



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(11) **CH 700 957 A2**

(51) Int. Cl.: **F01D 21/14** (2006.01)
F04D 27/00 (2006.01)

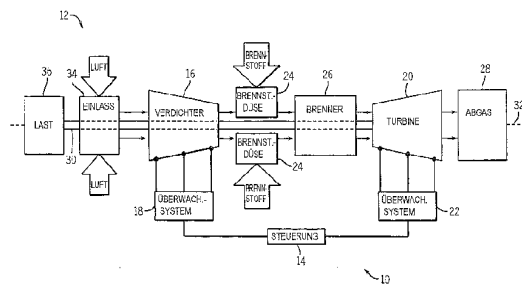
Patentanmeldung für die Schweiz und Liechtenstein
Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(12) **PATENTANMELDUNG**

<p>(21) Anmeldenummer: 00674/10</p> <p>(22) Anmeldedatum: 04.05.2010</p> <p>(43) Anmeldung veröffentlicht: 15.11.2010</p> <p>(30) Priorität: 07.05.2009 US 12/437,387</p>	<p>(71) Anmelder: General Electric Company, 1 River Road Schenectady, New York 12345 (US)</p> <p>(72) Erfinder: Raub Warfield Smith, Ballston Lake New York 12019 (US)</p> <p>(74) Vertreter: R. A. Egli & Co. Patentanwälte, Horneggstrasse 4 8008 Zürich (CH)</p>
---	---

(54) **Fehlererkennung und Schutz von mehrstufigen Verdichtern.**

(57) Beschrieben wird ein System zur Fehlererkennung und Schutz von Verdichtern, die unter anderen in Gasturbinen eingesetzt werden, um ein Gas, wie z.B. Luft, zu verdichten. In bestimmten Ausführungsformen enthält ein System eine Steuerung (14), die dafür konfiguriert ist, eine Zwischenstufen-Druckmessung zwischen Stufen eines mehrstufigen Verdichters (16) zu erhalten. Die Steuerung (14) ist auch dafür konfiguriert, einen tatsächlichen Schaden in dem mehrstufigen Verdichter (16) wenigstens teilweise auf der Zwischenstufen-Druckmessung basierend zu erkennen.



Beschreibung

Hintergrund der Erfindung

[0001] Der hierin beschriebene Erfindungsgegenstand betrifft Fehlererkennung und Schutz von Verdichtern.

[0002] Verdichter werden in einer Vielzahl von Industriebereichen und Systemen eingesetzt, um ein Gas, wie z.B. Luft, zu verdichten. Beispielsweise enthalten Gasturbinenriebwerke typischerweise einen Verdichter, um verdichtete Luft zur Verbrennung und Kühlung zu erzeugen. Verständlicherweise beeinflusst der Zustand des Verdichters Betriebsverhalten, Wirkungsgrad, Ausfallzeit und Gesamtverfügbarkeit der Maschine. Wenn Verdichterkomponenten (z.B. Schaufeln, Dichtungen usw.) verschleissen oder brechen, kann dann der Verdichter keine ausreichende Verdichtung des Gases (z.B. Luft) für das Zielsystem (z.B. ein Gasturbinenriebwerk) liefern. Ferner kann ein Bruch von Verdichterkomponenten Schaden an dem Zielsystem (z.B. dem Gasturbinenriebwerk) verursachen, und dadurch zu Ausfallzeit und erhöhten Reparaturkosten führen. Dieses ist insbesondere für Kraftwerkanlagen problematisch, welche auf einem Dauerbetrieb von Gasturbinenriebwerken angewiesen sind. Demzufolge ist es erwünscht, Fehler in einem frühen Stadium zu erkennen, um Komponenten des Verdichters und des stromabwärts befindlichen Gasturbinenriebwerks vor Schaden zu schützen. Leider sind derzeit bestehende Systeme nicht besonders gut für eine Früherkennung von Fehlern in Verdichtern geeignet. Dieses gilt insbesondere für mehrstufige Verdichter, wie z.B. diejenigen, die in Gasturbinenriebwerken in Kraftwerksanlagen eingesetzt werden. Beispielsweise überwachen bestehende Systeme nicht die Zwischenstufenbereiche dieser mehrstufigen Verdichter.

Kurzbeschreibung der Erfindung

[0003] Bestimmte im Schutzzumfang der ursprünglich beanspruchten Erfindung entsprechende Ausführungsformen sind nachstehend zusammengefasst. Diese Ausführungsformen sollen nicht den Schutzzumfang der beanspruchten Erfindung einschränken, sondern diese Ausführungsformen sollen nur eine kurze Zusammenfassung möglicher Formen der Erfindung bereitstellen. Tatsächlich kann die Erfindung eine Vielzahl von Formen annehmen, die ähnlich zu den nachstehend beschriebenen Ausführungsformen sind oder sich von diesen unterscheiden.

[0004] In einer ersten Ausführungsform enthält ein System einen Zwischenstufensensor, der dafür konfiguriert ist, einen Parameter an einer Zwischenstufenstelle zwischen mehreren Stufen von Rotationsschaufeln einer Rotationsmaschine zu messen. Das System enthält auch eine Steuerung, die dafür konfiguriert ist, einen Fehler in der Rotationsmaschine wenigstens teilweise auf dem gemessenen Zwischenstufenparameter basierend zu erkennen.

[0005] In einer zweiten Ausführungsform enthält ein System eine Steuerung, die dafür konfiguriert ist, eine Zwischenstufen-Druckmessung zwischen Stufen eines mehrstufigen Verdichters zu erhalten. Die Steuerung ist auch dafür konfiguriert, einen tatsächlichen Schaden in dem mehrstufigen Prozessor wenigstens teilweise auf der Zwischenstufen-Druckmessung basierend zu erkennen.

[0006] In einer dritten Ausführungsform enthält ein System ein Turbinenriebwerk. Das Turbinenriebwerk enthält einen Verdichter, einen Brenner und eine Expansionsturbine. Der Verdichter enthält mehrere Verdichterstufen. Das System enthält auch mehrere Zwischenstufensensoren, die dafür konfiguriert sind, mehrere Parameter an Zwischenstufenstellen in dem Turbinenriebwerk zu messen. Das System enthält ferner eine Steuerung, die dafür konfiguriert ist, einen Bruch in einer der Verdichterstufen wenigstens teilweise auf den mehreren Parametern basierend zu erkennen. Die Steuerung ist auch dafür konfiguriert, einen den Bruch anzeigenden Alarm auszugeben oder automatisch einen Betriebsparameter des Turbinenriebwerks in Reaktion auf den Bruch anzupassen, oder automatisch das Turbinenriebwerk in Reaktion auf den Bruch abzuschalten, oder eine Kombination davon auszuführen.

Kurzbeschreibung der Zeichnungen

[0007] Diese und weitere Merkmale, Aspekte und Vorteile der vorliegenden Erfindung werden besser verständlich, wenn die nachstehende detaillierte Beschreibung unter Bezugnahme auf die beigefügten Zeichnungen gelesen wird, in welchen gleiche Bezugszeichen gleiche Teile durchgängig durch die Zeichnungen bezeichnen, in welchen:

- Fig. 1 eine Blockdarstellung einer exemplarischen Ausführungsform eines Gasturbinenriebwerks mit einem System zum Erkennen von Fehlern in einem mehrstufigen Verdichter des Gasturbinenriebwerks ist;
- Fig. 2 eine Querschnittsseitenansicht des Gasturbinenriebwerks von Fig. 1 ist;
- Fig. 3 eine Querschnittsseitenansicht einer exemplarischen Ausführungsform des mehrstufigen Verdichters des Gasturbinenriebwerks der Fig. 1 und 2 ist und mehrere Zwischenstufensensoren zum Erkennen von Fehlern in dem mehrstufigen Verdichter besitzt;
- Fig. 4 ein Graph eines Druckprofils einer exemplarischen Ausführungsform des mehrstufigen Verdichters mit fünf einzelnen Stufen sowohl in gutem als auch schlechtem Zustand ist;

- Fig. 5 ein Graph der prozentualen Druckzunahme der ersten fünfzehn Stufen eines exemplarischen 20-stufigen Verdichters im Vergleich zu der Gesamtdruckzunahme des exemplarischen 20-stufigen Verdichters in seinem ursprünglich guten Zustand ist, und wenn er sich aufgrund eines Verdichterteileausfalls verschlechtert; und
- Fig. 6 eine exemplarische Ausführungsform eines Verfahrens zum Erkennen von Fehlern in dem mehrstufigen Verdichter unter Nutzung von Zwischendruck-Zunahmeverhältnissen ist.

Detaillierte Beschreibung der Erfindung

[0008] Eine oder mehrere spezifische Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung werden nachstehend beschrieben. In dem Bemühen, eine knappe Beschreibung dieser Ausführungsformen zu liefern, können nicht alle Merkmale einer tatsächlichen Implementation in der Beschreibung beschrieben werden. Es dürfte erkennbar sein, dass bei der Entwicklung von jeder derartigen tatsächlichen Implementation wie bei jedem technischen oder konstruktiven Projekt zahlreiche implementationsspezifische Entscheidungen getroffen werden müssen, um Übereinstimmung mit den spezifischen Zielen des Entwicklers, wie z.B. Übereinstimmung mit systembezogenen und geschäftsbezogenen Einschränkungen, zu erzielen, welche von einer Implementation zur anderen variieren können. Ferner dürfte erkennbar sein, dass eine derartige Entwicklungsanstrengung komplex und zeitaufwendig sein kann, aber trotzdem hinsichtlich Auslegung, Herstellung und Fertigung für den normalen Fachmann mit dem Vorteil dieser Offenlegung eine Routineaufgabe wäre.

[0009] Wenn Elemente verschiedener Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung eingeführt werden, sollen die Artikel «einer, eines, eine», «der, die, das» und «besagter, besagte, besagtes» die Bedeutung haben, dass eines oder mehrere von den Elementen vorhanden sein kann. Die Begriffe «aufweisend», «enthaltend» und «habend» sollen einschliessend sein und die Bedeutung haben, dass zusätzliche weitere Elemente ausser den aufgelisteten Elementen vorhanden sein können. Alle Beispiele von Betriebsparametern und/oder Umgebungsbedingungen schliessen weitere Parameter/Bedingungen der offengelegten Ausführungsformen nicht aus. Zusätzlich dürfte es sich verstehen, dass Bezugnahmen auf «eine Ausführungsform» der vorliegenden Erfindung nicht als Ausschluss für das Vorliegen zusätzlicher Ausführungsformen interpretiert werden sollten, die ebenfalls die angeführten Merkmale enthalten.

