



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 601 32 405 T2** 2009.01.02

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 182 339 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **601 32 405.6**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **01 306 653.5**

(96) Europäischer Anmeldetag: **03.08.2001**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **27.02.2002**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **16.01.2008**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **02.01.2009**

(51) Int Cl.⁸: **F02C 7/12** (2006.01)
F01D 25/12 (2006.01)

(30) Unionspriorität:

640357 16.08.2000 US

(73) Patentinhaber:

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

(74) Vertreter:

Rüger und Kollegen, 73728 Esslingen

(84) Benannte Vertragsstaaten:

DE, FR, GB

(72) Erfinder:

Turner, Mark Graham, Cincinnati, Ohio 45208, US

(54) Bezeichnung: **Kühlung von Turbinenschaufeln durch spezifische Schaufelverteilung**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

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

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft allgemein Gasturbinen und insbesondere in diesen vorhandene Turbinen.

[0002] In einer Gasturbine wird Luft in einem Verdichter komprimiert und in einer Brennkammer mit Brennstoff vermischt, um heiße Verbrennungsgase zu erzeugen, die über mehrere Turbinenstufen stromabwärts strömen. Eine Turbinenstufe enthält einen stationären Turbinenleitapparat mit Statorleitschaufeln, die die Verbrennungsgase durch eine stromabwärts gelegene Reihe von Turbinenrotorlauf-schaufeln leiten, die sich ausgehend von einem tragenden Laufrad radial nach außen erstrecken, das durch Entziehen von Energie aus den Gasen angetrieben wird.

[0003] Ein Hochdruck- oder Turbinenleitapparat der ersten Stufe nimmt die aus der Brennkammer strömenden heißesten Verbrennungsgase zunächst auf, die zu den daraus Energie entziehenden Rotorlauf-schaufeln der ersten Stufe gelenkt werden. Unmittelbar abstromseitig der Laufschaufeln der ersten Stufe ist ein Turbinenleitapparat der zweiten Stufe angeordnet, auf den wiederum eine Reihe von Laufschaufeln der zweiten Stufe folgt, die den Verbrennungsgasen weitere Energie entziehen. Die US 5 486 091 ist eine exemplarische Offenbarung eines solchen Turbinentriebwerks.

[0004] Während den Verbrennungsgasen Energie entzogen wird, sinkt deren Temperatur entsprechend. Da die Gastemperatur verhältnismäßig hoch ist, werden die Hochdruckturbinenstufen jedoch gewöhnlich gekühlt, indem durch die hohlen Leit- und Laufschaufeln von dem Verdichter abgezweigte Kühlluft geleitet wird. Da die Kühlluft aus der Brennkammer abgezweigt wird, verringert sich der Gesamtwirkungsgrad des Triebwerks entsprechend. Es ist daher gewünscht, den Einsatz solcher Kühlluft auf ein Minimum zu reduzieren, um den Gesamtwirkungsgrad des Triebwerks zu maximieren.

[0005] Die benötigte Kühlluftmenge ist von der Temperatur der Verbrennungsgase abhängig. Diese Temperatur ändert sich zwischen dem Leerlauf- und Maximalleistungsbetrieb des Triebwerks. Da die Temperatur der Verbrennungsgase einen unmittelbaren Einfluss auf die maximale Belastung hat, der die Leitschaufeln und Laufschaufeln ausgesetzt sind, müssen die Kühlluftanforderungen für die Turbinenstufen ausreichen, um der maximalen Verbrennungsgastemperatur des Triebwerksbetriebs standzuhalten, obwohl diese Laufbedingung während des Triebwerksbetriebs nur für eine verhältnismäßig kurze Zeitspanne auftritt.

[0006] Beispielsweise erfährt ein kommerzielles

Flugzeug-Gasturbinentriebwerk, das ein Flugzeug während des Fluges antreibt, um Passagiere oder Fracht zu transportieren, seine heißeste Laufbedingung während des Flugzeugstarts. Im Falle einer militärischen Anwendung eines Luftfahrzeugtriebwerks hängt die heißeste Laufbedingung von der militärischen Aufgabe ab, tritt jedoch gewöhnlich während des Starts in Zusammenhang mit dem Betrieb eines Nachbrenners auf. Weiter tritt im Falle eines erdgebundenen Gasturbinentriebwerks, das einen elektrischen Generator antreibt, die heißeste Laufbedingung gewöhnlich während der Spitzenwertbedingung eines heißen Tages auf.

[0007] Die maximale Verbrennungsgastemperatur variiert somit zeitlich in Abhängigkeit von der Betriebs- oder Laufbedingung des Triebwerks. Weiter variiert die maximale Verbrennungsgastemperatur, während die Gase aus dem Auslassringspalt der Brennkammer ausgestoßen werden, außerdem räumlich sowohl entlang des Umfangs als auch in radialer Richtung. Dieses räumliche Temperaturgefälle ist gewöhnlich durch Brennkammernmuster und Profilmustern gekennzeichnet, die aus dem Stand der Technik bekannt sind.

[0008] Daher ist jede Turbinenstufe sowohl hinsichtlich der Laufschaufeln als auch der Leitschaufeln gewöhnlich speziell konstruiert, um der maximalen Verbrennungsgastemperatur standzuhalten, die sowohl zeitlich als auch räumlich in den unmittelbar stromaufwärts von diesen vorhandenen Verbrennungsgasen auftreten. Da die Schaufeln in jeder Reihe von Leitschaufeln und Laufschaufeln zueinander identisch sind, sind die dafür vorgesehenen Kühlkonstruktionen ebenfalls identisch und reichen aus, um eine angemessene Kühlung bei den durch die einzelnen Stufen erfahrenen maximalen Verbrennungsgastemperaturen hervorzubringen, so dass die maximale Schaufelbelastung einschließlich der Wärmebelastung in geeigneten Grenzen gehalten wird, um eine angemessene Nutzungsdauer der Turbinenstufen sicherzustellen.

[0009] Da Triebwerke auch während des normalen Betriebs verschleifen, kann die Verbrennungsgastemperatur ungeachtet des Verschleißes des Triebwerks in gewissen Grenzen absichtlich erhöht werden, um eine Mindestnennleistung sicherzustellen. Der übliche Verschleiß eines Triebwerks im Laufe einer ausgedehnten Nutzung verringert dessen Wirkungsgrad und die sich daraus ergebende Ausgangsleistung, wobei ein Verlust an Ausgangsleistung durch eine Steigerung der Temperatur der Verbrennungsgase ausgeglichen wird.

[0010] Daher müssen die Turbinenkühlkonstruktionen außerdem in der Lage sein, in abgenutzten Gasturbinen eine angemessene Kühlung bis zu der typischen Abgastemperatur-(EGT = Exhaust Gas Tem-

perature)-Grenze bereitzustellen.

[0011] Es besteht daher ein Bedarf, eine Gasturbinentriebwerksturbine zu schaffen, die eine verbesserte Kühlung ihrer Schaufeln aufweist.

[0012] Die vorliegende Erfindung ist in den Ansprüchen 1 und 6 definiert.

[0013] In einem Ausführungsbeispiel der Erfindung enthält eine Turbine drei Reihen von Schaufeln, die während des Betriebs nacheinander heiße Verbrennungsgase aufnehmen. Die Schaufeln der dritten Reihe sind bezüglich der Umfangsrichtung bezogen auf die Schaufeln der ersten Reihe ausgerichtet, um die Schaufeln der dritten Reihe mit verhältnismäßig kühlen turbulenten Nachströmungen zu umfluten, die von den Schaufeln der ersten Reihe während der heißesten Laufbedingung der angetriebenen Gasturbine abgegeben werden. Die Schaufeln der dritten Reihe sind daher vor der höchsten Temperatur der Verbrennungsgase verschont, um die Anforderungen an ihre Kühlung zu reduzieren.

