressor according to Claim 6 or 7, **characterized in that** a switch (8) is provided, which can be switched to switch over between a learning mode and a work- 40

ing mode and an adaptation mode when a condition (9) is satisfied.

Revendications

1. Procédé de calcul du point de fonctionnement d'un compresseur avec au moins un rotor, avec des aubes de compresseur fixées au rotor, avec un carter et au moins deux capteurs (1, 2), un calcul de l'orientation des aubes de compresseur se produisant sur la base duquel le point de fonctionnement et son écartement par rapport à la limite de pompage sont calculés, en mesurant des instants de passage des aubes de compresseur au niveau d'un capteur (1, 2) et en calculant un signal représentatif de la vitesse de rotation du rotor de compresseur, **caractérisé en ce que** dans un mode d'apprentissage ou d'adaptation, des écarts, par rapport à un état idéal, propres à chaque aube de compresseur et provoqués par l'état et la position des aubes, sont calculés en mesurant des instants de passage propres à chaque aube de compresseur et que ces écarts sont comparés à des instants de passage idéaux et que dans un mode de travail, les instants de passage propres à chaque aube de compresseur sont mesurés et utilisés pour corriger les écarts calculés et provoqués par l'état et la position des aubes. 10
2. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** les écarts, propres à chaque aube de compresseur et provoqués par l'état et la position des aubes, des aubes de compresseur sont calculés lors de l'accélération du compresseur selon l'orientation des aubes de compresseur. 15
3. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le calcul des écarts propres à chaque aube de compresseur et provoqués par l'état et la position des aubes se produit une fois une certaine vitesse de rotation du rotor atteinte. 20
4. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** les écarts propres à chaque aube de compresseur et provoqués par l'état et la position des aubes sont mémorisés sous la forme d'un écartement ou d'un facteur prenant la forme d'une durée, d'une trajectoire ou d'un angle. 25
5. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** les écarts propres à chaque aube de compresseur et provoqués par l'état et la position des aubes sont mémorisés dans un mode d'adaptation, dans un modèle d'adaptation de roue de compresseur (5), et sélectionnés dans un mode de travail. 30

6. Dispositif de calcul du point de fonctionnement d'un compresseur, avec au moins un capteur d'aube de compresseur (1), avec au moins un capteur de rotor (2), avec un dispositif de définition de l'heure du système, au moins un champ de mémoire étant intégré, **caractérisé en ce qu'**au moins un champ de mémoire comporte un nombre de cellules de mémoire (4a, 5a) identique au nombre d'aubes de compresseur à surveiller, un dispositif de synchronisation du champ de mémoire étant prévu avec la rotation de rotor, de sorte que les instants de passage mesurés peuvent être comparés aux instants de passage idéaux et peuvent servir à corriger les écarts propres à chaque aube de compresseur et provoqués par l'état et la position des aubes. 35
7. Dispositif de calcul du point de fonctionnement d'un compresseur selon la revendication 6, **caractérisé en ce qu'**une unité d'analyse (10) est prévue à l'aide de laquelle le point de fonctionnement du compresseur et de façon correspondante l'écartement par rapport à une limite de pompage peut être défini, l'unité d'analyse (10) possédant au moins une entrée via laquelle les instants de passage corrigés sont amenés. 40
8. Dispositif de calcul du point de fonctionnement d'un compresseur selon la revendication 6 ou 7, **caractérisé en ce qu'**un commutateur (8) est prévu pouvant s'enclencher lorsqu'une condition (9) est remplie pour commuter entre un mode d'apprentissage et de travail et un mode d'adaptation. 45



FIGUR 1

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

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

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- US 4955269 A [0001] [0016]
- US 6474935 B1 [0013]
- DE 102008036305 A1 [0015]
- US 4518917 A [0017]
- EP 1980719 A2 [0018]
- US 4573358 A [0019]
- US 2009078051 A1 [0020]