[0010] Die offengelegten Ausführungsformen beinhalten Systeme und Verfahren zur Nutzung von Zwischenstufen-Sensormessungen (z.B. von Druck, Temperatur, Akustik, Optik usw.) von mehreren Stufen in einer mehrstufigen Rotationsmaschine (z.B. Verdichtern, Turbinen usw.), um Fehler in der mehrstufigen Rotationsmaschine zu erkennen. Zur Vereinfachung wird die hierin offengelegte mehrstufige Rotationsmaschine hauptsächlich als ein mehrstufiger Verdichter bezeichnet. Jedoch können, wie zu erkennen ist, die hierin offengelegten Systeme und Verfahren auch zum Erkennen von Fehlern in anderen Arten von Rotationsmaschinen verwendet werden, welche mehrere Stufen enthalten.

[0011] Während des normalen Betriebs erhöht jede Stufe des mehrstufigen Verdichters im Wesentlichen den Druck und die Temperatur des Arbeitsfluids um einen bestimmten Betrag. Der Betrag der Druck- und Temperaturzunahme bei jeder Stufe des mehrstufigen Verdichters kann von speziellen Betriebsbedingungen, wie z.B. Drehzahl, Einlassbegrenzungsbedingungen (z.B. Zustrom, Druck, Temperatur, Zusammensetzung usw.), Auslassbegrenzungsbedingungen (z.B. Strömungswiderstand usw.) und vom Stufenwirkungsgrad, abhängen. Die Gesamtzunahme von Druck und Temperatur über dem mehrstufigen Verdichter ist im Allgemeinen eine Aufsummierung der Zunahmen von Druck und Temperatur der einzelnen Stufen. Daher wird, wenn eine oder mehrere Stufen nicht richtig arbeiten, der Zustand (z.B. Druck, Temperatur usw.) des Arbeitsfluids, das den mehrstufigen Verdichter verlässt, beeinflusst.

[0012] Im Idealfall wären die Auslassmessungen am mehrstufigen Verdichter genau genug, um jede Abweichung von einem erwarteten oder aus der Vergangenheit bekannten Betriebsverhalten zu erkennen. Jedoch kann, da Hunderte oder Tausende von Schaufelblättern in dem mehrstufigen Verdichter vorhanden sind, ein Ausfall von einem oder einigen wenigen der einzelnen Schaufelblätter das Gesamtbetriebsverhalten des mehrstufigen Verdichters nicht ausreichend deutlich verändern, dass es über einen Messstörpegel überschreitet. Ferner kann das Betriebsverhalten des mehrstufigen Verdichters erheblich mit Betriebsbedingungen (z.B. Leitschaufelposition, Einlasstemperatur und Druck, stromab bestehendem Widerstand usw.) variieren und sich im Verlauf der Zeit (z.B. aufgrund von Verschmutzung, Schaufelerosion, Änderungen im Spiel usw.) verschlechtern, was eine Fehlererkennung noch weiter komplizierter macht.

[0013] Die offengelegten Ausführungsformen befassen sich mit diesen Schwierigkeiten, indem sie eine andere Vorgehensweise für die Fehlererkennung in mehrstufigen Verdichtern nutzen. Wenn eine Komponente in einem mehrstufigen Verdichter beschädigt wird oder ausfällt, ändert sich auch die Druck- und Temperaturverteilung bei jeder einzelnen Stufe in dem mehrstufigen Verdichter. Obwohl die Änderung im Gesamtbetriebsverhalten des mehrstufigen Verdichters nicht leicht erkennbar sein kann, kann das relative Betriebsverhalten jeder Stufe oder Gruppe von Stufen leichter ersichtlich sein und somit eine bessere Anzeige für einen Komponentenfehler oder Ausfall liefern. Die offengelegten Ausführungsformen nutzen Sensormessungen (z.B. Druck, Temperatur, Akustik, Optik usw.) an mehreren Stellen in dem mehrstufigen Verdichter (z.B. wenigstens an einer Zwischenstufe zusätzlich zu dem Einlass und Auslass des mehrstufigen Verdichters). Abweichungen von diesen Zwischenstufen-Sensormessungen von erwarteten Werten können anzeigen, dass ein Fehler in einer der Stufen aufgetreten ist. Zur Vereinfachung werden die hierin offengelegten Zwischenstufen-Sensormessungen primär als Drucksensormessungen bezeichnet. Jedoch können erkennbar die hierin offengelegten Systeme und Verfahren auch Temperatursensormessungen, Akustiksensormessungen, Optiksensormessungen oder jede andere Art

von Sensormessungen beinhalten, welche Fehler in mehrstufigen Rotationsmaschinen, wie z.B. mehrstufigen Verdichtern, anzeigen können.

[0014] Die Druckzunahme zwischen aufeinanderfolgenden Messstellen kann mit der Gesamtdruckzunahme des Drucks über dem mehrstufigen Verdichter verglichen werden, was zu gemessenen Druckzunahmeverhältnissen führt. Diese gemessenen Druckzunahmeverhältnisse können als eine Funktion irgendeines relevanten Satzes von Betriebsbedingungen verfolgt werden, von denen normalerweise erwartet wird, dass sie das Betriebsverhalten des mehrstufigen Verdichters beeinträchtigen (wie z.B. Wellendrehzahl, Leitschaufelposition, Einlassbedingungen, Auslassbedingungen usw.). Die gemessenen Druckzunahmeverhältnisse können auch mit erwarteten, durch Modellierung ermittelten Druckzunahmeverhältnissen, Messungen anderer mehrstufiger Verdichter oder mit in der Vergangenheit durchgeführten Messungen desselben mehrstufigen Verdichters verglichen werden. Wenn irgendeines von den gemessenen Druckzunahmeverhältnissen von den erwarteten Druckzunahmeverhältnissen um mehr als einen vorbestimmten Betrag abweicht, kann eine entsprechende Steuerreaktion ausgelöst werden, wie z.B. die Auslösung eines Alarms oder das Abschalten des mehrstufigen Verdichters, usw.

[0015] Alternativ können, wie vorstehend beschrieben, in bestimmten Ausführungsformen Temperaturmessungen und Temperaturzunahmeverhältnisse anstelle oder in Verbindung mit Druckmessungen und Druckzunahmeverhältnissen verwendet werden. Die Wahl zwischen der Nutzung von Druck- oder Temperaturmessungen kann von einer Messunsicherheit und der sich daraus ergebenden Fehlererkennungsempfindlichkeit abhängen. Mit anderen Worten, wenn die Nutzung von Druckzunahmeverhältnissen für einen mehrstufigen Verdichter zu einer zuverlässigeren Fehlererkennung führt, können die Druckzunahmeverhältnisse gegenüber Temperaturzunahmeverhältnissen und umgekehrt bevorzugt werden. Zusätzlich kann in bestimmten Ausführungsformen der Vergleich sowohl von Druck- als auch Temperaturzunahmen für jeden Abschnitt des mehrstufigen Verdichters mit anderen derartigen Abschnitten anstelle von oder zusätzlich zum Vergleich mit Gesamtdruck- und/oder Temperaturzunahmen über dem mehrstufigen Verdichter sein.

[0016] Fig. 1 ist eine Blockdarstellung einer exemplarischen Ausführungsform eines Fehlererkennungs- und Schutzsystems 10, das dafür konfiguriert ist, Fehler zu einem frühen Zeitpunkt wenigstens teilweise auf der Basis von Zwischenstufenmessungen über ein gesamtes Gasturbintriebwerk 12 hinweg zu erkennen. In bestimmten Ausführungsformen enthält das Fehlererkennungs- und Schutzsystem 10 eine Steuerung 14, die dafür konfiguriert ist, auf erkannte Fehler zu einem frühen Zeitpunkt zu reagieren, um die Möglichkeit eines umfangreichen Schadens und einer Ausfallzeit des Gasturbintriebwerks 12 zu verringern. Das Fehlererkennungs- und Schutzsystem 10 kann dazu genutzt werden, Fehler an mehreren Stellen (z.B. am Einlass, Auslass und zwischen den Stufen) über einem gesamten mehrstufigen Verdichter 16 mittels eines Überwachungssystems 18 zu messen. Das Fehlererkennungs- und Schutzsystem 10 kann auch dazu genutzt werden, Fehler an mehreren Stellen (z.B. am Einlass, Auslass und zwischen den Stufen) über einer mehrstufigen Turbine 20 mittels eines Überwachungssystems 22 zu messen. In bestimmten Ausführungsformen können die Überwachungssysteme 18 und 22 miteinander zu einem einzigen Überwachungssystem kombiniert sein. Wie es nachstehend im Detail diskutiert wird, ermöglichen die Zwischenstufenmessungen (z.B. von Druck, Temperatur, Akustik, Optik, Zustromrate, Schwingung usw.) der Steuerung 14 rascher Fehler in dem Verdichter 16 und der Turbine 20 zu erkennen und dadurch die Möglichkeit, umfangreicheren Schaden und Ausfallzeit zu verringern. Dieses ist insbesondere vorteilhaft, wenn die Anzahl von Stufen in dem Verdichter 16 und der Turbine 20 zunimmt. Beispielsweise können der Verdichter 16 und die Turbine 20 jeweils mehrere Stufen (z.B. 5, 10, 15, 20, 25, 30 oder mehr Stufen) enthalten. Die Überwachungssysteme 18 und 22 können einen oder mehrere an jeder Stufe angeordnete Sensoren enthalten. Obwohl die nachstehende Diskussion primär den Verdichter 16 in Kontext mit dem Gasturbintriebwerk 12 betrifft, können die offengelegten Ausführungsformen bei jedem mehrstufigen System mit Rotationsschaufeln, wie z.B. bei einer Gasturbine, einer Dampfturbine, einer Wasserturbine, einen durch eine andere Quelle angetriebenen Verdichter, usw. verwendet werden.