[0014] Die Erfindung wird nun anhand von Beispielen mit Bezug auf die Zeichnungen eingehender beschrieben:

[0015] [Fig. 1](#) zeigt eine axiale Querschnittsansicht durch einen Abschnitt eines exemplarischen Flugzeug-Gasturbinentriebwerks, das eine Turbine gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung enthält.

[0016] [Fig. 2](#) zeigt in einer isometrischen Ansicht einen Abschnitt der in [Fig. 1](#) veranschaulichten zweistufigen Hochdruckturbine.

[0017] [Fig. 3](#) veranschaulicht in einer längs der Schnittlinie 3-3 geschnittenen Stirnansicht eines Abschnitts des in [Fig. 2](#) veranschaulichten Turbinenleitapparats der ersten Stufe ein exemplarisches gesamtes relatives Temperaturprofil der hindurchgeleiteten Verbrennungsgase.

[0018] [Fig. 4](#) zeigt eine Draufsicht auf exemplarische Leitschaufel- und Laufschaufelströmungsflächen der in [Fig. 2](#) veranschaulichten zweistufigen Turbine längs der Schnittlinie 4-4.

[0019] [Fig. 5](#) zeigt in einer Ansicht der Druckseite einer in [Fig. 4](#) veranschaulichten Rotorlaufschaufel eine darauf vorhandene exemplarische gesamte relative Temperaturverteilung längs der Schnittlinie 5-5.

[0020] [Fig. 6](#) zeigt in einer Ansicht der in [Fig. 4](#) veranschaulichten Rotorlaufschaufel die darauf vorhandene gesamte relative Temperaturverteilung längs der Schnittlinie 6-6 von der Ansaugseite her.

[0021] [Fig. 7](#) zeigt in Form eines Flussdiagramms ein Verfahren zur Kühlung einer dritten Schaufelreihe, gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung.

[0022] In [Fig. 1](#) ist ein Abschnitt eines Zweikreisturbinentriebwerks **10** dargestellt, der konstruiert ist, um ein Flugzeug während des Fluges anzutreiben. Das Triebwerk ist um eine longitudinale oder axiale mittige Achse achsensymmetrisch und enthält strömungsmäßig in Reihe einen (nicht gezeigten) Bläser, einen in seinem hinteren Abschnitt gezeigten mehrstufigen Axialverdichter **12**, eine ringförmige Brennkammer **14**, eine auf zwei Stufen basierende Hochdruckturbine **16** und eine (nicht gezeigte) mehrstufige Niederdruckturbine.

[0023] Im Betrieb wird Luft **18** in dem Verdichter komprimiert und in der Brennkammer mit Brennstoff vermischt, um heiße Verbrennungsgase **20** zu erzeugen, die stromabwärts durch Hoch- und Niederdruckturbinen strömen, die den Gasen Energie entziehen. In einer herkömmlichen Konstruktion treibt die Hochdruckturbine den Verdichter an, und die Niederdruckturbine treibt den Bläser an, um dem Flugzeug im Flug beginnend mit dem Start für den Reiseflug, den Landeanflug und die Landung Vortrieb zu verleihen.

[0024] Wie in [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) gezeigt, basiert die Hochdruckturbine **16** auf zwei Stufen mit vier Reihen von Schaufeln **22**, **24**, **26**, **28**, die axial unmittelbar aufeinander folgend angeordnet sind, um der Reihe nach die Verbrennungsgase **20** hindurch zu leiten und daraus Energie zu entziehen.

[0025] Die Schaufeln **22** sind als Statorleitschaufeln der ersten Stufe konstruiert, die in Umfangsrichtung voneinander beabstandet sind und sich radial zwischen äußeren und inneren Bändern **30**, **32** erstrecken, um als erste die Verbrennungsgase **20** von der Brennkammer aufzunehmen.

[0026] Die Schaufeln **24** erstrecken sich ausgehend von dem Umfang eines ersten tragenden Laufrads **34** radial nach außen und sind als Turbinenrotorlaufschaufeln der ersten Stufe konstruiert, die die Verbrennungsgase von den Strömungsflächen der Leitschaufeln **22** der ersten Stufe entgegennehmen, um Energie zu entziehen, um das Laufrad im Betrieb drehend anzutreiben.

[0027] Die Schaufeln **26** sind als Leitapparatschaufeln der zweiten Stufe konstruiert, die sich zwischen tragenden äußeren und inneren Bändern **36**, **38** radial erstrecken und die Verbrennungsgase unmittelbar von den Laufschaufelströmungsflächen **24** der ersten Stufe aufnehmen.

[0028] Weiter erstrecken sich die Schaufeln **28** ausgehend von einem zweiten tragenden Laufrad **40** ra-

dial nach außen und sind als Laufschaufeln der zweiten Stufe dazu eingerichtet, Verbrennungsgase unmittelbar von den Strömungsflächen **26** der Leitschaufel der zweiten Stufe aufzunehmen, um daraus weitere Energie für den Antrieb des Laufrads **40** zu entziehen.

[0029] Da die Anzahl von Turbinenschaufeln **22–28** während des Betriebs von den heißen Verbrennungsgasen **20** umflutet sind, sind sie gewöhnlich in einer herkömmlichen Weise gekühlt. Beispielsweise sind die vier Reihen von Schaufeln hohl und können in ihrem Inneren mit vielfältigen Merkmalen einer inneren Kühlung ausgebildet sein. Ein Teil der Verdichterluft **18** wird aus dem Verdichter abgezweigt und als Kühlluft genutzt, die durch die Anzahl von Schaufeln geleitet wird, um diese von innen zu kühlen.

[0030] Die vier Reihen von Schaufeln weisen ferner gewöhnlich unterschiedliche Löcher oder Öffnungen **42** auf, die sich durch die gegenüberliegenden Druck- und Saugseitenwände der Schaufeln hindurch erstrecken, um die zur Kühlung verwendete Luft in den Strömungspfad der Verbrennungsgase zu entlassen. Die Öffnungen können als Reihen von herkömmlichen Filmkühlungslöchern oder Abströmkantenlöchern konstruiert und auf eine beliebige herkömmliche Weise in einer und/oder in beiden Seitenwänden jeder Schaufel ausgebildet sein.

[0031] Auf diese Weise wird die für die Kühlung verbrauchte Luft aus dem Inneren jeder Schaufel durch die vielfältigen Öffnungen ausgestoßen, so dass sie an den Außenflächen der Schaufeln schützende Filme von Kühlluft bildet, die einem zusätzlichen Schutz vor den heißen Verbrennungsgasen dienen.

[0032] Das in [Fig. 1](#) veranschaulichte Triebwerk **10** ist in einem Ausführungsbeispiel als ein Zweikreisflugzeugtriebwerk zum Antrieb eines Flugzeugs während des Fluges konstruiert und arbeitet daher ausgehend vom Leerlauf über Start, Reiseflug, Landeanflug und Landung hinweg unter sich ändernden Bedingungen des Laufs oder der Leistung. Die während des Betriebs entstehende maximale Temperatur der Verbrennungsgase **20** variiert daher auch zeitlich in Abhängigkeit von den vielfältigen Laufbedingungen des Triebwerks.

[0033] Darüber hinaus ändert sich die räumliche Temperaturverteilung der während des Betriebs aus der Brennkammer **14** ausgestoßenen Verbrennungsgase **20**, wie durch die herkömmlichen Profil- und Musterfaktoren dargestellt, sowohl entlang des Umfangs als auch in radialer Richtung.

