



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11) **EP 1 101 901 A1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
23.05.2001 Patentblatt 2001/21

(51) Int Cl.7: **F01D 5/18**

(21) Anmeldenummer: **99122757.0**

(22) Anmeldetag: **16.11.1999**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
**AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU
MC NL PT SE**
Benannte Erstreckungsstaaten:
AL LT LV MK RO SI

(71) Anmelder: **SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT
80333 München (DE)**

(72) Erfinder:
• **Liebe, Roland, Dr.
40789 Monheim (DE)**
• **Walz, Günther, Dr.
45473 Mülheim (DE)**
• **Hoell, Harald
63607 Wächtersbach (DE)**

(54) **Turbinenschaufel sowie Verfahren zur Herstellung einer Turbinenschaufel**

(57) Um eine Turbinenschaufel (1), die eine einen Hohlraum umgebende Außenwand (4) hat, der von einem kühlfliuid (6) durchströmt ist, zu erhalten, wobei sie eine verlängerte Lebensdauer auch unter sehr hohen Belastungen besitzt und mit geringem Aufwand herzustellen ist, wird vorgeschlagen, daß die Dicke (8) der Au-

ßenwand (4) zumindest über einen Umfang des Schaufelblattbereichs (7) so eingestellt ist, daß zumindest an vorbestimmten Stellen der Außenwand (4) vorbestimmte Temperaturschwellenwerte (T_M) und/oder vorbestimmte Temperaturgradienten (ΔT_M) nicht überschritten werden.

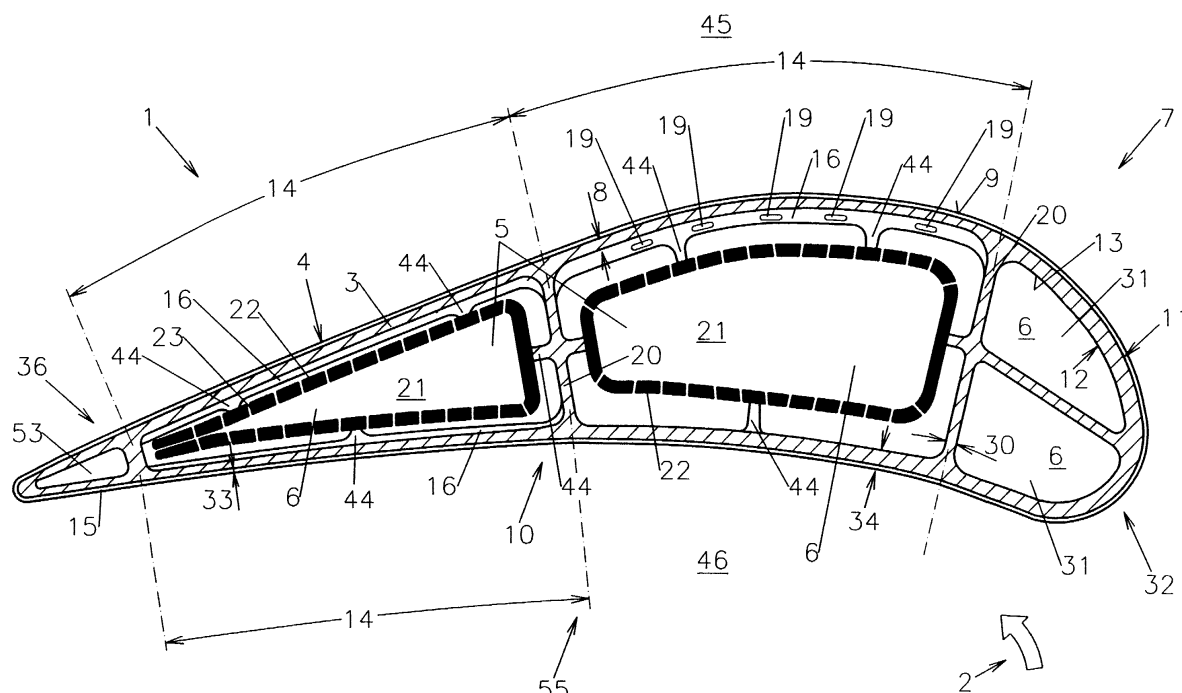


Fig.1

EP 1 101 901 A1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Turbinenschaufel, insbesondere Gasturbinenschaufel, die eine von einem heißen Aktionsfluid angeströmte Außenwand hat, die einen gegebenenfalls mehrteiligen Hohlraum umgibt, der von einem Kühlfluid durchströmt ist, wobei die Außenwand über den Umfang des Schaufelblattbereichs in einem Querschnitt durch den Schaufelblattbereich der Turbinenschaufel unterschiedlich dick ist, sowie ein Verfahren zur Herstellung einer gegossenen Turbinenschaufel, insbesondere Gasturbinenschaufel, nach dem Oberbegriff von Anspruch 27.

[0002] Zur Erzielung hoher Wirkungsgrade und Leistungen beim Betrieb einer mit einem Aktionsfluid, insbesondere einem heißen Gas, betriebenen Turbine, insbesondere einer Gasturbine, wird das Aktionsfluid auf eine hohe Temperatur aufgeheizt. Die vom heißen Aktionsfluid zuerst angeströmten Leit- und Laufschaufeln werden deshalb zur Vermeidung von Schädigungen intern gekühlt, insbesondere mittels Durchströmung eines Kühlfluids, beispielsweise eines Kühlgases oder eines leicht überhitzten Kühleampfes.

[0003] US-Patent 5,320,483 offenbart, wie das Kühlfluid in Form von Kühleampf in einem geschlossenen Kreislauf in die Turbinenschaufel eingeleitet wird und nach dem Durchströmen eines mit verschiedenen Strömungskammern und Innenwänden ausgestatteten, innenliegenden Hohlraums der Turbinenschaufel wieder herausgeführt wird. Der Hohlraum ist von der Außenwand der Turbinenschaufel umgeben, die von dem heißen Aktionsfluid der Turbine angeströmt ist. Die Außenwand weist eine im wesentlichen konstante Dicke über eine Betrachtung eines Querschnitts durch den Schaufelblattbereich auf. Trotz der Ausbildung von komplexen und recht aufwendig herzustellenden Kanälen und Turbulaturen innerhalb des Hohlraums der Turbinenschaufel ist es bei dieser Art der Ausbildung einer Turbinenschaufel jedoch nicht gewährleistet, daß die Kühlung überall homogen und in dem erforderlichen Maße stattfindet, was die Lebensdauer der Schaufel stark herabsetzt.

[0004] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, eine innengekühlte Turbinenschaufel mit den oben genannten Merkmalen anzugeben, die eine gegenüber üblichen Turbinenschaufeln verlängerte Lebensdauer auch unter sehr hohen Belastungen besitzt, mit geringem Aufwand herzustellen ist, sowie in einer Turbine hohe Leistungs- und Wirkungsgrade bei niedrigen NO_x-Emissionen ermöglicht sowie - als Unteraufgabe - ein hierfür geeignetes Herstellungsverfahren.

[0005] Die auf die Turbinenschaufel gerichtete Aufgabe wird dadurch gelöst, daß die Dicke der Außenwand zumindest über einen Teilumfang des Schaufelblattbereichs nach Maßgabe des Verlaufs der externen Wärmeübergangszahl an der Außenseite der Außenwand und des Verlaufs der internen Wärmeübergangszahl an der Innenseite der Außenwand kontinuierlich so ver-

läuft, daß vorbestimmte Temperaturschwellenwerte an der Außenwand und/oder vorbestimmte Temperaturgradienten zwischen vorbestimmten Stellen der Außenwand nicht überschritten werden.

[0006] Die Außenwand der Turbinenschaufel wird durch das heiße Aktionsfluid nicht überall gleich schnell und gleich stark umströmt, was zu lokal stark unterschiedlichen Wärmeeinträgen beziehungsweise Wärmeübergängen Aktionsfluid/Außenwand führt. Ein Maß für diesen Wärmeübergang ist die externe Wärmeübergangszahl. Eine Wärmeübergangszahl gibt die Wärmemenge an, die pro Zeit- und Flächeneinheit übergeht. Je höher die Wärmeübergangszahl, desto größer ist der Wärmeübergang der beispielsweise durch Konvektion oder Strahlung in das Material eingebrachten Wärme. Mit einem erhöhten externen Wärmeübergang steigt die Kühlanforderung an dieser Stelle des Schaufelblatts.