[0017] In bestimmten Ausführungsformen kann das Gasturbintriebwerk 12 verdichtete Luft mit einem flüssigen oder gasförmigen Brennstoff, wie z.B. Erdgas und/oder einem wasserstoffreichen synthetischen Gas vermischen. Gemäss Darstellung nehmen mehrere Brennstoffdüsen 24 einen Brennstoffzustrom auf, mischen den Brennstoff mit Luft und verteilen das Luft/Brennstoff-Gemisch in einem Brenner 26. Das Luft/Brennstoff-Gemisch verbrennt in einer Kammer in dem Brenner 26, um dadurch heisse, unter Druck stehende Abgase zu erzeugen. Der Brenner 26 führt die Abgase durch eine Turbine 20 zu einem Abgasauslass 28. Während die Abgase die Turbine 20 passieren, zwingen die Abgase eine oder mehrere Turbinenschaufeln eine Welle 30 entlang einer Achse 32 des Gasturbintriebwerks 12 zu drehen. Wie dargestellt ist die Welle 30 mit verschiedenen den mehrstufigen Verdichter 16 beinhaltenden Komponenten des Gasturbintriebwerks 12 verbunden. Wie nachstehend detaillierter beschrieben, kann der mehrstufige Verdichter 16 mehrere Stufen mit mehreren Schaufeln enthalten, die mit der Welle 30 verbunden sind. Somit drehen sich die mehreren Schaufeln in dem mehrstufigen Prozessor 16, sobald sich die Welle 30 dreht, und verdichten dadurch Luft aus einer Luftansaugung 34 durch den mehrstufigen Verdichter 16 hindurch und in die Brennstoffdüsen 24 und/oder den Brenner 26. Die Welle 30 kann auch mit einer Last 36 verbunden sein, welche ein Fahrzeug oder eine stationäre Last, wie z.B. ein elektrischer Generator in einer Kraftwerksanlage, oder ein Propeller in einem Flugzeug, sein kann. Die Last 36 kann auch jede geeignete Vorrichtung enthalten, die für einen Antrieb durch die Rotationsenergieabgabe des Gasturbintriebwerks 12 konfiguriert ist.

[0018] Fig. 2 ist eine Querschnittsseitenansicht des Gasturbintriebwerks 12 von Fig. 1. Wie dargestellt, enthält das Gasturbintriebwerk 12 eine oder mehrere in einem oder mehreren Brennern 26 angeordnete Brennstoffdüsen 24. Im Betrieb tritt Luft in das Gasturbintriebwerk 12 durch den Lufteinlass 36 ein und kann in dem mehrstufigen Verdichter 16

verdichtet werden. Die verdichtete Luft kann dann mit Brennstoff zur Verbrennung in dem Brenner 26 vermischt werden. Beispielsweise können die Brennstoffdüsen 24 ein Brennstoff/Luft-Gemisch in dem Brenner 26 in einem geeigneten Verhältnis für optimale Verbrennung, Emissionen, Brennstoffverbrauch und Leistungsabgabe einspritzen. Die Verbrennung erzeugt heisse unter Druck stehende Abgase, welche dann eine oder mehrere Schaufelreihen 38 in der Turbine 20 antreiben, um die Welle 30 und somit den mehrstufigen Verdichter 16 und die Last 36 zu drehen. Die Rotation der Welle 30 bewirkt auch, dass eine oder mehrere Schaufeln 40 in dem mehrstufigen Verdichter 16 durch den Einlass 34 aufgenommene Luft ansaugen und verdichten.

[0019] In bestimmten Ausführungsformen ist das Fehlererkennungs- und Schutzsystem 10 von Fig. 1 dafür konfiguriert, eine oder mehrere Parameter an Einlassen, Auslässen und Zwischenstufenstellen über dem gesamten Turbinentriebwerk 12 einschliesslich den Zwischenstufenstellen über dem gesamten Verdichter 16 und Zwischenstufenpositionen über der gesamten Turbine 20 zu messen. Beispielsweise kann das Fehlererkennungs- und Schutzsystem 10 einen oder mehrere Verdichtersensoren 42 enthalten, die an einem Verdichtereinlass 44, an mehreren Verdichter-Zwischenstufenstellen 46 und an einem Verdichterauslass 48 angeordnet sind, statt nur Verdichtersensoren 42 an dem Einlass 44 und/oder Auslass 48 zu enthalten. Somit sind, wie es nachstehend detaillierter diskutiert wird, die Verdichtersensoren 42 dafür konfiguriert, die zeitliche und räumliche Erkennung von Fehlern erheblich zu verbessern, d.h., in einer wesentlich rascheren Reaktionszeit und einer wesentlich genaueren Erkennung der Fehlerstelle. In einem weiteren Beispiel kann das Fehlererkennungs- und Schutzsystem 10 einen oder mehrere Turbinensensoren 50 enthalten, die an einem Turbineneinlass 52, an mehreren Zwischenturbinenstellen 54 und an einem Turbinenauslass 56 angeordnet sind, statt nur Turbinensensoren 50 an dem Einlass 52 und/oder Auslass 56 zu enthalten. Somit sind, wie es nachstehend detaillierter diskutiert wird, die Turbinensensoren 50 dafür konfiguriert, die zeitliche und räumliche Erkennung von Fehlern erheblich zu verbessern, d.h., in einer wesentlich rascheren Reaktionszeit und einer wesentlich genaueren Erkennung der Fehlerstelle. Erkennbar können die Sensoren 42 und 50 Drucksensoren, Temperatursensoren, Schwingungssensoren, akustische Sensoren, optische Sensoren oder irgendeine Kombination davon enthalten. Diese Sensoren 42 und 50 können an mehreren Stellen um den Umfang des Gehäuses, an mehreren axialen Stellen sowohl auf stromaufwärts als stromabwärts liegenden Seiten jeder Stufe usw. angeordnet sein. Die Zwischenstufensensoren 42 und 50 sind dafür konfiguriert, die Reaktionszeit erheblich zu verbessern und die Möglichkeit eines umfangreichen Schadens im Falle eines Fehlers im Vergleich zu einem System ohne Zwischenstufensensoren 42 und 45 zu verringern.

[0020] Beispielsweise wäre im Vergleich mit dem offengelegten Fehlererkennungs- und Schutzsystem 10 eine Fehlerüberwachung besonders langsam und räumlich nicht anspruchsvoll, wenn die Sensoren nur an dem Verdichtereinlass 44 und dem Turbinenauslass 56 angeordnet wären. Obwohl diese Stellen leicht für Sensoren zugänglich sein können, würde ein grosser Raumbereich ohne die Sensoren 42 und 50 zwischen diesen Einlass- und Auslassstellen 44 und 56 nicht überwacht werden. Mit anderen Worten, wenn Sensoren nur an dem Einlass 44 und dem Auslass 56 platziert würden, würden die Änderungen über das gesamte Turbinentriebwerk 12 gemittelt und es dadurch schwierig gemacht werden, einen Fehler entweder in dem Verdichter 16 oder der Turbine 20 zu erkennen. Ein signifikanter Fehler in einer speziellen Stufe des Verdichters 16 oder der Turbine 20 bewirkt eine Verschiebung der Temperatur und/oder des Drucks in dieser speziellen Stufe, doch die Auswirkung dieser Verschiebung kann durch Sensoren nur an dem Einlass 44 und dem Auslass 56 nicht erkennbar sein. Ebenso kann, wenn der Verdichter 16 nur durch Sensoren an dem Verdichtereinlass 44 und dem Verdichterauslass überwacht wird, dann der Fehler nicht leicht aufgrund einer kleineren Abweichung von messbaren Austrittsbedingungen im Vergleich zu einer mehr lokal messbaren Auswirkung erkannt werden. Ferner kann, wenn die Turbine 20 nur durch Sensoren an dem Turbineneinlass und dem Turbinenauslass 56 überwacht wird, dann der Fehler nicht leicht aufgrund der Ausmittlung über die mehreren Stufen und/oder eine kompensatorische Regelungsaktion, um beispielsweise eine gewählte Ausgangsleistung einzuhalten, erkannt werden.

[0021] Ein übliches Mittel zur Fehlererkennung in einer rotierenden Turbomaschine ist die Schwingungsüberwachung an den Lagern 58, 60. Dieses Mittel beruht auf dem Umstand, dass eine beschädigte oder ausgefallene rotierende Schaufel eine Rotorunwucht bewirkt. Wenn die ausgefallene Komponente eine stationäre Schaufel ist, liegt im Allgemeinen keine erkennbare Unwucht vor, sofern nicht das abgelöste Teil stromabwärts liegende rotierende Schaufeln ausreichend beschädigt, um eine erkennbare Unwucht zu bewirken. Ebenso kann, wenn die Maschine gross genug und die ausgefallene rotierende Schaufel klein genug ist, das Problem auch durch dieses Mittel nicht erkennbar sein. Demzufolge muss ein kleines Problem im Allgemeinen grösser werden, um über eine Lagerschwingung erkennbar zu werden (z.B. aufgrund eines Kollateralschadens an den stromabwärts liegenden Teilen), bevor die Steuerung oder der Betreiber bemerkt, dass eine Schutzaktion erforderlich ist. Zusätzlich kann, falls ein Fehler durch dieses Mittel erkannt wird, die aus der Schwingungssignatur verfügbare Diagnoseinformation nur einen groben Hinweis bezüglich der Stelle des Fehlers und seines Progressionsverlaufs liefern. Im Allgemeinen erkennen die vorgenannten Messungen an eingeschränkten Stellen (d.h., nicht zwischen Stufen) nicht in angemessener Weise Fehler in einem frühen Stadium, und verringern dadurch die Möglichkeit, Korrekturmassnahmen zu ergreifen, bevor ein signifikanter Schaden entsteht.

[0022] Wiederum steigern die offengelegten Ausführungsformen des Fehlererkennungs- und Schutzsystems 10 die zeitliche und räumliche Empfindlichkeit der Fehlererkennung durch die Nutzung von Sensoren an einer oder mehreren Zwischenstufenstellen des Verdichters 16, der Turbine 20 oder einer Kombination davon. In der nachstehenden Diskussion wird das Fehlererkennungs- und Schutzsystem 10 in Zusammenhang mit dem Verdichter 16 diskutiert, wobei jedoch erkennbar sein dürfte, dass das Fehlererkennungs- und Schutzsystem 10 in gleicher Weise auf die Turbine 20 und weitere

mehrstufige Systeme anwendbar ist. An verschiedenen Zwischenstufenstellen 46 und 54 können die Sensoren 42 und 50 Druck, Temperatur, Schwingung, Akustik oder eine Kombination davon überwachen. Diese gemessenen Parameter können mit denen anderer Stufen (d.h., stromaufwärts und/oder stromabwärts), der Einlässe 54 und 52, der Auslässe 48 und 56 oder einer Kombination dieser verglichen werden. Beispielsweise können die offengelegten Ausführungsformen Bezugsverhältnisse mit Echtzeitverhältnissen vergleichen, um einen Fehler anzeigende Anomalitäten zu erkennen. Die Verhältnisse können einen Zwischenstufenparameter in Bezug auf einen Einlassparameter, einen Zwischenstufenparameter in Bezug auf einen Auslassparameter, einen ersten Zwischenstufenparameter in Bezug auf einen zweiten Zwischenstufenparameter oder eine Kombination davon beinhalten. Wiederum können die Parameter Temperatur, Druck, Schwingung, Akustik oder eine Kombination davon beinhalten.