[0034] Die in [Fig. 2](#) veranschaulichten Leitschaufeln **22** der ersten Stufe sind dazu eingerichtet, die Verbrennungsgase zwischen die stromabwärts gelegenen Laufschaufeln **24** der ersten Stufe zu leiten,

die daraus Energie entziehen. [Fig. 3](#) veranschaulicht ein exemplarisches Profil bzw. eine Verteilung der gesamten relativen Temperatur der Verbrennungsgase **20**, die sich in jedem zwischen den Leitschaufeln befindlichen Durchlasskanal sowohl in radialer Richtung als auch in Umfangsrichtung ändert. Diese exemplarische Temperaturverteilung kann auf herkömmliche Weise auf analytischem Wege mittels einer modernen Berechnung dreidimensionaler (3-D) numerischer Gleichungen ermittelt werden.

[0035] [Fig. 3](#) veranschaulicht Isoklinen der unterschiedlichen Temperaturen der Verbrennungsgase von verhältnismäßig hoher (H) Temperatur bis zu verhältnismäßig niedriger (C) Temperatur.

[0036] [Fig. 4](#) veranschaulicht schematisch den axialen Strömungspfad der Verbrennungsgase **20** auf ihrem Weg von Stufe zu Stufe über die vier Reihen von Schaufeln **22–28**. Da die Verbrennungsgase **20** zwangsläufig zwischen die Schaufeln in jeder Stufe strömen, unterbrechen die einzelnen Schaufeln selbst entlang des Umfangs den Verbrennungsgasstrom und bewirken daher entsprechende von den entsprechenden Abströmkanten der einzelnen Schaufeln ausgehende turbulente Nachströmungen **44**.

[0037] Die turbulenten Nachströmungen **44** bilden in der Kontinuität des Hauptstrom von Verbrennungsgasen lokale Unterbrechungen, in denen örtliche Turbulenz entsteht. Weiter weisen die turbulenten Nachströmungen einen deutlich geringeren Impuls auf als der Verbrennungsgasstrom zwischen benachbarten Schaufeln. Die turbulenten Nachströmungen **44** sind im Falle einer Turbine aus den folgenden zwei Gründen kühler als der umgebende Verbrennungsgasstrom.

[0038] Grundsätzlich entzieht die Turbine den Verbrennungsgasen Energie, so dass deren mittlere Temperatur sinkt. Die stromabwärts gelegenen Leitschaufel- und Laufschaufelströmungsflächen wirken auf das einen geringeren Impuls aufweisende Nachströmungsfluid, das von den unmittelbar stromaufwärts zu diesen angeordneten Schaufeln stammt, in höherem Maße als auf das umgebende Verbrennungsgas und reduzieren daher die Temperatur der turbulenten Verbrennungsgasnachströmungen selbst. Diese ist sowohl in der in [Fig. 2](#) veranschaulichten Hochdruckturbine als auch in der nicht dargestellten Niederdruckturbine der Fall.

[0039] Im Falle der in [Fig. 2](#) veranschaulichten Hochdruckturbine sind die einzelnen Schaufeln mit einer inneren Kühlung versehen, wobei die für die Kühlung genutzte Luft **18** durch die vielfältigen Öffnungen **42** in den Verbrennungsströmungspfad entlassen wird. Die für die Kühlung verwendete Luft strömt auf diese Weise längs der Außenfläche der

Schaufeln und wird von deren Abströmkanten unmittelbar in die entstehenden turbulenten Nachströmungen **44** abgegeben. Indem in die turbulenten Nachströmungen für die Kühlung verbrauchte Luft eingebracht wird, werden sie somit zusätzlich gekühlt.

[0040] Dieses Verhalten wird gemäß der vorliegenden Erfindung genutzt, um die Temperatur der Turbinenrotorlaufschaufeln oder Leitapparatschaufeln durch Umflutung derselben mit den verhältnismäßig kühlen turbulenten Nachströmungen zu reduzieren, die von der entsprechenden stromaufwärts angeordneten Schaufelreihe ausgehen, die sich in demselben relative Bewegungsrahmen befindet wie die Laufschaufel- oder Leitschaufelreihe. Im Falle von Leitapparaten ist ein stromaufwärts angeordneter Leitapparat in Umfangsrichtung mit einem entsprechenden stromabwärts gelegenen Leitapparat fluchtend ausgerichtet, wobei sich eine intervenierende Reihe von Rotorblättern dazwischen befindet. Im Falle von Laufrädern ist eine stromaufwärts angeordnete Laufschaufelreihe in Umfangsrichtung mit einer entsprechenden stromabwärts gelegenen Laufschaufelreihe fluchtend ausgerichtet, wobei sich dazwischen ein intervenierender Leitapparat befindet.

[0041] Auf diese Weise können die in [Fig. 4](#) veranschaulichten verhältnismäßig kühlen turbulenten Nachströmungen **44** genutzt werden, um die entsprechende stromabwärts gelegene Reihe von Schaufeln bevorzugt zu umfluten, sodass die darin auftretenden Temperaturen, wie beispielsweise in den [Fig. 5](#) und [Fig. 6](#) veranschaulicht, reduziert werden.

[0042] [Fig. 5](#) zeigt das Profil oder die Verteilung der gesamten relativen Temperatur auf der Druckseite der in [Fig. 4](#) veranschaulichten Laufschaufel **28** der zweiten Stufe, wobei [Fig. 6](#) die entsprechende gesamte relative Temperaturverteilung auf deren Saugseite veranschaulicht. Die Isoklinen der Temperaturverteilung variieren von verhältnismäßig kühl (C) bis verhältnismäßig warm oder heiß (H).

[0043] Durch geeignetes Ausrichten der entsprechenden Reihen der Rotorlaufschaufeln oder Leitapparatschaufeln lassen sich die kühlen turbulenten Nachströmungen **44** darauf beschränken die entsprechende stromabwärts gelegene Reihe von Schaufeln zu umfluten, um die darin auftretenden Temperaturen und die sich während des Betriebs ergebenden Spannungen zu reduzieren.

[0044] [Fig. 7](#) veranschaulicht in Form eines Flussdiagramms ein exemplarisches Verfahren zum Kühlen der in den [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) veranschaulichten Hochdruckturbine **16**, gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Da die Erfindung für Turbinenschaufeln oder Leitapparatschaufeln verwirklicht werden kann, die sich in denselben relativen Bewegungsrahmen befinden, ist das

Flussdiagramm allgemein im Zusammenwirken mit der in [Fig. 4](#) dargestellten exemplarischen Turbinenkonstruktion veranschaulicht, um beide grundlegende Konfigurationen zu veranschaulichen.

[0045] Im Falle der Turbinenleitapparatanwendung gehören zu drei aufeinanderfolgende Reihen von Turbinenschaufeln die Leitschaufeln **22** und die Laufschaufeln **24** der ersten Stufe sowie die Leitschaufeln **26** der zweiten Stufe.

[0046] Und im Falle der Turbinenlaufradanwendung gehören zu den drei aufeinanderfolgenden Reihen von Turbinenschaufeln die Turbinenschaufeln **24** der ersten Stufe sowie die Leitschaufeln **26** und die Laufschaufeln **28** der zweiten Stufe.

[0047] In beiden Anwendungen werden die Turbinenschaufeln der dritten Reihe, seien dies Leitschaufeln **26** oder Laufschaufeln **28**, bevorzugt durch ein Ausrichten in Umfangsrichtung mit den entsprechenden Schaufeln der ersten Reihe, den Leitschaufeln **22** der ersten Stufe oder den Laufschaufeln **24** der ersten Stufe gekühlt, wobei sich eine intervenierende Reihe von Schaufeln dazwischen befindet.