[0007] Dieser lokal erhöhten Kühlanforderung wird erfindungsmäßig dadurch begegnet, daß die Dicke der Metallwand und somit der Außenwand an Stellen mit einer hohen externen Wärmeübergangszahl herabgesetzt wird. Dies ergibt sich unter Einbeziehung der Lösung eines Gleichungssystems, das die Wärmeübertragung innerhalb der verschiedenen Bereiche des Turbinenschaufelblatts beschreibt. Die Wärmeübertragung umfaßt einerseits den Wärmeübergang vom heißen Aktionsfluid auf die Außenseite der Außenwand und von der Innenseite der Außenwand auf das Kühlfluid. Weiterhin wird in dem Gleichungssystem die Wärmeleitung innerhalb der Außenwand beschrieben. Eine dünnere Außenwand erhöht die Wärmeleitung. Als Randbedingungen für die Lösung des Gleichungssystems werden die Temperaturschwellenwerte, die Temperaturgradienten gesetzt. Sie sind charakteristisch für die Außenwand und stellen im wesentlichen eine obere Begrenzung für die Aktionsfluidtemperaturen dar. Eine Einhaltung dieser Werte stellt sicher, daß keine Temperaturen an der Schaufel überschritten werden, die zu lokalen Schäden und letztendlich zum frühen Versagen der Turbinenschaufel führen könnten. Der Temperaturschwellenwert entspricht in der Regel einer Oxidationsgrenze des Außenwandmaterials, der Temperaturgradient ist eine Maß für aufgrund unterschiedlicher Temperaturen zwischen zwei Stellen der Außenwand entstehende thermische Spannungen. Zur Gewährleistung einer langen Lebensdauer der Turbinenschaufel darf er einen kritischen Wert, der von dem Werkstoff, der Zusammensetzung aller beteiligten Spannungen und vom Betriebs-Lastkollektiv abhängt, nicht übersteigen.

[0008] Die Lösung des Gleichungssystems verdeutlicht, daß eine dünnere Ausbildung der Außenwand in einer Art dynamischem Gleichgewicht das Temperaturniveau und die anliegenden Temperaturgradienten herabsetzt. Prinzipiell führt somit eine dünnere Ausbildung der Außenwand zu einer verbesserten Kühlwirkung aufgrund der erhöhten Wärmeableitung durch das Schaufelaußenwandmaterial. Dies unterliegt jedoch noch den Anforderungen an die Stabilität, die der Dicke

der Außenwand eine untere Grenze setzen. Bei geschickter Ausbildung des Innenraums, beispielsweise durch das Einsetzen von Rippen, wie unten beschrieben, wird diese untere Grenze noch ein wenig zu geringeren Dicken hin verschoben.

[0009] Durch eine lokale Variation der Dicke kann somit den lokal erhöhten Kühlanforderungen an Stellen mit hohen externen Wärmeübergangszahlen auf einfache Art und Weise begegnet werden. An Stellen niedriger externer Wärmeübergangszahl kann die Außenwand sogar dicker ausgeführt werden, was die Stabilität erhöht. Aufgrund der durch die Einstellung der Außenwanddicke erreichten, individuell angepaßten Kühlwirkung kann auf kompliziert ausgebildete Kanäle innerhalb des Hohlraums verzichtet werden. Dies vereinfacht die Herstellung der Turbinenschaufel und senkt die Kosten. Darüber hinaus wird der benötigte Kühlfliuidmassenstrom durch die angepaßte Kühlung gesenkt, was den Wirkungsgrad und die Leistung der Turbine verbessert.

[0010] Vorteilhaft ist es, wenn die Außenwand mehrschichtig aufgebaut ist und außen an der Außenwand eine dünne keramische Schutzschicht und innen eine Metallwand aufweist und daß derjenige Temperaturgradient maßgeblich ist, der zwischen der Außenseite und der Innenseite der Metallwand anliegt. Durch den mehrschichtigen Aufbau kann die Außenwand bei geeigneter Wahl der Schichten verschiedenartige Aufgaben und Anforderungen erfüllen. Die Metallwand, insbesondere aus einer hochwarmfesten Metallegierung, gewährleistet neben einer ausreichenden mechanischen Festigkeit und guter Wärmeelastizität, was aufgrund der wechselnden mechanischen Belastungen und Temperaturen notwendig ist. Eine keramische Schutzschicht schützt die Metallwand vor zu hohen Temperaturbelastungen bzw. verhindert eine Oxidation bzw. Korrosion. Die Schutzschicht soll unter anderem verhindern, daß die durch das Anströmen durch das heiße Aktionsfluid an der Schaufelaußenwand verursachte höchste Temperatur einen werkstoffspezifischen Maximalwert übersteigt, beziehungsweise ein sich einstellender Temperaturgradient zwischen der Außenseite der Außenwand und der Innenseite der Außenwand einen bestimmten kritischen Wert übersteigt. Übliche Hochleistungsschaufeln sind auf ausreichend dicke keramische Schutzschichten zur Wärmedämmung angewiesen, damit Temperatur- und Spannungsgrenzen einhaltbar sind. Durch die hohen Belastungen während des Betriebs der Turbine, insbesondere durch schnelle Temperaturwechsel beziehungsweise große Spannungsunterschiede zwischen verschiedenen Bereichen der Außenwand und aufgrund der bereits im kalten Zustand vorhandenen Gitterparameterunterschiede zwischen der keramischen Schutzschicht und der Metallwand und unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten platzen keramische Wärmedämmschichten vorzeitig von der Metallwand ab. Hieran schließt sich dann ein Versagen der Schaufel an. Dies wird erfindungsgemäß da-

durch verhindert, daß die Dicke der Metallwand nach Maßgabe der Wärmeübergangskoeffizienten eingestellt ist und der Temperaturschwellenwert und der Temperaturgradient zwischen der Außenseite und der Innenseite der Metallwand vorbestimmte Werte nicht übersteigen. Diese Werte sind nach den entsprechenden Anforderungen der Schutzschicht bzw. der Grenzschicht zwischen Schutzschicht und Metallwand ausgelegt. Somit reicht es, eine im Vergleich zu üblichen Schutzschichtdicken sehr viel dünnere Schutzschicht auf die Metallwand aufzubringen. Die dünnere Ausbildung der Schicht verbessert zusätzlich die Haftung der Schutzschicht auf der Schaufeloberfläche und verhindert ein lokales Abplatzen, weil sich die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungen der Materialien aufgrund der geringen Schichtdicke nicht mehr so stark auswirken. Zugleich ist diese dünne Schicht wesentlich einfacher aufzubringen, unter anderem auch deshalb, weil an sie geringere Anforderungen bezüglich der Homogenität gestellt werden müssen. Dies verringert die Herstellungskosten und erhöht zugleich die Lebensdauer der Schaufel.

[0011] Wenn der Temperaturschwellenwert an der gesamten Außenwand und/oder vorbestimmte Temperaturgradienten über der gesamten Außenwand nicht überschritten werden, sind besonders gute Bedingungen für eine geringe thermische oder spannungsmäßige Belastung einer Turbinenschaufel gegeben. Dies ist besonders bei beschichteten Turbinenschaufeln wichtig. Durch eine gleichmäßigere, niedrigere Temperatur der Außenwand aufgrund der erfindungsgemäßen Einstellung der Dicke der Außenwand ist eine gute Haftung der keramischen Schutzschicht auf der Metallwand gewährleistet, ohne daß weitere fertigungstechnische Maßnahmen ergriffen werden müßten oder die Heißgastemperatur gesenkt werden müßte, was den Wirkungsgrad herabsetzen würde.

[0012] Aus thermischen Gründen ist es möglich, die keramische Schutzschicht vollständig wegzulassen, wenn der Temperaturschwellenwert und der Temperaturgradient kritischen werkstoffabhängigen Werten entsprechen. Eine eventuelle Schutzschicht dient in diesem Fall im wesentlichen noch zur Verhinderung von Korrosions- bzw. Oxydationsangriffen und kann somit zumindest dünner als übliche keramische Schutzschichten ausgebildet sein. Dies verringert die Herstellungskosten und erhöht die Lebensdauer der Schaufel.

[0013] Vorteilhaft ist es dann insbesondere, wenn die Außenwand einschichtig ist und aus Metall besteht. Das Metall ist auch bei relativ hohen Temperaturen noch stabil und leitet zugleich die Wärme gut ab, so daß durch die Kühlung im Inneren und die angepaßten Dicken der Außenwand die Temperaturschwellenwerte und die Temperaturgradienten eingehalten werden können.