[0023] Fig. 3 ist eine Querschnittsseitenansicht einer exemplarischen Ausführungsform des mehrstufigen Verdichters 16 des Gasturbinenriebwerks 12 der Fig. 1 und 2. Gemäss Darstellung kann der mehrstufige Verdichter 16 mehrere entlang dem Verlauf des mehrstufigen Verdichters 16 angeordnete Sensoren enthalten. Insbesondere enthält die dargestellte Ausführungsform des mehrstufigen Verdichters 16 einen Einlasssensor 62 unmittelbar an dem Einlass 44 des mehrstufigen Verdichters 16 und einen Auslasssensor 64 unmittelbar an dem Auslass 48 des mehrstufigen Verdichters 16. Zusätzlich enthält der mehrstufige Verdichter 16 wenigstens einen Zwischenstufensensor 66, der sich zwischen Stufen des mehrstufigen Verdichters 16 befindet. Die Zwischenstufensensoren 66 können sich an mehreren Stellen um den Umfang des Gehäuses herum, an mehreren axialen Stellen sowohl auf stromaufwärts als auch stromabwärts liegenden Seiten jeder Stufe, usw. befinden. Die genaue Anzahl der Zwischenstufensensoren 66 kann zwischen Implementationen variieren. Beispielsweise kann in bestimmten Ausführungsformen der Mehrstufenverdichter 16 einen oder mehrere Zwischenstufensensoren 66 zwischen jeder Stufe des mehrstufigen Verdichters 16 enthalten. Jedoch können in anderen Ausführungsformen einige Stufen keine Zwischenstufensensoren 66 enthalten. Die Anzahl der Zwischenstufensensoren 66 kann von für den mehrstufigen Verdichter 16 spezifischen Bedingungen abhängen. Beispielsweise können bestimmte Stufen keine geeigneten Stellen für die Platzierung von Sensoren enthalten. Zusätzlich können an einem bestimmten Punkt Kostenzwänge die Anzahl der verwendeten Zwischenstufensensoren 66 begrenzen.

[0024] Wie vorstehend beschrieben, können in bestimmten Ausführungsformen der Einlasssensor 62, der Auslasssensor 64 und die mehreren Zwischenstufensensoren 66 Drucksensoren, Temperatursensoren, Schwingungssensoren, akustische Sensoren, optische Sensoren, Durchflusssensoren usw. beinhalten. Bei Vorliegen eines Fehlers oder anderen Art von Schaden in einer speziellen Stufe kann sowohl die Druck- als auch Temperaturzunahme über der den Schaden erleidenden Stufe erheblich beeinflusst sein. Tatsächlich können, wenn der Fehler schwer genug ist, die Druck- und Temperaturzunahme über der den Fehler erleidenden Stufe auf null oder wenigstens einen vernachlässigbaren Betrag verringert sein. Beispielsweise können sich der Druckabfall und die Temperaturzunahme um wenigstens mehr als 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 oder sogar 100 % eines erwarteten Wertes verändern. Somit ermöglicht die Überwachung von Zwischenstufendrücken und -temperaturen eine leichtere Erkennung von Fehlern in dem mehrstufigen Verdichter 16. Mit anderen Worten, während die Änderung in dem Gesamtverhalten des mehrstufigen Verdichters 16 nicht leicht aufgrund eines Fehlers in einer oder nur wenigen Stufen erkennbar sein kann, ist das relative Betriebsverhalten jeder Stufe oder Gruppe von Stufen deutlicher und liefert eine stärkere Anzeige eines Komponentenschadens oder Fehlers.

[0025] Druck- und Temperaturmessungen sind nicht die einzige Art von Zwischenstufenmessungen, welche zum Erkennen von Fehlern in dem mehrstufigen Verdichter 16 genutzt werden können. Beispielsweise können in bestimmten Ausführungsformen akustische Sensoren für die Zwischenstufensensoren 66 verwendet werden. Fehler können auch durch die Nutzung von Schallsignaturen innerhalb jeder von den mehreren Stufen des mehrstufigen Verdichters 16 erkannt werden. Zusätzlich können in weiteren Ausführungsformen optische Sensoren für die Zwischenstufensensoren 66 verwendet werden. Von den optischen Sensoren erkannte Lichtschwankungen können Veränderungen in dem Durchfluss des Arbeitsfluids durch den mehrstufigen Verdichter 16 anzeigen, welche Hinweise für Fehler in dem mehrstufigen Verdichter 16 sind. Ferner kann jede Art von Sensoren (z.B. Schwingungssensoren, Durchflusssensoren usw.), welche Fehler in dem mehrstufigen Verdichter 16 anzeigen können, genutzt werden.

[0026] Fig. 4 ist ein Graph eines Druckprofils einer exemplarischen Ausführungsform des mehrstufigen Verdichters 16 mit fünf einzelnen Stufen. Der dargestellte Graph stellt ein erstes Druckprofil 68 während des normalen Betriebs und ein zweites Druckprofil 70 während eines Fehlers in der dritten Stufe des mehrstufigen Verdichters 16 dar. Gemäss Darstellung kann unter normalen Bedingungen das erste Druckprofil 68 so sein, dass die Druckzunahme über jeder einzelnen Stufe relativ konstant ist. Es sollte jedoch angemerkt werden, dass dieses gesunde Druckzunahmeprofil maschinenspezifisch ist.

[0027] Beispielsweise können unter normalen Arbeitsbedingungen bestimmte einzelne Stufen grössere Druckzunahmen als andere beitragen. Unabhängig davon kann die Gesamtdruckzunahme über dem mehrstufigen Verdichter 16 gleich der Aufsummierung der Druckzunahmen über den fünf dargestellten Stufen sein.

[0028] Gemäss Darstellung kann in dem Szenario, in welchem ein Fehler in der dritten Stufe des mehrstufigen Verdichters 16 aufgetreten ist, die Druckzunahme über der dritten Stufe des mehrstufigen Verdichters 16 erheblich verringert sein. Bis zu einem gewissen Grad können die anderen vier Stufen den Druckverlust über der dritten Stufe kompensieren. Beispielsweise ist die Druckzunahme über den ersten und zweiten Stufen als von dem ersten Druckprofil 68 (z.B. Normalbetrieb) zu dem zweiten Druckprofil 70 (Fehler in der dritten Stufe) hin zunehmend dargestellt. Zusätzlich ist die Druckzunahme über den vierten und fünften Stufen ebenfalls als von dem ersten Druckprofil 68 (z.B. Normalbetrieb) zu dem zweiten Druckprofil 70 (Fehler in der dritten Stufe) hin zunehmend dargestellt.

[0029] In bestimmten Ausführungsformen kann die Druckzunahme über jeder Stufe des mehrstufigen Verdichters 16 mit der Gesamtdruckzunahme über dem mehrstufigen Verdichter 16 verglichen werden. Es werde beispielsweise angenommen, dass unter Normalbedingungen des in Fig. 4 dargestellten mehrstufigen Verdichters (das erste Druckprofil 68) jede einzelne Stufe des mehrstufigen Verdichters 16 genau denselben Beitrag an Druckzunahme liefert. Unter diesen Normalbedingungen trägt jede einzelne Stufe 20% der Gesamtdruckzunahme des mehrstufigen Verdichters 16 bei. Jedoch werde, wie in Fig. 4 dargestellt, angenommen, dass während des Szenarios, in dem die dritte Stufe einen Komponentenfehler oder einen Schaden erleidet (zweites Druckprofil 70), die Druckzunahme über der dritten Stufe auf null reduziert wurde, während die anderen vier Stufen die Verringerung in der Druckzunahme über der dritten Stufe vollständig kompensieren. Unter diesem Fehlerszenario trägt die dritte Stufe 0% der Gesamtdruckzunahme des mehrstufigen Verdichters 16 bei, während die anderen vier Stufen jeweils 25% der Gesamtdruckzunahme des mehrstufigen Verdichters 16 beitragen. Eine Überwachung dieser Änderungen in der Druckzunahme über jeder einzelnen Stufe des mehrstufigen Verdichters 16 ermöglicht eine schnellere Erkennung des Komponentenfehlers oder Schadens und genauere Lokalisierung des Fehlers, in diesem Beispiel, in der dritten Stufe des mehrstufigen Verdichters 16. Beispielsweise kann sich der Komponentenschaden oder der Fehler in einer speziellen Stufe oder wenigstens in einer kleinen Anzahl von Stufen befinden. Man beachte, dass auch in diesem Beispiel, wie es in einer realen Maschine typisch ist, der Verdichterausgangsdruck im Wesentlichen durch den Fehler unbeeinflusst war und somit selbst oder in Kombination mit dem Einlassdruck keine Fehleranzeige liefern würde.

[0030] Zusätzlich zum Vergleichen der Druckzunahme über jeder Stufe des mehrstufigen Verdichters 16 mit der Gesamtdruckzunahme über dem mehrstufigen Verdichter 16 kann die Druckzunahme über jeder Stufe des mehrstufigen Verdichters 16 mit der Druckzunahme über sich selbst während normaler Betriebsbedingungen verglichen werden oder kann mit der Druckzunahme anderer Stufen des mehrstufigen Verdichters 16 verglichen werden. Diese Vorgehensweise kann eine gemessene Änderung vergrößern, was einen Komponentenfehler oder Schaden leichter erkennbar macht. Beispielsweise kann gemäss Darstellung in Fig. 4 die dritte Stufe des mehrstufigen Verdichters 16 20 % der Gesamtdruckzunahme des mehrstufigen Verdichters 16 unter Normalbedingungen (erstes Druckprofil 68) beitragen. Jedoch kann während eines Komponentenausfalls oder Schadens in der dritten Stufe (zweites Druckprofil 70) die dritte Stufe 0 % der Gesamtdruckzunahme des mehrstufigen Verdichters 16 beitragen. Daher kann sich der Beitrag der dritten Stufe während eines Komponentenausfalls oder Schadens der dritten Stufe in dem dargestellten Beispiel um 100 % verringern. Umgekehrt können, wie in Fig. 4 dargestellt, die anderen vier Stufen des mehrstufigen Verdichters 16 ebenfalls 20 % der Gesamtdruckzunahme des mehrstufigen Verdichters 16 während normaler Bedingungen (erstes Druckprofil 68) beitragen. Jedoch können während eines Komponentenausfalls oder Schadens in der dritten Stufe (zweites Druckprofil 70) die anderen vier Stufen 25 % der Gesamtdruckzunahme des mehrstufigen Verdichters 16 beitragen. Daher kann der Beitrag der anderen vier Stufen während eines Komponentenausfalls oder Schadens der dritten Stufe um 25 % (z.B. 25 % - 20 %) dividiert durch 20 %) in dem dargestellten Beispiel zunehmen.