[0048] Das Kühlungsverfahren wird durchgeführt, indem zu Beginn die heißesten Laufbedingung des Triebwerks zum Erzeugen der Verbrennungsgase mit der höchsten Temperatur ausgewählt werden, die nacheinander die drei Reihen von Schaufeln durchströmen. Weiter werden die Schaufeln der dritten Reihe, z. B. die Laufschaufeln **28** der zweiten Stufe, in Umfangsrichtung fluchtend bezüglich der entsprechenden Schaufeln der ersten Reihe, z. B. der Laufschaufeln **24** der ersten Stufe, entsprechend ausgerichtet, um die Schaufeln der dritten Reihe mit von den Schaufeln der ersten Reihe ausgestoßenen turbulenten Nachströmungen **44** zu umfluten, um die Schaufeln der dritten Reihe zu kühlen. Die Laufschaufelanzahl für die stromaufwärts gelegene erste Reihe sollte dieselbe wie diejenige der stromabwärts gelegenen dritten Reihe sein oder ein ganzzahliges Verhältnis davon sein, um die Abströmkanten der stromaufwärts gelegenen Reihe entsprechend bezüglich der Abströmkanten der stromabwärts liegenden Reihe in derselben Ausrichtung um den Umfang fluchtend auszurichten.

[0049] Wie in [Fig. 4](#) dargestellt, sind die einzelnen Schaufelreihen in jeder Reihe in Umfangsrichtung voneinander beabstandet, wobei ein übereinstimmender Abstand durch die Teilung von Schaufel zu Schaufel in jeder Reihe repräsentiert ist. Die Teilung von den Anström- zu den Abströmkanten der Schaufeln ist dieselbe in Umfangsrichtung. Das Ausrichten in Umfangsrichtung zwischen den entsprechenden Schaufelreihen ist durch die Beabstandung S in Umfangsrichtung von der Abströmkante der stromaufwärts gelegenen Schaufeln bezüglich der Anström-

kante der stromabwärts gelegenen Schaufeln repräsentiert. Diese Ausrichtung oder Beabstandung S kann durch den Prozentsatz der Teilung der stromabwärts gelegene Schaufel repräsentiert sein, wobei Null% und 100% keine Beabstandung in Umfangsrichtung zwischen den entsprechenden Abström- und Anströmkanten bedeuten, und ein Teilungsabstand von 50% anzeigt, dass die Abströmkante der stromaufwärts gelegenen Schaufel entlang des Umfangs auf halbem Weg zwischen den Anströmkanten der stromabwärts gelegenen Schaufeln fluchtend ausgerichtet ist.

[0050] Für die in [Fig. 1](#) veranschaulichte erste und zweite Laufradstufe, wird ein Ausrichten zwischen diesen Stufen in Umfangsrichtung durch entsprechendes Einteilen der Schraubenbohrungen und Befestigungsschrauben in der dazwischen angeordneten Transmissionswelle **46** erreicht. Im Falle der beiden in [Fig. 1](#) veranschaulichten Leitapparatstufen wird die entsprechende Einteilung zwischen diesen in Umfangsrichtung durch die Positionierung der Leitschaufeln **26** der zweiten Stufe in deren tragenden Gehäuse bezüglich der Leitschaufeln **22** der ersten Stufe entlang dem Umfang bewirkt. Jede beliebige herkömmliche Art einer Befestigung von Laufrad an Laufrad oder von Leitschaufel an Leitschaufel kann verwendet werden, um die Schaufeln geeignet auszurichten, beispielsweise zwischen Laufrädern eine Keilnutverbindung.

[0051] Da die durch die vielfältigen Turbinenstufen geleiteten Verbrennungsgase die entsprechenden Schaufeln erwärmen, sind die Schaufeln aufgrund des sich über sie hinweg ändernden Temperaturverlaufs einer thermisch induzierten Spannung ausgesetzt. Diese Wärmebelastung addiert sich zu der von den Drucklasten herrührenden, auf die Schaufeln ausgeübten Spannung und zusätzlich zu den im Betrieb während der Rotation der Rotorlaufschaufel auftretenden Zentrifugalkräften.

[0052] Dementsprechend sind die Schaufeln der ersten und dritten Reihe, z. B. **24**, **28** oder **22**, **26**, vorzugsweise ebenfalls bei der heißesten Laufbedingung ausgerichtet, um Spannung in den Schaufeln der dritten Reihe zu reduzieren, die der von den Verbrennungsgasen herrührenden Wärmespannung unterworfen sind. Die Schaufeln der dritten Reihe lassen sich daher nicht nur kühlen, indem sie während der heißesten Laufbedingung mit den kühlen turbulenten Nachströmungen umflutet werden, vielmehr kann auch das Ausrichten verwendet werden, um jene Schaufeln bevorzugt zu kühlen und Temperaturgradienten darin zu reduzieren, um die Spannung in den Schaufeln nach Bedarf zu verringern.

[0053] [Fig. 7](#) veranschaulicht ein exemplarisches Verfahren zum Bestimmen des gewünschten Andockens der Schaufelblattreihen in dem ursprünglichen

Konstruktionsentwurf der Turbine. Das Ausrichten kann durch analytisches Verfolgen der von der ersten zu der dritten Reihe von Schaufeln verlaufenden kühlen turbulenten Nachströmungen **44** bestimmt werden. Dies kann auf einem digital programmierbaren Computer **48** mittels geeigneter dreidimensionaler Computersoftware erreicht werden, die geeignet ist, die komplizierte Strömungsfeldanalyse der nacheinander durch die maßgebenden Turbinenstufen geleiteten Verbrennungsgase durchzuführen. Diese analytischen Untersuchungen können, wie aus dem Stand der Technik bekannt, eine unstetige Analyse, ein Verfolgen der Gewichtung der durchschnittlichen Strömung oder ein Berechnungsansatz einer durchschnittlichen Durchflussrate beinhalten.

[0054] Die Schaufeln der dritten Reihe können anschließend auf analytischem Wege an einer anfänglichen Position ausgerichtet werden, um entsprechende Oberflächentemperaturverteilungen auf den gegenüberliegenden Seiten davon zu ermitteln. [Fig. 5](#) und [Fig. 6](#) veranschaulichen eine auf die verhältnismäßig kühlen turbulenten Nachströmungen und relativ heißen Verbrennungsgase zurückzuführende exemplarische Verteilung einer gesamten relativen Temperatur an den entgegengesetzten zwei Seiten der Laufschaufeln **28** der zweiten Stufe. Diese Temperaturverteilung kann auf analytischem Wege mittels einer herkömmlichen dreidimensionalen Navier-Stokes-Rechenanalyse ermittelte werden.

[0055] Dieses analytische Verfahren wird für mehrere verschiedene Ausrichtungspositionen zwischen der ersten und dritten Schaufelreihe wiederholt, um den gesamten Bereich von Ausrichtungspositionen von Null% bis 100% einer Schaufelteilungsausrichtung abzudecken.

[0056] Die Aufgabe der analytischen Berechnung der Turbinenstufen besteht darin, die stromabwärts gelegene Schaufelreihe so anzuordnen, dass ein Hot-Spot von Verbrennungsgasen vermieden wird, die von dem stromaufwärts zwischen den Schaufeln gelegenen Durchlass, z. B. aus dem in [Fig. 3](#) veranschaulichten Leitapparat, abgegeben werden.

[0057] Die auf mehreren Wegen analysierten verschiedenen Ausrichtungspositionen zwischen den Schaufeln der ersten und dritten Reihe können verwendet werden, um die auf den Schaufeln der dritten Reihe erzeugten Temperaturprofile zu bestimmen.