[0014] Um insbesondere bei dünnen Metallwandabschnitten erhöhten Spannungen in der Außenwand, beispielsweise durch aufgrund eines hohen Innendrucks erhöhten Primärspannungen, zu begegnen, wird vorge-

schlagen, daß im Hohlraum ein Feld aus Rippen dort vorgesehen ist, wo ein Außenwandbereich geringerer Dicke vorliegt. Auf diese Weise werden dünnere Bereiche der Außenwand so gestärkt, daß sie annähernd dieselbe Stabilität aufweisen, wie dickere Bereiche. Hierdurch läßt sich eine homogene Beanspruchung der Turbinenschaufelaußenwand und eine gleichmäßige Werkstoffausnutzung erzielen. Durch die homogene Spannungs- und Dehnungsverteilung wird eine bessere Langzeithaftung der keramischen Schutzschicht auf dem Grundmaterial erreicht, was zu einer Verlängerung der Schaufellebensdauer führt. Durch die Begrenzung der innendruckbedingten Primärspannungen durch Anbringen von wanddickenabhängigen Rippenfeldern im Hohlraum sowie Begrenzung der Wärmespannungen durch Einhaltung eines Grenzwerts für den Temperaturgradienten wird eine Schädigung des Werkstoffs durch zu hohe Zyklenzahlen der sich einstellenden gesamten von Mises-Vergleichsspannung, die die Primärspannung, die Wärmespannung sowie weitere Spannungen umfaßt, zuverlässig verhindert. Bei Leit- und Laufschaufeln erfolgt die Berechnung der thermischen Leitwerte, d.h. der Dickenvariation in etwa gleich. Für die Auslegung der Rippenfelder ist bei Laufschaufeln zu berücksichtigen, daß noch fliehkraftbedingte Spannungen hinzukommen, sowie zusätzliche Sekundärströmungen.

[0015] Diese vorgenannten Vorteile werden insbesondere dadurch erreicht, daß die Rippen des Felds nach Maßgabe der Dicke der Außenwand, des Temperaturschwellenwerts und/oder des Temperaturgradienten und/oder der von Mises-Vergleichsspannung vorbestimmte Maße, Abstände und räumliche Anordnungen aufweisen. Eine optimale Parameterkombination ermöglicht in weiten Bereichen eine Einhaltung der Temperaturzielgrößen, so daß eine homogene Beanspruchung des Materials und eine gleichmäßige Werkstoffausnutzung erzielt werden kann. Eine Begrenzung der Wärmespannungen erfolgt im wesentlichen bereits durch die Einhaltung des vorbestimmten Temperaturgradienten durch Einstellung der Dicke der Metallwand und somit der Außenwand. Die Begrenzung der Primärspannung erfolgt durch die angebrachten wanddickenabhängigen Rippenfelder auf der Innenseite der Außenwand. Werden vorbestimmte Abstände zwischen den Rippen eingehalten, kann somit einerseits eine optimale Kühlwirkung, zugleich jedoch auch eine optimale Stabilität des Materials erreicht werden. Weitere Parameter sind die Höhe und die Breite der Rippen, sowie ihre räumliche Anordnung. Durch eine bestimmte Anordnung von Rippen in Rippenfeldern ist es möglich, dünne und zugleich haltbare Außenwände für eine optimale thermische Wandauslegung mit oder auch ohne keramische Schutzschichten herzustellen. Diese Maßnahmen können in der Regel sowohl für Leit- wie auch für Laufschaufeln eingesetzt werden.

[0016] Wenn insbesondere das Feld der Rippen zumindest abschnittsweise quer zur Strömung des Kühlfluids verläuft, wird die Turbulenz des Kühlfluids erhöht,

was die Kühlwirkung verbessert, ohne daß zusätzliche Turbulatoren eingesetzt werden müßten. Durch die quer zur Stömungsrichtung des Kühlfluids angeordneten Rippenfelder wird gerade in den Bereichen mit dünner Wandstärke, wo eine höhere interne Wärmeübergangszahl benötigt wird, eine erwünschte höhere Kühlwirkung erreicht. Zur Erzielung der gewünschten Verwirbelung ist darauf zu achten, daß die Rippen weder zu eng noch zu weit voneinander beabstandet angeordnet werden, weil sonst entweder keine ausreichende Verwirbelung oder eine zu geringe Stabilität erzielt werden.

[0017] Weisen die Rippen Queröffnungen auf, wird das Kühlfluid bei dem Durchströmen des Innenraums turbulenter. Dies verbessert wiederum die Kühlwirkung. Die Öffnungen sind so ausgelegt, daß sie die Stabilität der Rippen nicht beeinflussen.

[0018] Es ist vorteilhaft, wenn der Hohlraum von der Druckseite zur Saugseite in Längsrichtung der Turbinenschaufel von Innenwänden durchzogen ist, wobei die Innenwände an die druckseitige bzw. saugseitige Außenwand unter kontinuierlichem Verlauf an den kontinuierlichen Verlauf der Dicke der Außenwand angeschlossen sind. Durch die Einteilung des Hohlraums von der Druckseite zur Saugseite wird sichergestellt, daß die Stabilität der Turbinenschaufel erhalten bleibt bzw. verbessert wird. Zugleich wird der Hohlraum in mehrere Kammern aufgeteilt. Die Form und Anzahl der hierzu eingesetzten Innenwände wird je nach Kühlungsart und Kühlfluideigenschaften so gewählt, daß ein möglichst einfacher Aufbau des Hohlraums resultiert. Dies bedeutet, daß eine kostengünstige, herkömmliche Feingußtechnik angewandt werden kann. Wenn die Innenwände an die druckseitige bzw. saugseitige Außenwand unter kontinuierlichem Verlauf an den kontinuierlichen Verlauf der Dicke der Außenwand angeschlossen sind, werden Spannungsspitzen in der Außenwand werden reduziert. Die Innenwände verstärken die Außenwandbereiche und fangen somit Spannungen auf, die durch eine sich verändernde Dicke, und unterschiedlichen Temperaturen in der Außenwand und damit unterschiedlichen Wärmetransport entstehen. Darüber hinaus wird berücksichtigt, daß sich überall ein optimales Geschwindigkeitsniveau des Kühlfluids und somit eine optimale interne Wärmeübergangszahl ergibt. Durch die Aufteilung des Hohlraums treten lediglich geringe Druckverluste auf. Es ist deshalb ein hoher Anteil an Energie aus dem erwärmten Kühlfluid rückgewinnbar.

[0019] Eine zusätzliche Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit ist dadurch gegeben, daß der Hohlraum mit einer Aluminisierungsschicht versehen ist, insbesondere die dampfbenetzten Innenflächen.

[0020] Der Wirkungsgrad der Turbine wird durch das Kühlfluid kaum bzw. lediglich minimal verringert, wenn das Kühlfluid in einem geschlossenen Kreislauf durch die Turbinenschaufel geführt wird. Die Führung in einem Kreislauf kann auch weitere Turbinenschaufeln umfassen, wodurch zusätzlich Kühlfluid eingespart wird. Dadurch, daß keine abkühlende Mischung durch in das Ak-

tionsfluid austretendes Kühlfluid entsteht, bleibt der Wirkungsgrad und damit die Leistung der Turbine erhalten. Es wird kein Kühlfluid verbraucht, was die Betriebskosten der Turbine senkt. Die vom Kühlfluid innerhalb der Turbinenschaufel aufgenommene Wärme kann weitgehend wiederverwendet werden. Dies verbessert die Energieausnutzung und erhöht den Wirkungsgrad.

[0021] Eine vorteilhafte räumliche Anordnung des Hohlraums der Turbinenschaufel wird dadurch unterstützt, daß der Einlaß und der Auslaß des Kühlfluids im Fußbereich angeordnet sind. Vom Fußbereich aus wird das Kühlfluid dann in die verschiedenen anderen Kühlbereiche geleitet. Der Fußbereich ist für Zuleitungen des Kühlfluids leichter zugänglich.

[0022] Eine sparsame Verwendung des Kühlfluids ist dadurch gegeben, daß der Kopf- und Fußbereich der Turbinenschaufel zugleich mit dem Kühlfluid des Schaufelblattbereichs gekühlt wird. Hierdurch ist der Aufbau des Kopf-, Fuß- und Schaufelblattbereichs und insbesondere der Übergänge zwischen den Bereichen vereinfacht.

[0023] Eine genauere Anpassung an die wirklich benötigte Kühlung ist dadurch gegeben, daß die Turbinenschaufel eine Laufschaufel ist und die Wanddicke von Kühlkammern im Hohlraum nach Maßgabe einer lokalen Wärmeübergangszahl lokal variiert. Durch die Rotationsbewegung der Laufschaufel wird das Kühlfluid in manchen Bereichen der Kühlkammern stärker gegen die Innenwände bzw. gegen die Außenwände gepreßt. Dies verursacht einen inhomogenen internen Wärmeübergangskoeffizienten. Dies wird durch die Änderung der Wanddicken der Innenwände bzw. der Außenwand erfindungsgemäß wieder ausgeglichen. Durch die Anpassung der Wanddicken wird lediglich die unbedingt benötigte Materialmenge eingesetzt und zugleich ein genauer angepaßter Kühlmittelverbrauch erreicht. Hierdurch wird der Wirkungsgrad der Turbine erhöht und zugleich eine in allen Bereichen der Schaufel ausreichende Kühlung sichergestellt.