[0031] Zusätzlich zum Messen und Überwachen von Druckzunahmen über einzelnen Stufen des mehrstufigen Verdichters 16 können auch Druckzunahmen über anderen Abschnitten des mehrstufigen Verdichters 16 gemessen und überwacht werden. Ein Abschnitt kann mehrere einzelne Stufen des mehrstufigen Verdichters 16 beinhalten. Beispielsweise kann in dem in Fig. 4 dargestellten Beispiel ein erster Abschnitt des mehrstufigen Verdichters 16 die erste, zweite und dritte Stufe des mehrstufigen Verdichters 16 beinhalten, während ein zweiter Abschnitt des mehrstufigen Verdichters 16 die vierten und fünften Stufen des mehrstufigen Verdichters 16 beinhalten kann. Tatsächlich kann jede Kombination von Stufen als Abschnitte für die Erkennung von Fehlern in dem mehrstufigen Verdichter 16 genutzt werden.

[0032] Wie vorstehend beschrieben, repräsentiert das in Fig. 4 dargestellte erste Druckprofil 68 normale Betriebsbedingungen des mehrstufigen Verdichters 16. Das erste Druckprofil 68 kann unter Anwendung einer geeigneten Darstellung des Betriebsverhaltens des mehrstufigen Verdichters 16 über seine mehrere Stufen ermittelt werden. Beispielsweise kann in bestimmten Ausführungsformen das erwartete Druckprofil für den mehrstufigen Verdichter 16 auf der Basis eines Betriebsverhaltens in der Vergangenheit des mehrstufigen Verdichters 16 ermittelt werden. In weiteren Ausführungsformen kann das erwartete Druckprofil für den mehrstufigen Verdichter 16 unter Anwendung prädiktiver Modelle ermittelt werden. In noch weiteren Ausführungsformen kann das erwartete Druckprofil für den mehrstufigen Verdichter 16 Kombinationen des Betriebsverhaltens in der Vergangenheit, prädiktiver Modelle und beliebiger weiterer empirischer oder berechneter Verfahren in Bezug entweder auf verwendeten speziellen mehrstufigen Verdichter 16 oder einen anderen vergleichbaren mehrstufigen Verdichter 16 enthalten. Ferner kann das erwartete Druckprofil für den mehrstufigen Verdichter 16 eine Funktion irgendeiner relevanten Betriebsbedingung des mehrstufigen Verdichters 16 sein, welche erwartungsgemäss normalerweise das Betriebsverhalten beeinflusst. Beispielsweise kann in bestimmten Ausführungsformen das erwartete Druckprofil eine Funktion von Wellendrehzahl, Leitschaukelposition, Einlassbedingungen, Auslassbedingungen usw. sein. Unabhängig davon kann das erwartete Druckprofil als eine Bezugslinie bezeichnet werden, mit der (z.B. durch die Zwischenstufensensoren 66 gemessene) Zwischenstufenparameter verglichen werden können.

[0033] Sobald ermittelt worden ist, dass das Druckzunahmeverhältnis für eine spezielle Stufe oder Abschnitt von Stufen von dem erwarteten Druckzunahmeverhältnis für die Stufe oder Abschnitt von Stufen um mehr als einen vorbestimmten Betrag abgewichen ist (zugenommen oder abgenommen hat), kann eine geeignete Steuerreaktion initiiert werden. Beispielsweise kann unter bestimmten Umständen eine geeignete Steuerreaktion darin bestehen, einen Betreiber des mehrstufigen Verdichters 16 zu alarmieren, dass ein Druckzunahmeverhältnis von dem erwarteten Druckzunahmeverhältnis um einen vorbestimmten Betrag abgewichen ist. Beispielsweise kann der Betreiber alarmiert werden, wenn die Abweichung

von dem erwarteten Druckzunahmeverhältnis nur ein kleiner Betrag ist, oder nur für eine kurze Zeitdauer aufgetreten ist. Der Alarm kann ein Warnton (z.B. ein Piepton), Schwingung, Licht (z.B. eine Licht emittierende Diode), eine Anzeigennachricht (z.B. auf einem Anzeigebildschirm), eine E-Mail-Nachricht, Textnachricht usw. sein. Jedoch können, sobald die Abweichung von dem erwarteten Druckzunahmeverhältnis entweder einen grösseren Wert erreicht oder für eine längere Zeitperiode auftritt, Betriebsparameter des mehrstufigen Verdichters 16 automatisch angepasst werden. Beispielsweise kann unter bestimmten Umständen der mehrstufige Verdichter 16 als Reaktion auf die Abweichung von dem erwarteten Druckzunahmeverhältnis abgeschaltet werden.

[0034] Sobald die Anzahl von Stufen in dem mehrstufigen Verdichter 16 zunimmt, kann die Empfindlichkeit der Fehlererkennung unter Anwendung von Vergleichen von Druckzunahmeverhältnissen etwas abnehmen. Beispielsweise kann, obwohl in Fig. 4 der mehrstufige Verdichter 16 nur mit fünf Stufen dargestellt ist, dieser viel mehr Stufen enthalten. Beispielsweise kann in bestimmten Ausführungsformen der mehrstufige Verdichter 1610, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, oder noch mehr Stufen enthalten. In dem in Fig. 4 dargestellten Beispiel trägt jede einzelne Stufe angenähert 20 % der Gesamtdruckzunahme des mehrstufigen Verdichters 16 während des Normalbetriebs (z.B. erstes Druckprofil 68) bei. Jedoch kann beispielsweise in einem mehrstufigen Verdichter 16 mit 30 Stufen der Druckzunahmebeitrag jeder einzelnen Stufe nur in der Grössenordnung von 3 % der gesamten Druckzunahme des mehrstufigen Verdichters 16 während des Normalbetriebs (z.B. erstes Druckprofil 68) liegen. Zusätzlich nimmt das in Fig. 4 dargestellte Beispiel an, dass ein Komponentenausfall oder Schaden in der dritten Stufe (z.B. zweites Druckprofil 70) die Druckzunahme über der dritten Stufe auf null oder wenigstens einem vernachlässigbaren Betrag verringert ist. Jedoch kann in Wirklichkeit, selbst wenn eine Komponente in einer Stufe des mehrstufigen Verdichters 16 ausfällt oder beschädigt ist, die betroffene Stufe tatsächlich noch in der Lage sein, einen bestimmten Betrag der Druckzunahme zu erzeugen. Aus diesen beiden Gründen hängt in einem mehrstufigen Verdichter 16 mit einer grösseren Anzahl von Stufen die Fähigkeit, Fehler in dem mehrstufigen Verdichter 16 unter Anwendung von Vergleichen von Druckzunahmeverhältnissen von dem Ausmass und der Empfindlichkeit der Überwachung ab.

[0035] Beispielsweise ist Fig. 5 ein Graph der prozentualen Druckzunahme der ersten fünfzehn Stufen eines exemplarischen 20-stufigen Verdichters 16 im Vergleich zu der Gesamtdruckzunahme des exemplarischen 20-stufigen Verdichters 16. Der 20-stufige Verdichter 16 ist lediglich als eine exemplarische Ausführungsform des mehrstufigen Verdichters 16 gedacht, um den Grad der zum Erkennen von Fehlern in dem mehrstufigen Verdichter 16 genutzten Empfindlichkeit zu veranschaulichen. Gemäss Darstellung kann das Druckzunahmeverhältnis 72 (z.B. die Druckzunahme über den ersten fünfzehn Stufen im Vergleich zu der Gesamtdruckzunahme des exemplarischen 20-stufigen Verdichters 16) vier unterschiedliche Betriebsphasen während eines Ausfalls von einer der Stufen des exemplarischen 20-stufigen Verdichters 16 annehmen. Beispielsweise kann zum Zeitpunkt t_1 der exemplarische 20-stufige Verdichter 16 einen eingeschwungenen Betriebszustand erreicht haben (z.B. bevor irgendwelche Fehler aufgetreten sind und ohne offensichtliche Probleme). Gemäss Darstellung kann das Druckzunahmeverhältnis 72 einen in etwa eingeschwungenen Betriebszustandswert von angenähert 74 % erreicht haben. Jedoch kann zum Zeitpunkt t_2 eine anfängliche Abweichung des Druckzunahmeverhältnisses 72 erkannt werden. Gemäss Darstellung kann das Druckzunahmeverhältnis 72 einen neuen eingeschwungenen Betriebszustandswert erreichen und die Zunahme kann nur in der Grössenordnung von 1 % (z.B. von angenähert 74 % auf angenähert 75 %) sein. Jedoch kann eine derartig von dem vorhergehenden eingeschwungenen Betriebszustandswert ausgehende steile Zunahme anzeigen, dass ein Fehler in dem exemplarischen 20-stufigen Verdichter 16 aufgetreten ist. Insbesondere kann der Umstand, dass der Beitrag der Druckzunahme für die Stufen 1 bis 15 angestiegen ist, anzeigen, dass ein Fehler stromabwärts von den Stufen 1 bis 15 (z.B. in den Stufen 16 bis 20) aufgetreten ist. Anschliessend kann zu einem Zeitpunkt t_3 eine fortschreitende Verschlechterung des Druckzunahmeverhältnisses 72 (z.B. eine allmähliche Zunahme von angenähert 75 % auf angenähert 76 %) erfolgen. Dann kann zu einem Zeitpunkt t_4 das Endstadium der Verschlechterung zu plötzlichen Zunahmen (z.B. von angenähert 76 % auf angenähert 83 %) und zu einem steilen Fortschritt auf nahezu 100 % zum Zeitpunkt t_5 führen. Es ist diese letzte Verschlechterungsperiode, in welcher der erheblichste Schaden an dem exemplarischen 20-stufigen Verdichter 16 auftreten kann.