[0058] Das bevorzugte Ausrichten der beiden Reihen von Turbinenschaufeln **24**, **28** wird erreicht, indem die relative Gesamttemperatur der turbulenten Nachströmungen berechnet wird, die auf analytischem Wege zwischen den während ihrer Rotation in Bezug zueinander stationären Laufrädern verfolgt werden. Die kühlen turbulenten Nachströmungen **44** werden von den Abströmkanten der stromaufwärts

gelegenen Rotorlaufschaufeln **24** abgegeben und anschließend durch die in dem absoluten Gehäuse stationären, sich jedoch bezüglich der Turbinenschaufeln bewegendes Leitapparatschaufeln **26** der zweiten Stufe gewendet.

[0059] Während die Gase durch die Leitapparatschaufeln gewendet werden, verringert sich die relative Gesamttemperatur, und die Fluidtemperatur der turbulenten Nachströmung wird sogar noch weiter gesenkt. Die tatsächlichen physikalischen Vorgänge auf dem Weg durch die Leitapparatschaufeln **26** der zweiten Stufe sind unstetig, wobei die turbulente Nachströmung zerteilt und verzerrt wird. Jedoch basiert die über die Zeit gemittelte Wirkung in dem Bezugssystem der Rotorlaufschaufel darauf, die Richtung der durch gestrichelte Linien in [Fig. 4](#) veranschaulichten turbulenten Nachströmungen **46** zu verändern, die in einer stromabwärts verlaufenden Richtung divergieren, während sie zu den Laufschaufeln **28** der zweiten Stufe strömen.

[0060] Im Wesentlichen wird für das Ausrichten der Leitapparatschaufeln **22**, **26** der ersten und zweiten Stufe in Bezug zueinander dasselbe analytische Verfahren verwendet, mit dem Unterschied, dass bei der analytischen Verfolgung entsprechender turbulenter Nachströmungen anstelle der relativen Gesamttemperatur die absolute Gesamttemperatur bestimmt wird.

[0061] Wie oben erwähnt, sind die Schaufeln, beispielsweise **22** oder **24**, der ersten Reihe hohl, um die Kühlluft **18** hindurchzuleiten. Außerdem sind sie mit den Auslassöffnungen **42** ausgebildet, die dazu dienen, die Kühlluft während der heißesten Laufbedingung in die entsprechenden turbulenten Nachströmungen **44** zu abzugeben.

[0062] Auf diese Weise werden die entsprechenden turbulenten Nachströmungen **44** durch das Einbringen der für die Kühlung verwendeten, aus der stromaufwärts gelegenen Schaufelreihe ausgestoßenen Luft **18** zusätzlich gekühlt, was die Kühlwirkung der turbulenten Nachströmungen auf die stromabwärts gelegene Reihe von Schaufeln weiter reduziert.

[0063] [Fig. 5](#) und [Fig. 6](#) veranschaulichen ein Beispiel aus mehreren Temperaturverteilungen, die einem speziellen Ausrichten der Schaufeln der ersten und dritten Reihe entsprechen. Dieses Ausrichten beträgt etwa 40% der Teilung der stromabwärts gelegenen Schaufeln der dritten Reihe, beispielsweise der Laufschaufeln **28** der zweiten Stufe, wobei die Schaufeln der ersten und dritten Reihe **24**, **28** speziell ausgerichtet sind, um die Schaufeln **28** der dritten Reihe an einer vorbestimmten Stelle auf ihrer Außenfläche, z. B. an dem radial weiter außen liegenden Rand, örtlich zu kühlen.

[0064] Die Komplexität der in [Fig. 5](#) und [Fig. 6](#) veranschaulichten Temperaturisoklinen variiert in Abhängigkeit von den Änderungen der Ausrichtungspositionen, wobei sich auch die Kühlwirkung der turbulenten Nachströmungen **44** ändert. Dementsprechend können die Schaufeln der ersten und dritten Reihe in einer Abwandlung so ausgerichtet sein, dass sie die Schaufeln **28** der dritten Reihe auf einer vorbestimmten Höhe A längs einer radialen Spannweite davon örtlich kühlen. Der Ort der Spannweite kann, falls gewünscht, in der Nähe der Blattspitzen sein oder kann sich an jedem sonstigen Ort der Spannweite befinden, der innerhalb der Reichweite der kühlen turbulenten Nachströmungen zur Kühlung liegt.

[0065] In einer Abwandlung können die Schaufeln der ersten und dritten Reihe **24**, **28** ausgerichtet sein, um die Schaufeln **28** der dritten Reihe zu kühlen, so dass die mittlere Temperatur derselben reduziert wird, und nicht lediglich die Temperatur einer örtlich begrenzten Stelle.

[0066] Aus dem Stand der Technik ist es bekannt, dass Turbinenrotorlaufschaufeln der ersten und dritten Reihe mit einer Teilung von nahe Null% ausgerichtet werden können, um den Wirkungsgrad einer Turbine zu maximieren, wobei ein minimaler Wirkungsgrad einer Turbine bei einer Ausrichtungsposition von etwa 50% Teilung hervorgerufen wird. Um den Gesamtwirkungsgrad zu maximieren, wird ein Ausrichten hinsichtlich einer Maximierung des Wirkungsgrads einer Turbine allerdings unter derjenigen Laufbedingung des Triebwerks durchgeführt, die die längste Dauer aufweist, z. B. im Falle eines Flugzeugtriebwerks bei Reiseflugbetrieb.

[0067] Im Gegensatz dazu werden die Schaufeln der ersten und dritten Reihe, wie oben beschrieben, gemäß der vorliegenden Erfindung bei der heißesten Laufbedingung ausgerichtet, die gewöhnlich von verhältnismäßig kurzer Dauer ist und die im Falle eines Flugzeuggasturbinentriebwerks dem Betrieb der Startleistung entspricht. Eine wesentliche Kühlung der stromabwärts gelegenen Schaufeln der dritten Reihe kann erreicht werden, indem insbesondere die ersten und dritten Schaufelreihen ausgerichtet werden, was gewöhnlich dem Erzielen eines geringeren als dem bei der heißesten Laufbedingung vorhandenen maximalen Wirkungsgrad einer Turbine entspricht. Dementsprechend kann während des Starts mit Blick auf den erheblichen Vorteil der Kühlung von Schaufeln stromabwärts gelegener Reihen hinsichtlich einer Steigerung ihrer Beständigkeit und Lebensdauer ein Kompromiss zu Lasten des Wirkungsgrads eingegangen werden.

[0068] Die heißeste Laufbedingung für ein typisches militärisches Gasturbinentriebwerk tritt während der Startleistung in Zusammenhang mit dem

Betrieb eines Nachbrenners auf. Die Schaufeln der ersten und dritten Reihe können daher für das militärische Triebwerk bei dieser Bedingung ausgerichtet sein, um eine verbesserte Kühlung der Schaufeln der dritten Reihe zu erzielen.

[0069] Die Startbetriebsbedingung ist schematisch in [Fig. 7](#) anhand eines Ausführungsbeispiels der Erfindung beispielsweise für ein neues Triebwerk **10** veranschaulicht. Für ein erdgebundenes Gasturbinentriebwerk **108**, das ähnliche Komponenten enthält wie das in [Fig. 1](#) veranschaulichte Flugzeugtriebwerk **10**, ist die heißeste Laufbedingung für das Triebwerk die Spitzenleistung eines heißen Tages, wenn es für den Antrieb eines damit verbundenen elektrischen Generators verwendet wird.