[0024] Vorteilhaft ist es, wenn im Mittelbereich des Schaufelblattbereichs von Innenwänden gebildete Mittelkühlkammern vorgesehen sind, die seriell vom Kühlfluid durchströmt sind. Die Mittelkühlkanäle befinden sich in dem mit am stärksten durch hohen Wärmeeintrag belasteten Bereichen der Turbinenschaufel. Sie tragen somit einen großen Anteil der eingetragenen Wärme in sich. Die serielle Durchströmung gewährleistet einen langen, mäanderförmigen Weg des Kühlfluids durch die Turbinenschaufel und somit eine gute Ausnutzung der Wärmekapazität des Kühlfluids. Insbesondere an Umlenkstellen wird das Kühlfluid stark verwirbelt und somit die Kühlwirkung verbessert. Die benötigte Kühlfluidmenge wird reduziert.

[0025] Ein schnelles Fließen des Kühlfluids und damit ein verbesserter Wärmeabtransport ist dadurch gegeben, daß im Mittelbereich des Schaufelblattbereichs von Innenwänden gebildete Mittelkühlkammern vorgesehen sind, die parallel vom Kühlfluid durchströmt sind.

Zugleich ist hierdurch der Aufbau des Hohlraums in dem sich die Kühlkammern befinden, vereinfacht und somit ein ausschlußärmerer Guß bei der Herstellung ermöglicht.

[0026] Die Strömungsgeschwindigkeit des Kühlfluids kurz vor dem Aufprall auf die Außenwand wird erhöht, wenn zumindest eine der Mittelkühlkammern einen Prallkühleinsatz mit nach außen gerichteten Prallkühlbohrungen aufweist, die mit Abstand von der Innenseite der Außenwand angeordnet und die vom Kühlfluid durchströmt sind. Durch die erhöhte Strömungsgeschwindigkeit des auf die Innenseite der Außenwand auflaufenden Kühlfluids wird die Kühlwirkung deutlich verbessert. Hierdurch ist es möglich, auch mittels eines Kühlmittels mit niedrigem Druck eine gute Kühlwirkung zu erzielen, ohne die Außenwand durch hohe Primärspannungen durch den Innendruck zu belasten.

[0027] Eine einfache, sichere und kostengünstige Art der Halterung des Prallkühleinsatzes ist gegeben, wenn der Prallkühleinsatz von auf der Innenseite der Außenwand und/oder von auf der Innenwand und/oder von auf Rippen angebrachten Abstandshaltern gehalten ist.

[0028] Eine weitere Verbesserung der Kühlung ist dadurch gegeben, daß an der Hinterkante der Turbinenschaufel eine Zusatzkühlung vorhanden ist. Dies ist besonders vorteilhaft, weil dort Außenwände enger zusammenlaufen und somit eine Verbindung zu den übrigen Kühlkammern häufig schwierig ist.

[0029] Insbesondere handelt es sich dabei um eine separate, geschlossene Dampfkühlung.

[0030] Wenn an der Hinterkante der Turbinenschaufel alternativ eine offene Luftkühlung mit freiem Austritt vorhanden ist wird keine Rückleitung mehr benötigt. Die eingesetzte Luft wird frei in den Aktionsfluidraum eingeleitet. Da es sich nur um eine relativ geringe Menge Kühlluft handelt, wird der Wirkungsgrad der Turbine hierdurch wenig gemindert.

[0031] Zur Erzielung einer höheren internen Wärmeübergangszahl ist es vorteilhaft, wenn das Kühlfluid Dampf ist. Die knappe, für niedrige Schadstoffemissionen bei pulsationsfreiem Betrieb benötigte Verdichtungsleistung muß nicht eingesetzt werden. Eine geschlossene Luftkühlung benötigt sehr viel Luft und bewirkt hohe Druckverluste. Bei Verwendung von Dampf als Kühlfluid sind gegenüber Luft 1,5 bis dreifach höhere interne Wärmeübergangszahlen erzielbar. Der Einsatz von Dampf ermöglicht somit den Betrieb der Turbine mit einem heißeren Aktionsfluid, was wiederum den Wirkungsgrad heraufsetzt. Wenn Kühlluft in das Aktionsfluid eingeleitet wird, entstehen hohe Wirkungsgradverluste. Bei Beibehaltung der Temperatur des Aktionsfluids ist es durch den Einsatz von Kühleddampf möglich, die Turbinenschaufelaußenwand dicker auszubilden, was die Stabilität der Schaufel erhöht und die Anforderungen an die Rippenfelder herabsetzt. Es sind auch Lösungen ohne Rippenfelder möglich. Kühleddampf besitzt gegenüber Luft zugleich noch eine höhere Wärmekapazität, was zu einem verbesserten Wärmeabtransport

aus der Turbinenschaufel führt.

[0032] Bei Einsatz eines Niederdruckdampfes ist eine Ausgestaltung des Hohlraums mit wenigen Kühlkammern im Blattbereich möglich. Dieser Niederdruckdampf ist gekennzeichnet durch einen Eintrittsdruck von 15 bar oder eine Eintrittstemperatur von ungefähr 250°C. Durch den niedrigen Druck ist die Belastung der Außenwand durch innendruckbedingte Primärspannungen vermindert und es werden weniger Rippen zur Stabilisierung der Außenwand benötigt. Der Innenraum kann beispielsweise so ausgestaltet sein, daß zwei von einer Innenwand gebildete Kühlkammern seriell von Kühlfluid durchströmt sind. Vorteilhafterweise befindet sich zumindest in einer der Kühlkammern ein Prallkühleinsatz, der Prallkühlbohrungen aufweist, die vom Kühlfluid durchströmt sind, und der von auf der Innenseite der Außenwand und/oder auf der Innenwand und/oder auf einigen der Rippen angebrachten Stegen gehalten wird. Durch den Einsatz von Prallkühlbohrungen wird der Kühleffekt lokal stark beschleunigt und somit seine Kühlwirkung erhöht. Die Beschleunigung erfolgt durch die Prallkühlbohrungen auf die Innenseite der Außenwand, und erhöht somit die interne Wärmeübergangszahl.

[0033] Besonders gute Kühleigenschaften hat der Dampf, wenn er ein Mitteldruckdampf ist. Mitteldruckdampf ist gekennzeichnet durch Eintrittsdaten von ungefähr 30 bar Druck und 350°C Eintrittstemperatur. Zugleich ist der Innendruckspannungspegel noch nicht sehr hoch, so daß die entstehenden Spannungen noch beherrschbar sind. Der Mitteldruckdampf ist in modernen GUD-Kraftwerken direkt verfügbar und muß nicht unter Energieverlust zusätzlich bereitgestellt werden. Durch den höheren Dampfdruck entstehen gegenüber einem Niederdruckdampf höhere Wärmeübergangszahlen und ein besserer Wärmetransport. Unter Gewährleistung gleichbleibender Kühlwirkung ist die Wanddicke der Turbinenschaufel somit dicker ausbildbar, wodurch die Stabilität der Turbinenschaufel erhöht wird und die Wand den durch den hohen Druck des Mitteldruckdampfes erhöhten Primärspannungen besser standhält. Zudem weist der Hohlraum bei Verwendung eines Mitteldruckkühldampfes lediglich Kühlkammern auf. Auf Prallkühleinsätze kann verzichtet werden. Dies vereinfacht die Herstellung und reduziert die Kosten.

[0034] Die Außenkontur der Turbinenschaufel entspricht vorteilhaft dem Verlauf einer aerodynamisch vorgegebenen Form, wobei die Dicke der Außenwand zum Hohlraum hin variiert. Die Form weist somit den Vorteil der Einhaltung der Temperaturschwellenwerte auf und weicht zugleich von ihrer äußeren Form nicht von den üblichen Profilen ab, so daß die Turbinenschaufel in üblichen Turbinen eingesetzt werden kann und die bereits bekannten Strömungseigenschaften aufweist.

[0035] Die auf das Verfahren zur Herstellung bezogene Unteraufgabe wird dadurch gelöst, daß die Gußform so angeordnet wird, daß der Profilverlauf der Außenkontur des Gußkerns der Differenz zwischen einem ae-

rodynamisch vorgegebenen, insbesondere äußeren Profilverlauf eines Turbinenschaufelblatts und einer Funktion entspricht, die nach Maßgabe des Verlaufs der externen Wärmeübergangszahl an der Außenseite der Außenwand der Turbinenschaufel und des Verlaufs der internen Wärmeübergangszahl an der Innenseite der Außenwand der Turbinenschaufel kontinuierlich so verläuft, daß zumindest an vorbestimmten Stellen der Außenwand vorbestimmte Temperaturschwellenwerte und/oder vorbestimmte Temperaturgradienten zwischen vorbestimmten Stellen der Außenwand nicht überschritten werden. Insbesondere entspricht der äußere Profilverlauf dabei einem genormten Profilverlauf.