[0036] Daher ist, wie in Fig. 5 dargestellt, die Fähigkeit, die ersten wenigen Verschlechterungsphasen (z.B. zwischen dem Zeitpunkt t_2 und dem Zeitpunkt t_4) zu erkennen, wichtig, um Fehler im Wesentlichen in Echtzeit oder in rascher Reaktion, sobald sie auftreten, zu erkennen, bevor der Schaden sehr gross wird (z.B. nach dem Zeitpunkt t_4). In bestimmten Ausführungsformen kann die Erkennung von Fehlern im Wesentlichen in Echtzeit die Erkennung von Fehlern innerhalb einer Zeitperiode von weniger als 10, 20, 30, 40, 50, oder 60 Sekunden beinhalten. In bestimmten Ausführungsformen kann die Erkennung von Fehlern in rascher Reaktion die Erkennung von Fehlern innerhalb einer Zeitperiode von weniger als 5, 10, 15, oder 20 Minuten beinhalten. Der Zeitraum, in welchem Fehler erkannt werden können, kann von Betriebsbedingungen des spezifischen mehrstufigen Verdichters 16 und von dem Komponentenfehlermodus abhängen. Beispielsweise kann, wie es in Fig. 5 dargestellt ist, wenn der mehrstufige Verdichter 16 eine grössere Anzahl von Stufen enthält, der Betrag der erkennbaren Zunahme in dem Druckzunahmeverhältnis 72 relativ klein sein. Daher kann die Zeit für die Erkennung von Fehlern länger sein, als dann, wenn der mehrstufige Verdichter 16 weniger Stufen enthalten hätte oder stärker überwacht worden wäre.

[0037] Fig. 6 ist eine exemplarische Ausführungsform eines Verfahrens 74 zum Erkennen von Fehlern in dem mehrstufigen Verdichter 16 unter Nutzung von Zwischenstufen-Druckzunahmeverhältnissen. Bei dem Schritt 76 kann wenigstens ein Zwischenstufenparameter zwischen Stufen des mehrstufigen Verdichters 16 gemessen werden. Wie vorstehend diskutiert,

kann der gemessene Zwischenstufenparameter jeder Parameter sein, der für die Erkennung von Fehlern in dem mehrstufigen Verdichter 16 geeignet ist. Beispielsweise kann in bestimmten Ausführungsformen der gemessene Zwischenstufenparameter ein Zwischenstufendruck sein oder insbesondere eine Zwischendruckzunahme, welche mittels Zwischenstufen-Drucksensoren gemessen wird. In weiteren Ausführungsformen kann der gemessene Zwischenstufenparameter eine Zwischenstufentemperatur oder insbesondere eine Zwischenstufentemperaturzunahme sein, welche mittels Zwischenstufen-Temperatursensoren gemessen wird. Zusätzlich können weitere Arten von Sensoren genutzt werden. Beispielsweise können Zwischenstufen-Akustiksensoren genutzt werden, um akustische Parameter zu messen, welche Fehler in dem mehrstufigen Verdichter 16 anzeigen können. Zusätzlich können Zwischenstufen-Optiksensoren genutzt werden, um optische Parameter zu messen, welche Fehler in dem mehrstufigen Verdichter 16 anzeigen können. Ferner kann jede Art von Zwischenstufen-Sensoren (z.B. Schwingungssensoren, Durchflusssensoren usw.), welche Fehler in dem mehrstufigen Verdichter 16 anzeigen können, genutzt werden.

[0038] Bei dem Schritt 78 kann ein Fehler in dem mehrstufigen Verdichter 16 wenigstens teilweise auf dem gemessenen Zwischenstufenparameter basierend erkannt werden. Der erkannte Fehler kann verschiedene unterschiedliche Arten von Problemen in dem mehrstufigen Verdichter 16 beinhalten. Beispielsweise kann der Fehler einen tatsächlichen Fehler (z.B. einen Bruch oder einen anderen physikalischen und/oder strukturellen Fehler) von einer der Komponenten in dem mehrstufigen Verdichter 16 beinhalten. Der Fehler kann jedoch auch andere Arten eines Schadens beinhalten (z.B. Schaufelunwucht und Erosion, unzulässige Reibung aufgrund von Änderungen im Spiel usw.). Wie vorstehend diskutiert, kann die Fehlererkennung einen Vergleich des gemessenen Zwischenstufenparameters gegenüber (z.B. von einem prädiktiven Modell erzeugten) Vorhersagewerten, in der Vergangenheit erfassten Werten (z.B. früheren Betriebsdaten desselben mehrstufigen Verdichters 16 oder eines anderen vergleichbaren mehrstufigen Verdichters 16) oder einer Kombination dieser beinhalten.

[0039] Bei dem Schritt 80 kann, sobald ein Fehler erkannt wurde, optional ein den Fehler anzeigender Alarm ausgegeben werden. Beispielsweise kann der Alarm einen Warnton (z.B. ein Piepton), Schwingung, Licht (z.B. eine Licht emittierende Diode), eine Anzeigenachricht (z.B. auf einem Anzeigebildschirm), eine E-Mail-Nachricht, Textnachricht usw. beinhalten. Zusätzlich können im Schritt 82, sobald der Fehler erkannt worden ist, Betriebsparameter des mehrstufigen Verdichters 16 optional in Reaktion auf den Fehler automatisch angepasst werden. In bestimmten Situationen kann die Anpassung der Betriebsparameter des mehrstufigen Verdichters 16 automatisch in Reaktion auf den Fehler durchgeführt werden. Jedoch kann in anderen Situationen die Anpassung der Betriebsparameter des mehrstufigen Verdichters 16 durch den Betreiber des mehrstufigen Verdichters 16 von Hand durchgeführt werden.

[0040] Die Anpassung der Betriebsparameter des mehrstufigen Verdichters 16 kann auch zwischen minimaler Anpassung (z.B. Verringerung der Betriebsdrehzahl oder der Last des mehrstufigen Verdichters 16) bis zu einer drastischeren Anpassung (wie z.B. Abschalten des mehrstufigen Verdichters 16) variieren. Der Umfang der durchgeführten Anpassung kann beispielsweise von dem Grad der Abweichung des Zwischenstufenparameters von einem erwarteten Wert abhängen. Beispielsweise kann, wenn die Abweichung des gemessenen Zwischenstufenparameters von dem erwarteten Wert grösser als ein erster niedrigerer Schwellenwert, aber kleiner als ein zweiter höherer Schwellenwert ist, die Betriebsdrehzahl oder Last des mehrstufigen Verdichters 16 verringert werden. Jedoch kann dann, wenn die Abweichung des gemessenen Zwischenstufenparameters von dem erwarteten Wert grösser als sowohl der erste niedrigere Schwellenwert als auch der zweite höhere Schwellenwert ist, der mehrstufige Verdichter 16 vollständig abgeschaltet werden.

[0041] Zusätzlich kann in bestimmten Ausführungsformen eine Zeitverzögerung zwischen der Erkennung des Fehlers und entweder der Ausgabe von Alarmen oder der Anpassung von Betriebsparametern des mehrstufigen Verdichters 16 vorliegen. Beispielsweise kann in bestimmten Ausführungsformen eine Zeitverzögerung von 5, 10, 15, oder 20 Minuten angewendet werden, um zu bestätigen, dass die Abweichungen in dem gemessenen Zwischenstufenparameter, welcher den Fehler identifiziert, nicht nur lediglich statistische Abweichungen waren. In anderen Ausführungsformen kann keine Zeitverzögerung angewendet werden. Keine Zeitverzögerung kann sich als nützlich erweisen, um eine angemessene Reaktion im Wesentlichen in Echtzeit zu ermöglichen. Zusätzlich zu Zeitverzögerungen können in bestimmten Ausführungsformen mehrere Alarme ausgegeben werden, bevor Betriebsparameter des mehrstufigen Verdichters 16 angepasst werden. Die Ausgabe mehrerer Alarme kann die Durchführung einer weiteren Analyse ermöglichen, bevor Betriebsparameter des mehrstufigen Verdichters 16 entweder automatisch oder manuell angepasst werden.

[0042] Technische Auswirkungen der offengelegten Ausführungsformen beinhalten die Bereitstellung von Systemen und Verfahren zum Erkennen von Fehlern in dem mehrstufigen Verdichter 16 unter Nutzung von Druckzunahmeverhältnissen, welche aus zwischen Stufen des mehrstufigen Verdichters 16 gemessenen Zwischenstufenparametern ermittelt werden können. In bestimmten Ausführungsformen kann das in Fig. 6 dargestellte Verfahren 74 durch die Steuerung 14 durchgeführt werden, die dafür konfiguriert ist, die gemessenen Zwischenstufenparameter zu erhalten (z.B. aufzunehmen), um Fehler in dem mehrstufigen Verdichter 16 wenigstens teilweise auf gemessenen Zwischenstufenparametern basierend zu erkennen, um die Fehler anzeigende Alarme auszugeben, und um Betriebsparameter des mehrstufigen Verdichters 16 in Reaktion auf die Fehler anzupassen. Die Steuerung 14 kann in bestimmten Ausführungsformen eine physikalische Berechnungsvorrichtung sein, die insbesondere dafür konfiguriert ist, die gemessenen Zwischenstufenparameter zu erhalten (z.B. aufzunehmen), um Fehler in dem mehrstufigen Verdichter 16 wenigstens teilweise auf gemessenen Zwischenstufenparametern basierend zu erkennen, um die Fehler anzeigende Alarme auszugeben, und um Betriebsparameter des mehrstufigen Verdichters 16 in Reaktion auf die Fehler anzupassen. Insbesondere kann die Steuerung 14 Eingabe/Aus-

gabe- (I/O) -Vorrichtungen für die Aufnahme der gemessenen Zwischenstufenparameter, zur Ausgabe der Alarme und für die Übertragung von Signalen enthalten, um die Betriebsparameter des mehrstufigen Verdichters 16 anzupassen. Zusätzlich kann die Steuerung 14 eine Speichervorrichtung und ein maschinenlesbares Medium mit darauf codierten Instruktionen enthalten, um Fehler wenigstens teilweise auf gemessenen Zwischenstufenparametern basierend zu erkennen. Beispielsweise können die Instruktionen einen maschinenlesbaren Code für den Vergleich der gemessenen Zwischenstufenparameter gegenüber vorhergesagten Werten, in der Vergangenheit gemessenen Werten oder einer Kombination dieser enthalten. Somit kann die Steuerung 14 auch ein Speichermedium zum Speichern in der Vergangenheit gemessener Daten usw. enthalten.