[0070] Ein besonderer Vorteil der vorliegenden Erfindung besteht darin, dass sie auch zur Verbesserung der Schaufelkühlung in einem abgenutzten Triebwerk **10C** verwendet werden kann, das bereits über einen Großteil seiner erwarteten Lebensdauer, gewöhnlich sind dies Tausende von Stunden, betrieben wurde. Die Leistung eines Triebwerks nimmt mit dessen Verschleiß ab, und es muss daher zur Sicherstellung einer minimalen Nennleistung der Ausgangswelle des Motors mit einer höheren Verbrennungsgastemperatur betrieben werden, als sie in einem neuen Triebwerk normalerweise zur Erzeugung zusätzlicher Leistung vorzufinden ist. Die heißen Verbrennungsgase setzen die Turbinenschaufeln daher in dem abgenutzten Triebwerk einer größeren Wärmezufuhr aus als im Neuzustand.

[0071] Außerdem verändert der Verschleiß der Turbine den durch sie hindurch führenden Strömungspfad der Verbrennungsgase entsprechend. Die vorliegende Erfindung kann daher verwendet werden, um die Schaufeln der ersten und dritten Reihe ursprünglich der heißesten Laufbedingung in dem abgenutzten Triebwerk zugeordnet anzubringen, die sich von jener in dem neuen Triebwerks unterscheiden.

[0072] Auf diese Weise wird sich der Strömungspfad der kühlen turbulenten Nachströmungen, während das Triebwerk im Laufe seiner Nutzungslebensdauer verschleißt, ebenfalls ändern, um die Schaufeln einer stromabwärts gelegene Reihe bevorzugt zu kühlen, so dass deren Temperatur reduziert wird, was andernfalls auftreten würde, während die Verbrennungsgastemperatur erhöht wird, um den Leistungsverlust des Triebwerks auszugleichen.

[0073] Dementsprechend können die durch das Kühlen gewonnenen Vorteile des Umflutens der Schaufeln einer stromabwärts gelegenen Reihe mit den kühlen turbulenten Nachströmungen **44** während der Lebensdauer des Triebwerks zurückgehalten werden, um eine Kühlungswirkung zu maximieren,

während das Triebwerk in sonstiger Weise verschleißt, um eine wirkungsvolle Kühlung bei der Mindestnennleistung des Triebwerks trotz der dafür erforderlichen Steigerung der Verbrennungsgastemperatur sicherzustellen.

[0074] Durch Nutzung der vorliegenden Erfindung ist es nun nicht mehr erforderlich, die Schaufeln einer stromabwärts gelegenen Reihe, die den verhältnismäßig kühlen turbulenten Nachströmungen von Schaufeln einer stromaufwärts gelegenen Reihe unterworfen sind, mit Blick auf die maximale Temperatur von darüber strömenden Verbrennungsgasen zu konstruieren, sondern lediglich hinsichtlich der niedrigeren Temperatur, die durch die bevorzugt ausgerichteten, kühlenden turbulenten Nachströmungen ermöglicht ist. Mit demselben Kühlluftdurchsatz lässt sich eine verbesserte Kühlung der Schaufeln erzielen. Es können aber auch die Anforderungen an den Kühlluftstrom reduziert werden, um den Wirkungsgrad des Triebwerks weiter zu steigern.

[0075] In dem zuletzt erwähnten Ausführungsbeispiel kann die durch den Einsatz einer geringeren Kühlluftmenge erzielte Steigerung des Triebwerkswirkungsgrades dazu genutzt werden, um eine eventuelle Turbinenwirkungsgradverringerung auszugleichen, die darauf zurückzuführen ist, dass eine Ausrichtung der beiden Schaufelreihen von der nominalen Teilung der Turbine abweicht. Da das Ausrichten bei der heißesten Laufbedingung des Triebwerks durchgeführt wird, tritt diese Bedingung außerdem gewöhnlich nur kurzzeitig auf, und eine eventuelle Verringerung des Betriebswirkungsgrads ist dementsprechend von geringer Dauer.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Kühlen einer dritten Reihe von Turbinenschaufeln (**26**, **28**), die auf eine erste und zweite Reihe von Turbinenschaufeln (**22**, **24**, **26**) in einem Gasturbinentriebwerk (**10**) folgen, gekennzeichnet durch:

das Auswählen der heißesten Laufbedingung des Triebwerks (**10**) zum Erzeugen der Verbrennungsgase mit der höchsten Temperatur, die nacheinander die drei Reihen durchströmen; und
das Ausrichten der Schaufeln (**26**, **28**) der dritten Reihe bezüglich der Umfangsrichtung bezogen auf die Schaufeln der ersten Reihe (**22**, **24**) unter der besagten Laufbedingung, um die Schaufeln der dritten Reihe mit von den Schaufeln der ersten Reihe ausgestoßenen turbulenten Nachströmungen (**44**) zu umfluten, um die Schaufeln der dritten Reihe zu kühlen.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Schaufeln (**24**, **28**) der ersten und dritten Reihe ausgerichtet sind, um außerdem Spannung in den Schaufeln der dritten Reihe zu reduzieren, die der von den Verbrennungsgasen ausgehenden Wärmebelastung unter-

worfen sind.

schaufeln sind, und die Schaufeln der zweiten Reihe Rotorlaufschaufeln (24) sind.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei die Ausrichtung bestimmt wird durch:
das analytische Verfolgen der turbulenten Nachströmungen (44) von der ersten Reihe (22, 24) zu der dritten Reihe (26, 28);
das analytische Ermitteln der Oberflächentemperaturverteilung der turbulenten Nachströmungen auf den Schaufeln der dritten Reihe; und
das analytische Ausrichten der Schaufeln der dritten Reihe an mehreren verschiedenen Positionen, um entsprechende analytisch ermittelte Oberflächentemperaturverteilungen davon zu berechnen.

4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei die relative Gesamttemperatur der turbulenten Nachströmungen analytisch verfolgt wird.

5. Verfahren nach Anspruch 3, wobei die absolute Gesamttemperatur der turbulenten Nachströmungen analytisch verfolgt wird.