[0036] Es wird also lediglich ein Gußkern eingesetzt, dessen Außenwölbung bzw. Geometrie mit der variablen Dicke der Außenwand sowie u.U. mit den Geometrien zugehöriger Rippenfelder entsprechend relativ zu einer umgebenden Gußform bzw. Außenkontur veränderlich ist. Dieser Gußkern ist kompakt, besitzt eine einfach herzustellende Form, die leicht abgestützt werden kann und keinen exzessiv engen Toleranzanforderungen unterliegt. Damit sind sowohl konventionelle Feingußverfahren, als auch Verfahren mit gerichteter Erstarrung oder Einkristallerstarrung ohne Mehrkosten durchführbar. Die Turbinenschaufel kann in ihrem Schaufelblattbereich einstückig gegossen werden. Der Ausschuß beim Guß ist durch die einfache Form vermindert. Durch die Außenwölbungen wird die Außenwand des Gußprodukts der Turbinenschaufel unterschiedlich dick ausgebildet, wobei im wesentlichen keine Nachbearbeitung nötig ist. Durch die einfache Maßnahme der unterschiedlich dick ausgebildeten Außenwände können Temperaturgrenzwerte eingehalten werden, ohne daß aufwendige Beschichtungen vorgenommen werden müßten, die zudem leicht wieder abplatzen.

[0037] Sowohl für Niederdruck- wie auch für Mitteldruckdampfkonstruktionen kommen gängige, ausschußarme Verfahren zum Einsatz, da die minimalen Außenwanddicken mit annähernd 1 bis 2 mm im Vergleich zu sonst üblichen Außenwanddicken von dampfgekühlten Turbinenschaufeln fast doppelt so groß sind und die Gußtoleranzen bei annähernd 0,15 mm liegen, was in einem für übliche Gußverfahren problemlosen Bereich liegt. Dies vereinfacht die Herstellung und verringert die Herstellungskosten beträchtlich.

[0038] Die Erfindung wird anhand der in den Figuren dargestellten Ausführungsbeispiele näher erläutert.

[0039] Es zeigen:

Fig.1 einen Querschnitt durch eine niederdruckdampfgekühlte Turbinenschaufel mit variierender Außenwanddicke,
Fig.2 eine schematische Ausschnittsvergrößerung der Außenwand zur Darstellung des Wärmeübertragungsmechanismus in der Außenwand,
Fig.3 einen schematischen Schnitt durch einen Schaufelblattbereich und einen Fußbereich einer niederdruckdampfgekühlten Turbinenschaufel

von Fig. 1,
 Fig. 4 ein Fließschema des Kùhldampfes durch eine niederdruckdampfgekùhlte Turbinenleitschaukel im Längsschnitt von Fig. 1,
 Fig. 5 einen Schnitt durch ein Rippenfeld,
 Fig. 6 Queröffnungen der Rippen,
 Fig. 7 einen Querschnitt durch eine mitteldruckdampfgekùhlte Turbinenleitschaukel,
 Fig. 8 einen schematischen Schnitt durch einen Schaufelblattbereich und einen Fußbereich einer mitteldruckdampfgekùhlten Turbinenleitschaukel von Fig. 7,
 Fig. 9 ein Fließschema des Kùhldampfes einer niederdruckdampfgekùhlten Turbinenleitschaukel im Längsschnitt von Fig. 7,
 Fig. 10 ein Fließschema mit Fließwiderständen der Schaufel,
 Fig. 11 einen schematischen Schnitt durch eine mitteldruckdampfgekùhlte Turbinenleitschaukel und
 Fig. 12 ein Fließschema der Turbinenleitschaukel von Fig. 11.

[0040] Fig. 1 zeigt einen Querschnitt durch einen Schaufelblattbereich 7 einer niederdruckdampfgekùhlten Turbinenleitschaukel 1 mit variierender Außenwanddicke 34. Die Turbinenschaukel 1 wird an der Außenseite 9 der Außenwand 4 von einem heißen Aktionsfluid 2, insbesondere einem Heißgas angeströmt. Zur Kühlung ist die Turbinenschaukel 1 in ihrem innenliegenden, im allgemeinen mehrteiligen Hohlraum 5, der von der Außenwand 4 umgeben ist, von einem Kùhldampf 6, nämlich einem Niederdruckkùhldampf, durchströmt. Der Hohlraum 5 ist in Längsrichtung der Turbinenschaukel 1 von Innenwänden 20 durchzogen, welche das Schaufelprofil in Richtung von der Druckseite 46 zur Saugseite 45 so durchziehen, daß mehrere Mittelkùhlkammern 21 entstehen, in diesem Fall zwei, wobei die Innenwände 20 an die druckseitige bzw. saugseitige Außenwand 4 unter kontinuierlichem Verlauf an den kontinuierlichen Verlauf der Dicke 34 der Außenwand 4 angeschlossen sind. Die Mittelkùhlkammern 21 weisen Prallkùhlbohrungen 23 durchbrochen sind. Der Niederdruckkùhldampf wird durch die Prallkùhlbohrungen 23 hindurchgepreßt und auf die Innenseite 13 der Außenwand 4 zu beschleunigt. Durch den schnellen Aufprall wird die Innenseite 13 der Außenwand 4 dann gleichmäßig intensiv gekùhlt. Im Anströmkantenbereich 32 weist der Hohlraum 5 zwei Vorderkùhlkammern 31 auf, durch die ebenfalls Kùhldampf hindurchströmt und die Innenseite 13 der Außenwand 4 gekùhlt wird. Die Kühlung erfolgt hier konvektiv.

[0041] Die Außenwand 4 ist gegebenenfalls mehrschichtig aufgebaut und weist eine Metallwand 3, außen bedarfsweise eine keramische Schutzschicht 15 und innenliegend eine Aluminiumlegierungsschicht 54 auf, wie in Fig. 2 dargestellt. Die Metallwand 3, besitzt entlang eines Querschnitts durch den Schaufelblattbereich

7 unterschiedliche Dicken 8. Die Dicke 8 der Metallwand 3 variiert kontinuierlich, d.h. ohne Sprünge bzw. stetig um keine Spannungsspitzen hervorzurufen, nach Maßgabe der externen Wärmeübergangszahl W_{ex} an der Außenseite 9 der Außenwand 4. Die Dicke 33 der keramischen Schutzschicht 15 ist annähernd konstant. Die Dicke 34 der Außenwand 4 variiert also ebenfalls mit der Dicke 8 der Metallwand 3. Die externe Wärmeübergangszahl W_{ex} ist durch die Größe des Wärmeübergangs vom Heißgas 2 in die Außenwand 4 gegeben. Das Prinzip der Wärmeübertragung durch die Außenwand 4 ist in Fig. 2 verdeutlicht. Der externe Wärmeübergang erfolgt mit einer lokal unterschiedlichen, durch die externe Wärmeübergangszahl W_{ex} angegebenen Größe, woran die Dicke 8 der Metallwand 3 bzw. die Dicke 34 der Außenwand 4 angepaßt ist.

[0042] Die Dicke 34 der Außenwand 4 bzw. der Dicke 8 der Metallwand 3 ist erfindungsgemäß zudem auch nach Maßgabe der internen Wärmeübergangszahl W_{int} an der Innenseite 13 der Außenwand 4 eingestellt. Auf die interne Wärmeübergangszahl W_{int} haben die Art und die physikalischen Parameter des Kühlfluids 6 einen entscheidenden Einfluß. Auch durch den Aufbau des Hohlraums 5 an der Innenseite 13 der Außenwand 4, beispielsweise durch Rippen 16, kann die interne Wärmeübergangszahl W_{int} verändert werden.

[0043] Der Hohlraum 5 weist Rippen 16 in den Bereichen 14 der Außenwand 4 auf, die besonders dünn sind oder die besonders starken Belastungen unterworfen sind und somit stabilisiert werden müssen. Rippen 16 sind beispielsweise auf beiden Innenseiten 13 der Außenwand 4 einer mit Prallkùhleinsätzen 22 versehenen Mittelkùhlkammer 21 quer zur Strömung 18 des Kühlfluids 6 verlaufend angebracht. Die mittlere Mittelkùhlkammer 21 weist lediglich auf der Innenseite 13 der Außenwand 4 an der Saugseite 45 der Turbinenleitschaukel 1 Rippen 16 auf, an der Druckseite 46 hingegen nur Abstandshalter 44, die den Prallkùhleinsatz 22 in Position halten. An einigen der Rippen 16 sind ebenfalls Abstandshalter 44 für die Positionierung des Prallkùhleinsatzes 22 vorhanden.