[0043] Die hierin offengelegten Ausführungsformen stellen eine Instrumentierung für die einzelnen Stufen des mehrstufigen Verdichters 16 und eine zugeordnete Steuerstrategie zum Erkennen eines anormalen Verhalten in dem mehrstufigen Verdichter 16 bei oder in der Nähe des Beginns eines Problems derart bereit, dass die Steuerung 14 einen Alarm ausgeben und/oder Betriebsparameter des mehrstufigen Verdichters 16 vor einem sehr grossen Schaden an dem mehrstufigen Verdichter 16 anpassen kann. Die offengelegten Ausführungsformen nutzen den Umstand, dass, wenn eine Stufe des mehrstufigen Verdichters 16 einen Schaden erleidet, sich das Betriebsverhalten der Stufe verschlechtert. Die Verschlechterung des Betriebsverhaltens kann als eine Verschiebung in dem Verdichtungs-Sollwert von der beschädigten Stufe zu den nächsten unbeschädigten Stufen festgestellt werden. Diese Verschiebung kann in der Druckverteilung innerhalb des mehrstufigen Verdichters 16 festgestellt werden. Die Nutzung von Druckzunahmeverhältnissen für die Fehlererkennung kann eine verfeinerte Verschlechterungsbewertung für den mehrstufigen Verdichter 16 ermöglichen, und dadurch die Kosten und Ausfallzeit in Verbindung mit einem ungewollten Schaden an dem mehrstufigen Verdichter 16 verringern. Die hierin offengelegten Systeme und Verfahren können auf neue Gasturbinenriebwerke 12 angewendet werden oder können als Verbesserungen an der Instrumentierung und den Steuersystemen von existierenden Gasturbinenriebwerken 12 nachrüstbar sein.

[0044] Diese Beschreibung nutzt Beispiele, um die Erfindung einschliesslich der besten Ausführungsart zu offenzulegen, und um auch jedem Fachmann auf diesem Gebiet zu ermöglichen, die Erfindung auszuführen und zu nutzen. Der patentierbare Schutzzumfang der Erfindung ist durch die Ansprüche definiert und kann weitere Beispiele umfassen, die für den Fachmann auf diesem Gebiet ersichtlich sind. Derartige weitere Beispiele sollen in dem Schutzzumfang der Ansprüche enthalten sein, sofern sie strukturelle Elemente besitzen, die sich nicht von dem Wortlaut der Ansprüche unterscheiden, oder wenn sie äquivalente strukturelle Elemente mit unwesentlichen Änderungen gegenüber dem Wortlaut der Ansprüche enthalten.

[0045] In bestimmten Ausführungsformen enthält ein System eine Steuerung 14, die dafür konfiguriert ist, eine Zwischenstufen-Druckmessung zwischen Stufen eines mehrstufigen Verdichters 16 zu erhalten. Die Steuerung 14 ist auch dafür konfiguriert, einen tatsächlichen Schaden in dem mehrstufigen Verdichter 16 wenigstens teilweise auf der Zwischenstufen-Druckmessung basierend zu erkennen.

Bezugszeichenliste

[0046]

- 10 Fehlererkennungs- und Schutzsystem
- 12 Gasturbinenriebwerk
- 14 Steuerung
- 16 mehrstufiger Verdichter
- 18 Überwachungssystem
- 20 mehrstufige Turbine
- 22 Überwachungssystem
- 24 Brennstoffdüsen
- 26 Brenner
- 28 Abgasauslass
- 30 Welle
- 32 Achse
- 34 Lufteinlass
- 36 Last

39	Schaufelreihen
40	Schaufeln
42	Verdichtersensoren
44	Verdichtereinlass
46	Verdichter-Zwischenstufenstellen
48	Verdichterauslass
50	Turbinensensoren
52	Turbineneinlass
54	Turbinen-Zwischenstufenstellen
56	Turbinenauslass
58	Lager
60	Lager
62	Einlasssensor
64	Auslasssensor
66	Zwischenstufensensor
68	erstes Druckprofil
70	zweites Druckprofil
72	Druckzunahmeverhältnis
74	Verfahren
76	Verfahrensschritt
78	Verfahrensschritt
80	Verfahrensschritt
82	Verfahrensschritt

Patentansprüche

1. System, aufweisend:
einen Zwischenstufensensor (66), der dafür konfiguriert ist, einen Parameter an einer Zwischenstufenstelle (46, 54) zwischen mehreren Stufen von Rotorschaukeln (38, 40) einer Rotationsmaschine (16, 20) zu messen; und
eine Steuerung (14), die dafür konfiguriert ist, einen Fehler in der Rotationsmaschine (16, 20) wenigstens teilweise auf dem gemessenen Zwischenstufenparameter basierend zu erkennen.
2. System nach Anspruch 1, wobei der Zwischenstufensensor (66) einen Drucksensor aufweist, und die Steuerung (14) dafür konfiguriert ist, eine wenigstens einer Stufe der Rotationsmaschine (16, 20) zugeordnete anormale Druckänderung zu erkennen.
3. System nach Anspruch 1, wobei die Steuerung (14) dafür konfiguriert ist, den Parameter mit einem vorhergesagten Wert oder einem in der Vergangenheit gemessenen Wert oder einer Kombination dieser zu vergleichen.
4. System nach Anspruch 1, wobei die Steuerung (14) dafür konfiguriert ist, ein Bezugsverhältnis mit einem Echtzeitverhältnis des Parameters an der Zwischenstufenstelle (46, 54) mit dem einer anderen Messstelle zu vergleichen.
5. System nach Anspruch 4, wobei der Parameter Druck, Temperatur, Schwingung, Akustik oder eine Kombination dieser aufweist, und die andere Messstelle eine Einlassstelle (44, 52), eine Auslassstelle (48, 56) oder eine andere Zwischenstufen-Messstelle aufweist.
6. System nach Anspruch 1, das die Rotationsmaschine (16, 20) aufweist, wobei die Rotationsmaschine (16, 20) einen Verdichter (16), eine Turbine (20) oder eine Kombination dieser mit den mehreren Rotorschaukeln (38, 40) aufweist.

CH 700 957 A2

7. System nach Anspruch 1, wobei die Steuerung (14) dafür konfiguriert ist, einen den Fehler anzeigenden Alarm auszugeben.
8. System nach Anspruch 1, wobei die Steuerung (14) dafür konfiguriert ist, einen Betriebsparameter der Rotationsmaschine (16, 20) in Reaktion auf den Fehler anzupassen.
9. System nach Anspruch 8, wobei die Steuerung (14) dafür konfiguriert ist, die Rotationsmaschine (16, 20) in Reaktion auf den Fehler automatisch abzuschalten.
10. System nach Anspruch 1, das ein Turbinentriebwerk (12) mit mehreren Zwischenstufensensoren (66) aufweist, die an Zwischenstufenstellen (46) zwischen den mehreren Stufen von Rotorschaukeln (40) eines Verdichters (16) angeordnet sind.