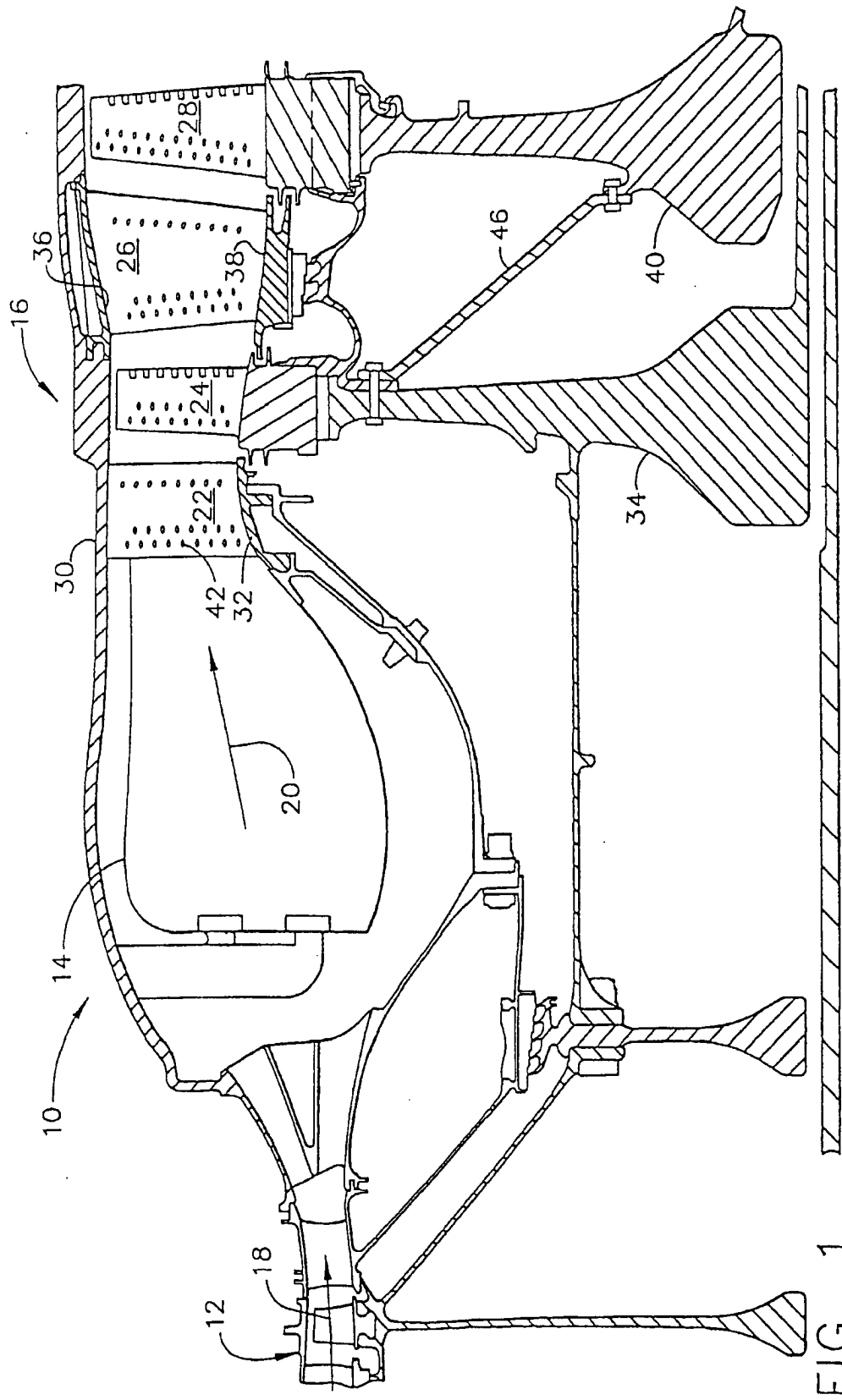
6. Turbine (16) für ein Gasturbinentriebwerk (10), zu der gehören:
eine erste, zweite und dritte Reihe von Turbinenschaufeln (22–28), die dazu dienen, Verbrennungsgase (20) nacheinander hindurch zu leiten; und dadurch gekennzeichnet, dass
die Schaufeln (26, 28) der dritten Reihe entlang des Umfangs bezüglich der Schaufeln (22, 24) der ersten Reihe ausgerichtet sind, um die Schaufeln der dritten Reihe mit turbulenten Nachströmungen (44) zu umfluten, die von den Schaufeln der ersten Reihe während eine heißesten Laufbedingung des Triebwerks ausgestoßen werden, die die Verbrennungsgase mit der höchsten Temperatur erzeugt, so dass die Schaufeln der dritten Reihe gekühlt werden.

7. Turbine nach Anspruch 6, wobei die Schaufeln (22, 24) der ersten Reihe hohl sind, um durch sie hindurch Kühlluft (18) zu kanalisieren, und mehrere Öffnungen (42) aufweisen, um die Kühlluft während der heißesten Laufbedingung in die turbulenten Nachströmungen auszustoßen.

8. Turbine nach Anspruch 7, wobei die Schaufeln (24, 28) der ersten und dritten Reihe ausgerichtet sind, um außerdem Spannung in den Schaufeln der dritten Reihe zu reduzieren, die der von den Verbrennungsgasen ausgehenden Wärmebelastung unterworfen sind.

9. Turbine nach Anspruch 8, wobei die Schaufeln (24, 28) der ersten und dritten Reihe Rotorlaufschaufeln sind, und die Schaufeln (26) der zweiten Reihe Statorleitschaufeln sind.