[0044] Die Rippen 16 weisen vorbestimmte Maße auf, wie die Dicke 37, die Höhe 41, ihren Fußradius 39, ihren Kopfradius 40, ihre mittragende Breite 38 sowie räumliche Anordnungen, die besonders geeignet sind, zur Verwirbelung der Kühlfluidströmung 18 beizutragen beziehungsweise eine ausreichende Kühlfläche an der Innenseite 13 der Außenwand 4 zu liefern. Eine Darstellung findet sich in Fig. 5 bzw. 6. Eine gute Verwirbelung ist insbesondere dann gegeben, wenn die Rippen 16, die in Rippenfeldern angeordnet sind, die quer zur Strömungsrichtung 18 des Kühlfluids 6 liegen.

[0045] Die Dicke 8 der Metallwand 3 bzw. die Dicke 34 der Außenwand 4 bewegt sich zwischen annähernd 0,6 mm bis 1,0 mm im Hinterkantenbereich 36 bis zu annähernd 2 mm im Druckbereich 46. Die Änderungen zwischen den einzelnen Dickenbereichen, die durch Innenwände 20 abgegrenzt sind, weisen zur Verminde-

zung von Spannungsspitzen kontinuierliche Übergänge 10 auf, berechnet beispielsweise mittels einer linearen Interpolation zwischen den unterschiedlichen Solldicken.

[0046] Fig.2 zeigt schematisch die Wärmeübertragung von einem Aktionsfluid 2 auf eine Kühlfluid 6 über eine Außenwand 4 und ein schematisches Profil der Temperatur T. Die Außenwand 4 der Dicke 34 ist mehrschichtig aufgebaut. Sie weist eine außenliegende keramische Schutzschicht 15 der Dicke 33, eine tragende Metallwand 3 der Dicke 8 auf. Im Hohlraum 5 und insbesondere an der Innenseite 13 der Außenwand 4 ist optional eine Aluminisierungsschicht 54 gegen Korrosion vorgesehen. Die Beschichtung 54 kann sehr dünn ausgebildet sein. Ist die Beschichtung 54 nicht angebracht, liegt die Innenseite 13 der Außenwand 4 gleich mit der Innenseite 12 der Metallwand.

[0047] Das außen anströmende heiße Aktionsfluid 2 besitzt eine gegenüber der Außenwand 4 erhöhte Temperatur T. An der Außenseite 9 der keramischen Schutzschicht 15 findet ein Wärmeübergang auf die Außenwand 4 statt. Der externe Wärmeübergang ist gekennzeichnet durch die externe Wärmeübergangszahl W_{ex} , deren Größe angibt, wie stark Wärme auf die Außenwand 4 übergeht. Der lokale Wärmeübergang zwischen Aktionsfluid 2 und der Außenwand 4 weist für verschiedene Außenwandabschnitte 14 des Schaufelblattbereichs 7 der Turbinenschaufel 1 verschiedene externe Wärmeübergangskoeffizienten W_{ex} auf und somit unterschiedliche Dicken 8 der Metallwand 3.

[0048] Nach Eintritt der Wärme in die Außenwand 4 erfolgt zunächst eine Wärmeleitung durch die keramische Schutzschicht 15 und daraufhin durch die Metallwand 3. Die Wärmeleitung der keramischen Schutzschicht 15 ist anders als die der Metallwand 3. Somit weist der Temperaturverlauf T am Übergang von der Innenseite 35 der keramischen Schutzschicht 15 auf die Außenseite 11 der Metallwand 3 eine Unstetigkeit auf. An der Innenseite 12 der Metallwand 3, die in diesem Fall mit der Innenseite 13 der Außenwand 4 übereinstimmt, tritt die Wärme aus der Außenwand 4 aus, was durch den internen Wärmeübergangskoeffizienten W_{int} beschrieben wird. An der Innenseite 13 nimmt das innen vorbeiströmende Kühlfluid 6 die Wärme mit. Der Temperaturverlauf T zeigt in diesem Bereich einen starken Abfall.

[0049] In dem Bereich des Übergangs von der keramischen Schutzschicht 15 auf die Metallwand 3 ist ein Temperaturschwellenwert T_M definiert, der charakteristisch für die Temperaturbeständigkeit der Außenwandmaterials ist, u.a. für die Haftqualität der keramischen Schutzschicht 15 auf der Metallwand 3. Zwischen der maximaler Metalltemperatur $\leq T_M$ und der Temperatur an der Innenseite 12 der Metallwand 3 ist ein Temperaturgradient ΔT_M definiert. Er ist ein Maß für Temperaturunterschiede und somit auch für die Spannungsbelastung der Außenwand 4. Durch die erfindungsgemäße Einstellung der Dicke 8 der Metallwand 3 wird erreicht,

daß zumindest an vorbestimmten Stellen der Außenwand 4 vorbestimmte Temperaturschwellenwerte T_M und/oder vorbestimmte Temperaturgradienten ΔT_M zwischen der Außenseite 11 der Metallwand 3 und der Innenseite 12 der Metallwand 3, also vorbestimmten Stellen der Außenwand 4, nicht überschritten werden. Dies stellt sicher, daß die Außenwand 4 der Turbinenschaufel 1 nicht übermäßig belastet wird, die keramische Schutzschicht 15 besser auf der Metallwand 3 haftet, keine Oxidation auftritt und somit ein dauerhafter Einsatz der Turbinenschaufel 1 möglich ist. Für eine Ziellebensdauer der Schaufel von mindestens 25000 äquivalenten Betriebsstunden oder zirka 1000 Normallastzyklen gilt für aktuelle Schaufelwerkstoffe bzw. Betriebs-Lastkollektive, daß der vorbestimmte Temperaturschwellenwert T_M bei annähernd 930 °C bis 950 °C liegt und der vorbestimmte Temperaturgradient ΔT_M bei annähernd 200 bis 220 °C bzw. bei annähernd 260 bis 290 °C über der Metallwanddicke 8 beträgt.

[0050] Fig.3 zeigt eine Aufsicht auf den Fußbereich 26 einer Turbinenschaufel entsprechend Fig.1. Der Fußbereich 26 weist einen Einlaß 27 und einen Auslaß 28 für das Kühlfluid 6 auf. Schematisch ist die Lage des Schaufelblattbereichs 7 relativ zum Fußbereich 26 der Turbinenschaufel 1 angedeutet. Das Kühlfluid 6 durchströmt die Turbinenschaufel 1 in Mittelkühlkammern 21 mit Prallkühleinsätzen 22 und konvektiv in Vorderkühlkammern 31 im Anströmkantenbereich 32. An der Hinterkante 36 der Turbinenschaufel 1 ist eine Zusatzkühlung 56 vorgesehen, bei der es sich vorzugsweise um eine separate, geschlossene Dampfkühlung handelt.

[0051] Fig.4 zeigt eine Seitenansicht mit einem Fließschema des Kühlfluids 6. Nach dem Einlaß 27 des Kühlfluids 6 in den Fußbereich 26 der Turbinenschaufel 1 durchströmt das Kühlfluid 6 in einem abgezweigten Kühlfluidteilstrom 47 den Hinterkantenbereich 36 der Turbinenschaufel 1. Ein anderer abgezweigter Kühlfluidteilstrom 48 durchströmt eine Vorderkühlkammer 31 im Anströmkantenbereich 32. Nach Verlassen des Schaufelblattbereichs 7 durchläuft das Kühlfluid 6 den Kopfbereich 25 der Turbinenschaufel 1. Daraufhin durchströmt es zunächst die auf der Saugseite 45 liegende Vorderkühlkammer 31 und nach einer Umleitung die auf der Druckseite liegende, benachbarte Vorderkühlkammer 31 bis zum Auslaß 28 im Fußbereich 26.

[0052] Ein weiterer, vom zugeführten Kühlfluid 6 abgezweigter Kühlfluidteilstrom 49 durchströmt eine erste Mittelkühlkammer 21, die einen Prallkühleinsatz 22 aufweist. Nach Durchgang durch den Kopfbereich 25 durchströmt das Kühlfluid 6 seriell die zweite Kühlkammer 21, die ebenfalls einen Prallkühleinsatz 22 aufweist, in umgekehrter Richtung wie die erste. Nach Erreichen des Fußbereichs 26 der Turbinenschaufel 1 werden die verschiedenen Ströme zusammengeleitet und durch den Auslaß 28 aus der Turbinenschaufel 1 entlassen. Das Kühlfluid 6 wird zugleich zum Durchströmen des Schaufelblattbereichs 7 und des Kopf- 25 und des Fußbereichs 26 benutzt. Es ist lediglich ein einziger ge-

schlossener Kreislauf für das Kühlfluid 6 notwendig, was die Handhabung vereinfacht und die Herstellungskosten verringert.