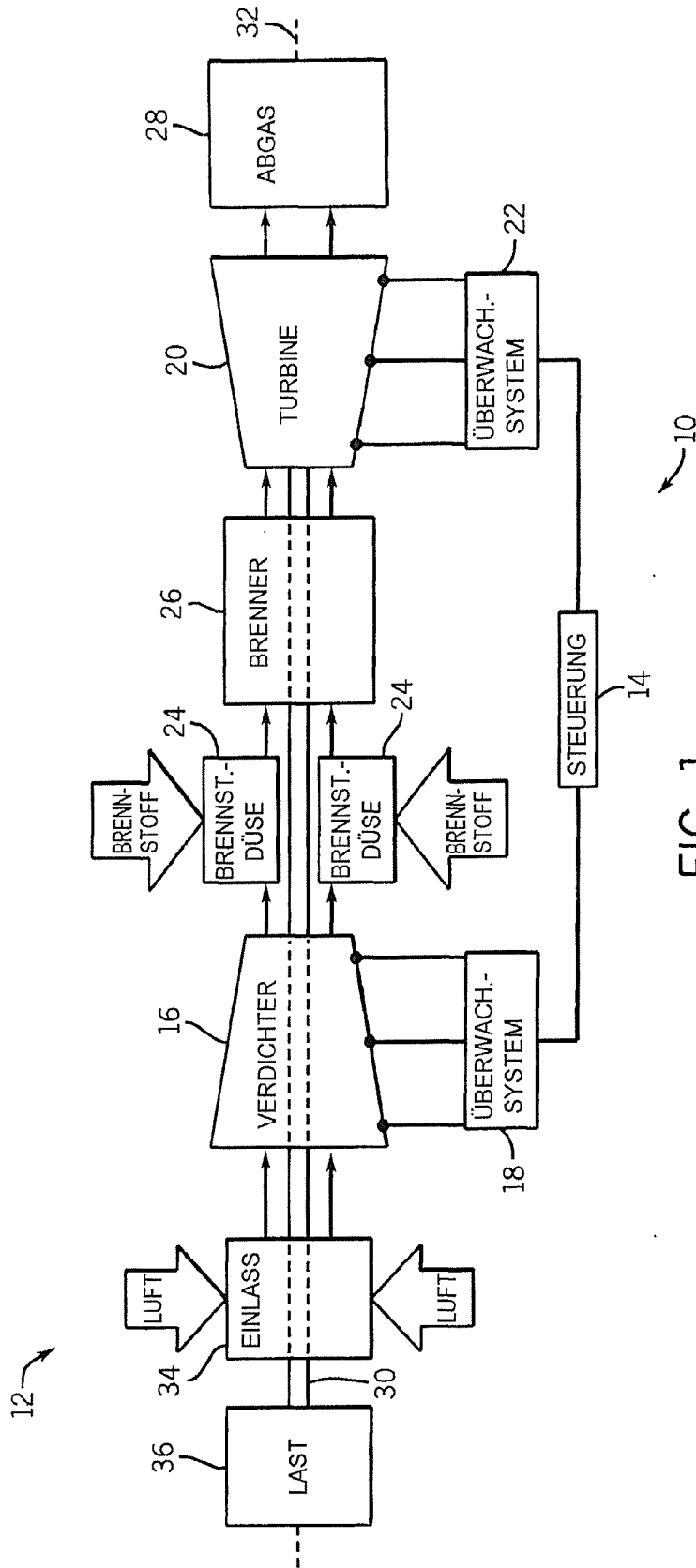


FIG. 1

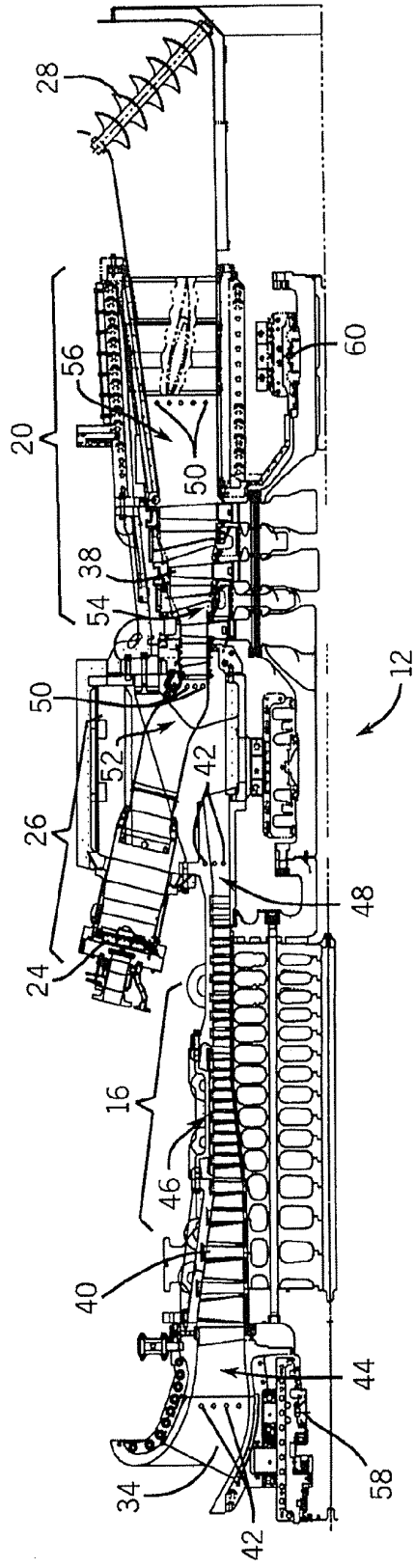


FIG. 2

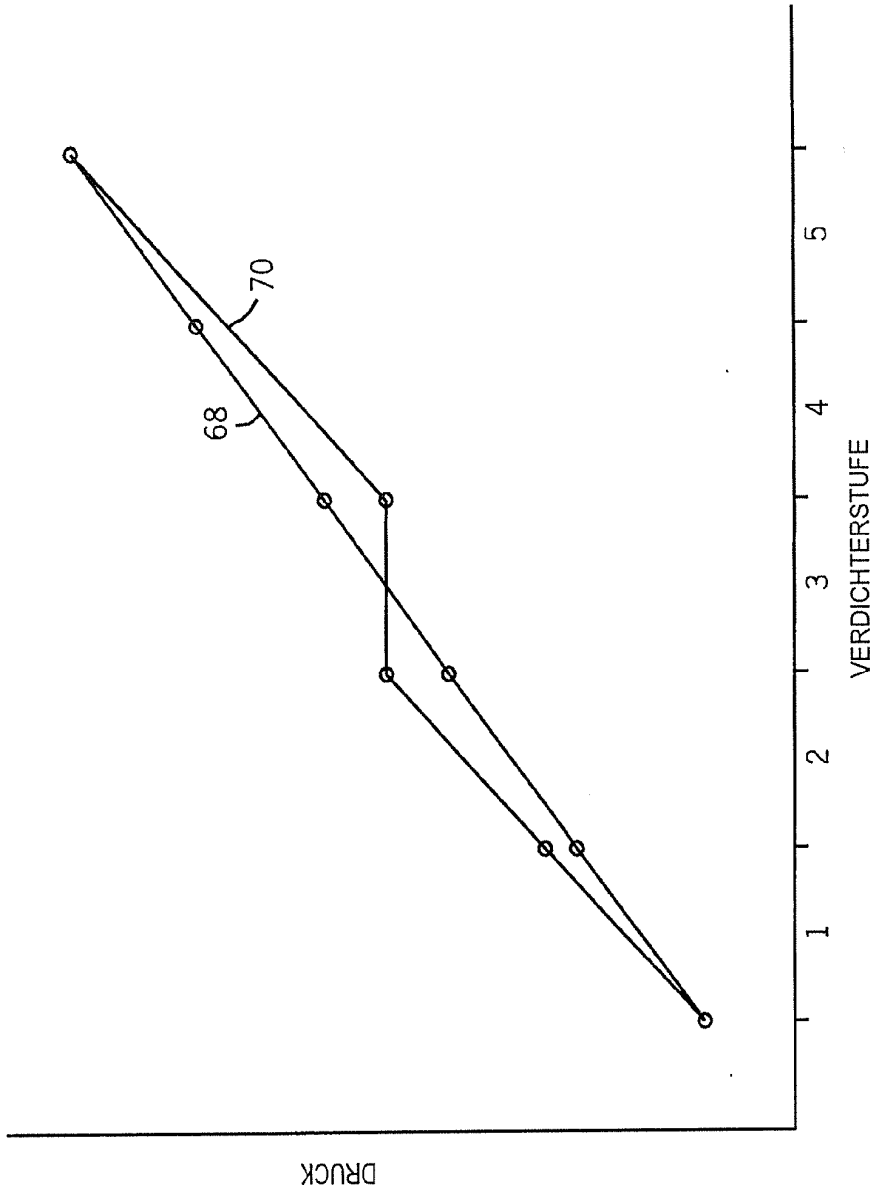


FIG. 4

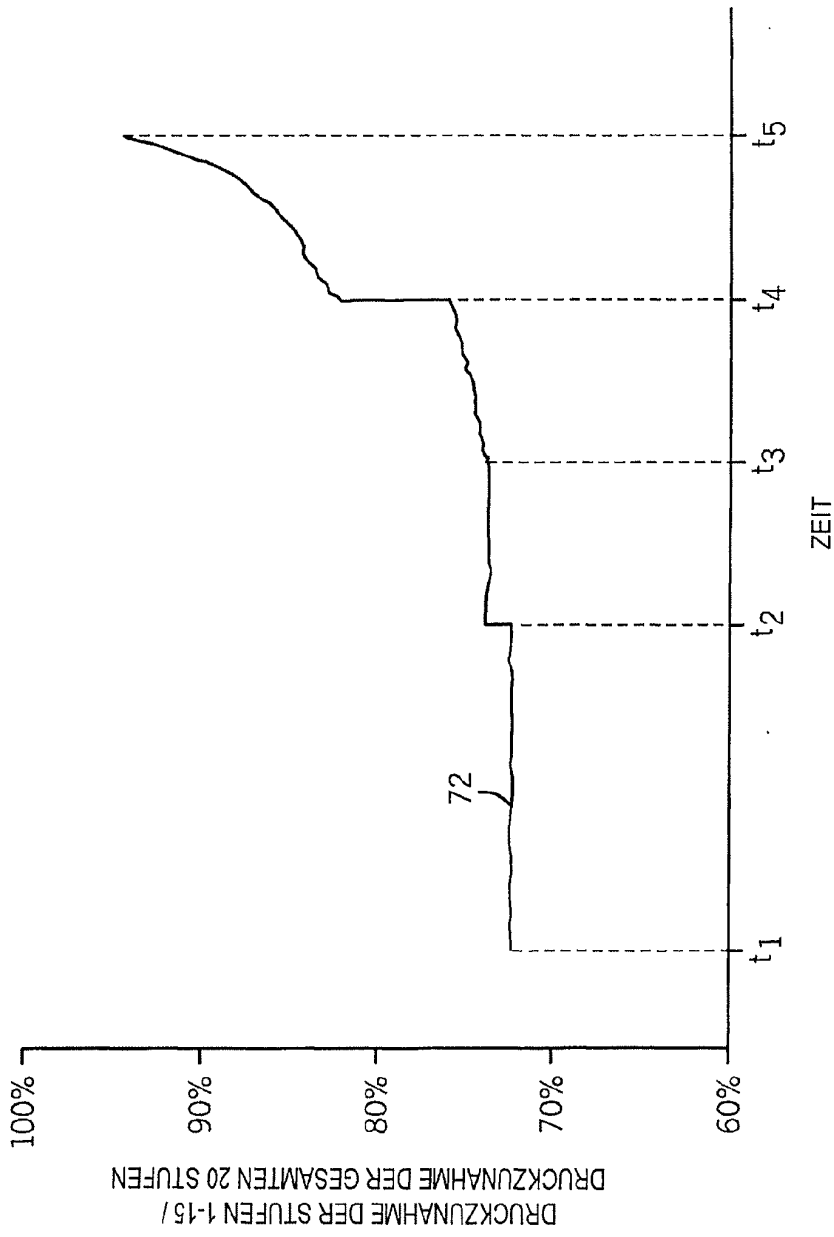


FIG. 5

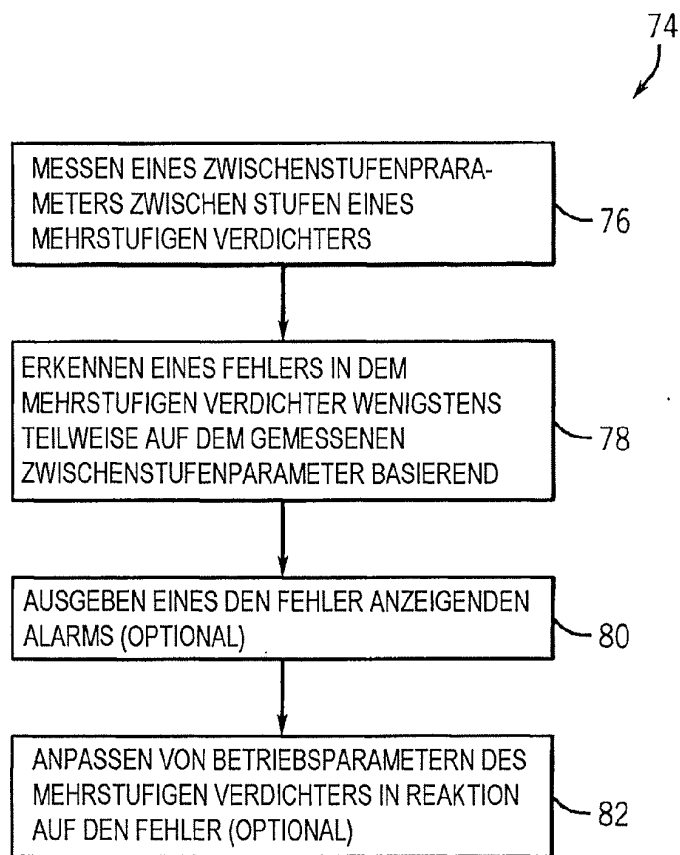


FIG. 6