10. Turbine nach Anspruch 8, wobei die Schaufeln (22, 26) der ersten und dritten Reihe Statorleit-



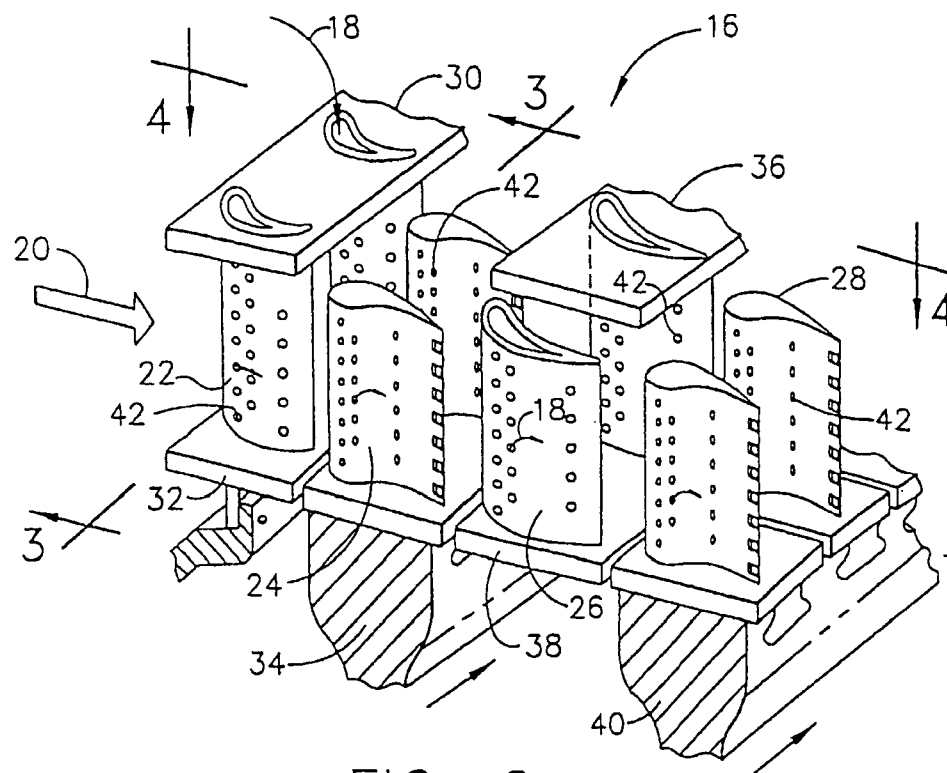


FIG. 2

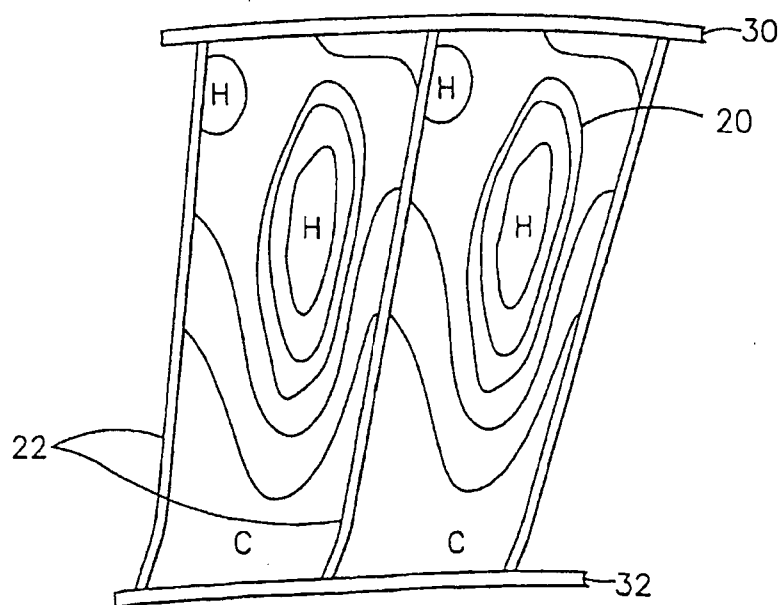


FIG. 3

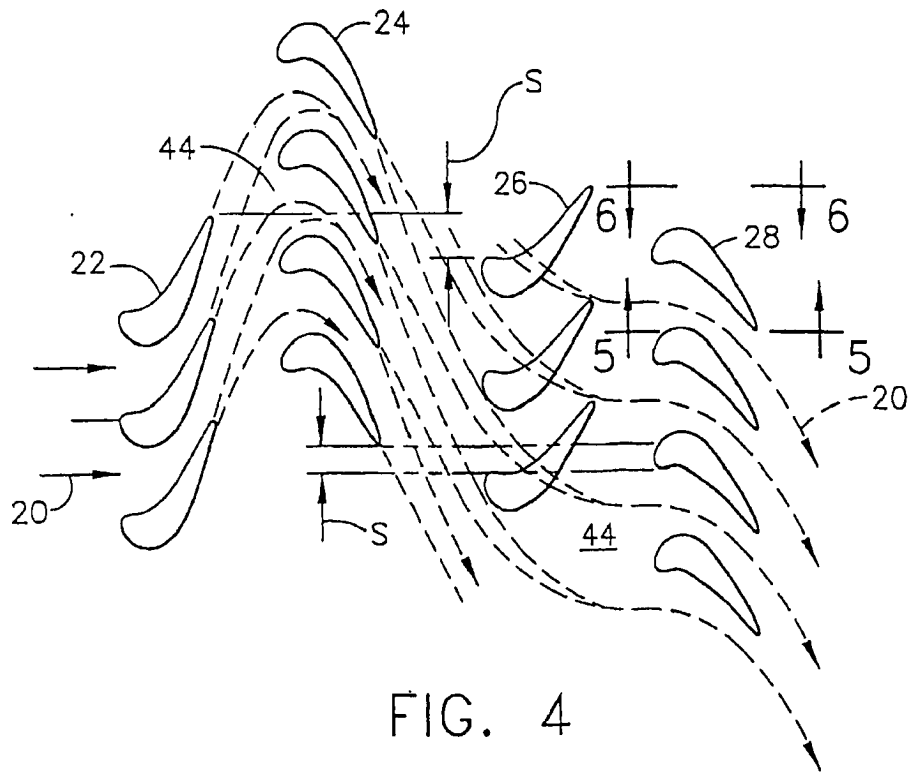


FIG. 4

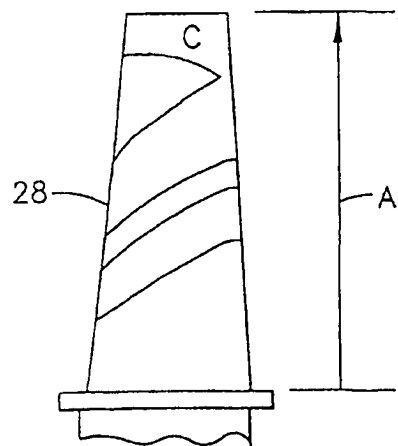


FIG. 5

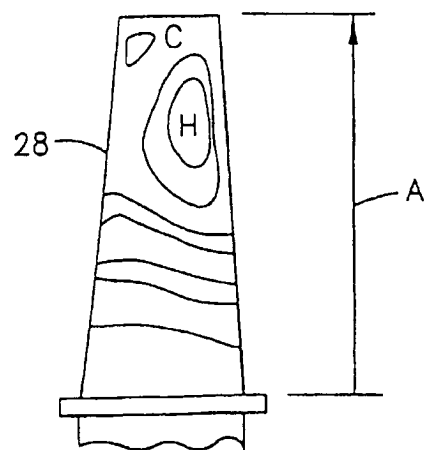


FIG. 6

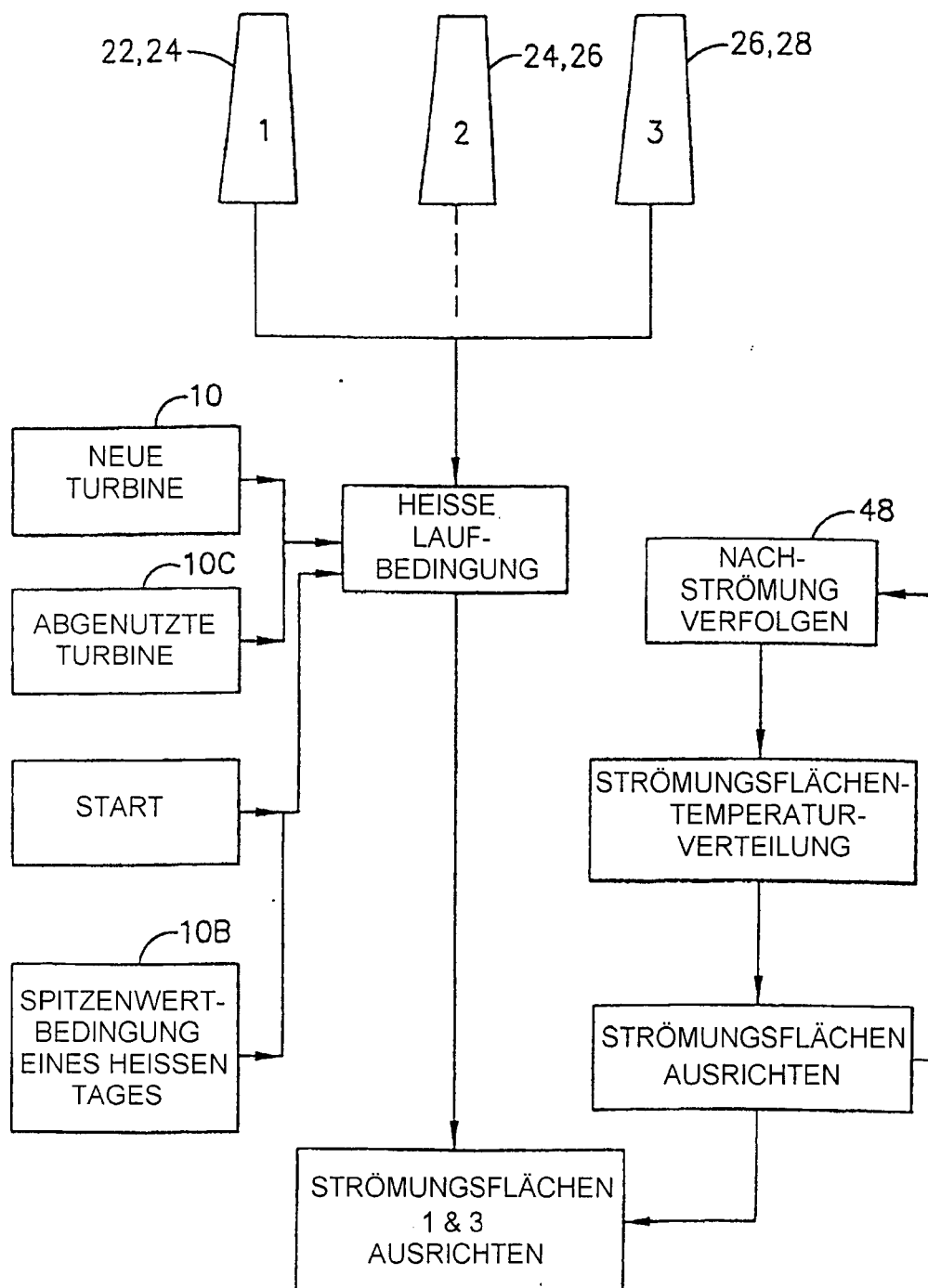


FIG. 7