[0053] Der Kopf- 25 und der Fußbereich 26 sind mittels einfacher Schweiß- oder Lötverbindungen 24 an dem Schaufelblattbereich 7 der Turbinenschaufel 1 befestigt bzw. mit Abschlußplatten 17 verschlossen. Diese einfache Art der Befestigung ist aufgrund des einfachen Aufbaus des Hohlraums 5 möglich. In dem Kopf- 25 und Fußbereich 26 können zur Unterstützung der Kühlwirkung des Kühlfluids 6 Prallkühleinsätze 22 untergebracht sein, was nicht dargestellt ist.

[0054] Fig.5 zeigt in einem vergrößernden Schnitt schematisch Rippen 16, die zur Verstärkung der ausgedünnten Bereiche der Außenwand 4 eingesetzt sind. Die Aufsicht auf die Rippen 16 aus Fig.1 erfolgt in Querrichtung, so daß nur Rippen 16 quer zur Strömungsrichtung des Kühlfluids 6 sichtbar sind. Entlang einer Rippe 16 sind Rippenqueröffnungen 19 vorbestimmter Maße und Abstände angebracht, wie in Fig. 1 und Fig.7 dargestellt. Sie dienen dem Queraustausch und der zusätzlichen Verwirbelung des Kühlfluids 6, wodurch die Kühlwirkung des Kühlfluids 6 verbessert wird. Variiert werden kann hierbei beispielsweise die Höhe 42 der Rippenqueröffnungen 19 sowie ihr Abstand 52 vom Kopf 50 der Rippe 16, s. Fig.6, wie auch der Abstand 43 der Rippenqueröffnungen 19. Bei der Abstimmung des Rippenfeldes auf die Anforderungen aufgrund der eingestellten Dicke 34 der Außenwand 4 können die oben genannten Maße, Abstände und räumlichen Anordnungen in bestimmten Grenzen verändert werden. Die Grenzen sind einerseits dadurch bestimmt, daß eine gute Kühlung erhalten werden muß, andererseits soll eine ausreichende Stabilität der nach Maßgabe der Wärmeübergangszahlen lokal mit einer geringen Dicke ausgebildeten Außenwand 4 gegeben sein. Für letztere ist es notwendig, die Rippen 16 enger anzuordnen, andererseits dürfen sie nicht zu eng sein, so daß das Kühlfluid 6 nicht lediglich über sie hinwegströmt und möglicherweise nicht verwirbelt wird. Die Höhe 41 der Rippen 16 beträgt ungefähr das Ein- bis Zweifache der Außenwanddicke 34. Die mitttragende Breite 38 der Rippen 16 beträgt ungefähr das Vierfache der Dicke 34 der Außenwand 4. In den Bereichen der Anströmkante 32 befinden sich vorzugsweise keine Rippen beziehungsweise nur konventionelle Turbulatoren wie auch im Hinterkantenbereich 36.

[0055] Fig.6 zeigt eine beispielhafte Anordnung von Rippenqueröffnungen 19. Sie weisen eine längliche ovale Form auf. Sie bewirken einen Queraustausch und eine Verwirbelung der vorbeiströmenden Kühlfluids 6, wobei sie jedoch so beabstandet angeordnet sind, daß sie die Stabilität der Rippen 16 nicht beeinträchtigen, die zur Stabilisierung der dünnen Außenwandbereiche 14 dienen.

[0056] Fig.7 zeigt einen Schnitt durch einen Schaufelblattbereich 7 einer mitteldruckdampfgeköhlten Turbinenschaufel 1 mit variierender Außenwanddicke

34. Der von der Außenwand 4 umgebene Hohlraum 5 weist sechs Kühlkammern 21 auf, zwei Vorderkühlkammern 31 im Bereich der Anströmkante 32 sowie eine Hinterkühlkammern 53 im Hinterkantenbereich 36. Die sechs Mittelkühlkammern 21 sind durch Innenwände 20 voneinander getrennt. Die Mittelkühlkammern 21 weisen etwa gleiche Strömungsquerschnitte auf. Sie sind nach einem in Fig.3 dargestellten Fließschema seriell von dem Kühleampf 6 durchströmt. Die Wanddicke 8 der Metallwand 3 variiert über den Umfang von annähernd 1 bis 2,2 mm, nach demselben Prinzip, wie bereits bei der niederdruckdampfgeköhlten Turbinenschaufel beschrieben, d.h. zum Ausgleich der sich über der Querschnitt des Schaufelblatts 7 ändernden Wärmeübergangszahlen W_{ex} , W_{int} . Die Übergänge zwischen Bereichen 14 unterschiedlichen Wanddicken 8 sind jeweils kontinuierlich, entsprechend den Bereichen 10, ausgeführt, das heißt stetig, vorzugsweise linear oder mittels anderer Funktionen interpoliert.

[0057] Die Turbinenschaufel 1 weist an der gesamten Innenseite 13 der Außenwand 4, ausgenommen dem Hinterkantenbereich 36, Rippenfelder auf, die zur Unterstützung der ausgedünnten Außenwand 4 dienen. Der Mitteldruckdampf weist gegenüber dem Niederdruckdampf einen nahezu doppelt so großen Druck auf (annähernd 30 bar gegenüber annähernd 15 bar). Somit ist die Innendruckbelastung der Außenwand 4 wesentlich stärker und ein Hinzufügen von weiteren Rippenfeldern vonnöten. Vorteilhaft ist dabei jedoch, daß der Mitteldruckdampf einen verbesserten Wärmeabtransport und damit günstigere interne Wärmeübergangszahlen W_{int} gewährleistet. Die Rippen 16 weisen wiederum vorbestimmte Abstände und Dimensionen auf und sind mit Querströmungsöffnungen 19 ausgestattet. Die Rippen 16 liegen im wesentlichen quer zur Strömungsrichtung 18, die parallel zur radialen Achse des Schaufelblatts 7 erfolgt.

[0058] Der Kühlmassenfluß kann durch Hinzufügen oder Weglassen von Strömungswiderständen 51, die in Fig. 4 nur schematisch angedeutet sind, so eingestellt werden, daß ein gewünschter Kühlstrom und ein interner Wärmeübergang bzw. Wärmeübergangszahl W_{int} eintritt, der an die variierende Wanddicke 34 der Außenwand 4 angepaßt ist.

[0059] Fig.8 zeigt eine Aufsicht auf einen Fußbereich 26 einer mitteldruckdampfgeköhlten Turbinenschaufel aus Fig.7 mit einem Einlaß 27 und einem Auslaß 28 für das Kühlfluid 6.

[0060] Fig.9 zeigt einen Längsschnitt einer mitteldruckdampfgeköhlten Turbinenschaufel nach Fig.7 mit einem Fuß- 26, einem Schaufelblatt- 7 und einem Kopfbereich 25 und ein Fließschema des Mitteldruckkühldampfes. Die Mittelkühlkammern 21 werden seriell und die Vorder- 31 und die Hinterkühlkammer teilweise parallel vom Kühlfluid 6 durchströmt. Der Fuß- 26 und der Kopfbereich 25 sind an den Schaufelblattbereich 7 angeschweißt oder angelötet. Sie werden durch einen geschlossenen Kreislauf mit demselben Kühlfluid 6 ge-

kühlt wie der Schaufelblattbereich 7. Dies verringert die benötigte Kühlmittelmenge und vereinfacht den Aufbau des Hohlraums 5 beziehungsweise der Innenräume des Kopf- 25 und Fußbereichs 26.

[0061] Fig.10 zeigt eine Schemazeichnung des Kühlmittelflusses durch eine mitteldruckdampfgeköhlte Turbinenschaufel aus Fig.7. In dem Einlaßbereich 27 können verschiedene Strömungswiderstände 51 in unterschiedliche Kühlkammern 21 gelegt werden, so daß der Teilmassenströme des Kühlfluids 6 eingestellt werden können. Ein vergrößerter Massenstrom bewirkt eine vergrößerte Kühlwirkung, aber auch erhöhte Druckverluste.

[0062] Fig.11 zeigt eine Schemazeichnung einer mitteldruckdampfgeköhlten Turbinenschaufel. Der Hohlraum 5 weist fünf Mittelkühlkammern 21, der vordere Bereich 32 zwei Vorderkühlkammern 31 und der hintere Bereich 36 eine Hinterkühlkammer 53 auf. Die Mittelkühlkammern 21 haben etwa gleiche Strömungsquerschnitte, die Wanddicke 8 der Außenwand 4 ist nahezu konstant. Aufgrund der ausreichenden Versteifung durch die Innenwände 20 sind keine Rippen 16 notwendig.

[0063] Fig.12 zeigt ein Fließschema der Turbinenschaufel aus Fig. 11.

Patentansprüche

1. Turbinenschaufel (1), insbesondere Gasturbinenschaufel, die eine von einem heißen Aktionsfluid (2) angeströmte Außenwand (4) hat, die einen gegebenenfalls mehrteiligen Hohlraum (5) umgibt, der von einem Kühlfluid (6) durchströmt ist, wobei die Außenwand (4) über den Umfang des Schaufelblattbereichs (7) der Turbinenschaufel (1) unterschiedlich dick ist,
dadurch gekennzeichnet, daß die Dicke (34) der Außenwand (4) zumindest über einen Teilumfang des Schaufelblattbereichs (7) nach Maßgabe des Verlaufs der externen Wärmeübergangszahl (W_{ex}) an der Außenseite (9) der Außenwand (4) und des Verlaufs der internen Wärmeübergangszahl (W_{int}) an der Innenseite (13) der Außenwand (4) kontinuierlich so verläuft, daß vorbestimmte Temperaturschwellenwerte (T_M) an der Außenwand (4) und/oder vorbestimmte Temperaturgradienten (ΔT_M) über der Außenwand (4) zwischen vorbestimmten Stellen der Außenwand (4) nicht überschritten werden.
2. Turbinenschaufel nach Anspruch 1
dadurch gekennzeichnet, daß die Außenwand (4) mehrschichtig aufgebaut ist und außen an der Außenwand (4) eine dünne keramische Schutzschicht (15) und innen eine Metallwand (3) aufweist und daß derjenige Temperaturgradient (ΔT_M) maßgeblich ist, der zwischen der Außenseite (11) und der

Innenseite (12) der Metallwand (3) anliegt.

3. Turbinenschaufel nach einem der Ansprüche 1 bis 3
dadurch gekennzeichnet, daß der Temperaturschwellenwert (T_M) an der gesamten Außenwand (4) und/oder vorbestimmte Temperaturgradienten (ΔT_M) über der gesamten Außenwand (4) nicht überschritten werden.
4. Turbinenschaufel nach einem der Ansprüche 1 bis 4
dadurch gekennzeichnet, daß der Temperaturschwellenwert (T_M) und der Temperaturgradient (ΔT_M) kritischen, werkstoff- und spannungsabhängigen Werten entsprechen.
5. Turbinenschaufel nach Anspruch 3 oder 4
dadurch gekennzeichnet, daß die Außenwand einschichtig ist und aus Metall besteht.
6. Turbinenschaufel nach einem der Ansprüche 1 bis 5,
dadurch gekennzeichnet, daß im Hohlraum (5) ein Feld aus Rippen (16) dort vorgesehen ist, wo ein Außenwandbereich (14) geringerer Dicke (34) vorliegt.
7. Turbinenschaufel nach Anspruch 6
dadurch gekennzeichnet, daß die Rippen (16) des Felds nach Maßgabe der Dicke (34) der Außenwand (4), des Temperaturschwellenwerts (T_M) und/oder des Temperaturgradienten (ΔT_M) und der von Mises-Vergleichsspannung vorbestimmte Maße, Abstände und räumliche Anordnungen aufweisen.
8. Turbinenschaufel nach Anspruch 6 oder 7,
dadurch gekennzeichnet, daß das Feld der Rippen (16) zumindest abschnittsweise quer zur Strömung (18) des Kühlfluids (6) verläuft.
9. Turbinenschaufel nach einem der Ansprüche 6 bis 8,
dadurch gekennzeichnet, daß die Rippen (16) Queröffnungen (19) aufweisen.
10. Turbinenschaufel nach einem der Ansprüche 1 bis 9,
dadurch gekennzeichnet, daß der Hohlraum (5) von der Druckseite (46) zur Saugseite (45) in Längsrichtung der Turbinenschaufel (1) von Innenwänden (20) durchzogen ist, wobei die Innenwände (20) an die druckseitige bzw. saugseitige Außenwand (4) unter kontinuierlichem Verlauf an den kontinuierlichen Verlauf der Dicke (34) der Außenwand (4) angeschlossen sind.
11. Turbinenschaufel nach einem der Ansprüche 1 bis

- 10,
dadurch gekennzeichnet, daß der Hohlraum (5) mit einer Aluminisierungsschicht (54) versehen ist.
12. Turbinenschaufel nach einem der Ansprüche 1 bis 11,
dadurch gekennzeichnet, daß das Kühlfluid (6) in einem geschlossenen Kreislauf durch die Turbinenschaufel (1) geführt wird.
13. Turbinenschaufel nach einem der Ansprüche 1 bis 12,
dadurch gekennzeichnet, daß der Einlaß (27) und der Auslaß (28) des Kühlfluids (6) im Fußbereich (26) angeordnet sind.
14. Turbinenschaufel nach einem der Ansprüche 1 bis 13,
dadurch gekennzeichnet, daß der Kopf- (25) und Fußbereich (26) der Turbinenschaufel (1) zugleich mit dem Kühlfluid (6) des Schaufelblattbereichs (7) gekühlt wird.
15. Turbinenschaufel nach einem der Ansprüche 1 bis 14,
dadurch gekennzeichnet, daß die Turbinenschaufel (1) eine Laufschaufel ist und die Wanddicken (30) der Innenwände (20) im Hohlraum (5) nach Maßgabe einer lokalen Wärmeübergangszahl lokal variieren.
16. Turbinenschaufel nach einem der Ansprüche 1 bis 15,
dadurch gekennzeichnet, daß im Mittelbereich (55) des Schaufelblattbereichs (7) von Innenwänden (20) gebildete Mittelkühlkammern (21) vorgesehen sind, die seriell vom Kühlfluid (6) durchströmt sind.
17. Turbinenschaufel nach einem der Ansprüche 1 bis 15,
dadurch gekennzeichnet, daß im Mittelbereich (55) des Schaufelblattbereichs (7) von Innenwänden (20) gebildete Mittelkühlkammern (21) vorgesehen sind, die parallel vom Kühlfluid (6) durchströmt sind.
18. Turbinenschaufel nach Anspruch 16 oder 17,
dadurch gekennzeichnet, daß zumindest eine der Mittelkühlkammern (21) einen Prallkühleinsatz (22) mit nach außen gerichteten Prallkühlbohrungen (23) aufweist, die mit Abstand von der Innenseite (13) der Außenwand (4) angeordnet und die vom Kühlfluid (6) durchströmt sind.
19. Turbinenschaufel nach Anspruch 18,
dadurch gekennzeichnet, daß der Prallkühleinsatz (22) von auf der Innenseite (13) der Außenwand (4) und/oder von auf der Innenwand (20) und/oder von auf Rippen (16) angebrachten Abstandshaltern (44) gehalten ist.
20. Turbinenschaufel nach einem der Ansprüche 1 bis 19,
dadurch gekennzeichnet, daß an der Hinterkante (36) der Turbinenschaufel (1) eine Zusatzkühlung (56) vorhanden ist.
21. Turbinenschaufel nach Anspruch 20,
dadurch gekennzeichnet, daß die Zusatzkühlung (56) eine separate, geschlossene Dampfkühlung ist.
22. Turbinenschaufel nach Anspruch 20
dadurch gekennzeichnet, daß die Zusatzkühlung (56) eine Luftkühlung mit freiem Austritt ist.
23. Turbinenschaufel nach einem der Ansprüche 1 bis 22,
dadurch gekennzeichnet, daß das Kühlfluid (6) Dampf ist.
24. Turbinenschaufel nach Anspruch 23
dadurch gekennzeichnet, daß der Dampf ein Niederdruckdampf ist.
25. Turbinenschaufel nach Anspruch 23
dadurch gekennzeichnet, daß der Dampf ein Mitteldruckdampf ist.
26. Turbinenschaufel nach einem der Ansprüche 1 bis 25,
dadurch gekennzeichnet, daß die Außenkontur der Turbinenschaufel (1) dem Verlauf einer aerodynamisch vorgegebenen Form entspricht und daß die Dicke (34) der Außenwand (4) zum Hohlraum (5) hin variiert.
27. Verfahren zur Herstellung einer Turbinenschaufel, insbesondere einer Gasturbinenschaufel, mit einer Außenwand (4), die entlang eines Querschnitts durch den Schaufelblattbereich (7) der Turbinenschaufel (1) unterschiedlich dick ist, und mit den weiteren Merkmalen eines der Ansprüche 1 bis 26, wobei das Verfahren ein Gußverfahren umfaßt, bei dem eine Gußform verwendet wird, die einen Gußkern enthält, zur Herstellung einer Turbinenschaufel nach den Merkmalen eines der Ansprüche 1 bis 26,
dadurch gekennzeichnet, daß die Gußform so angeordnet wird, daß der Profilverlauf der Außenkontur des Gußkerns der Differenz zwischen einem aerodynamisch vorgegebenen äußeren Profilverlauf eines Turbinenschaufelblatts (7) und einer Funktion entspricht, die nach Maßgabe des Verlaufs der externen Wärmeübergangszahl (W_{ex}) an der Außen-

seite (9) der Außenwand (4) der Turbinenschaufel (1) und des Verlaufs der internen Wärmeübergangszahl (W_{int}) an der Innenseite (13) der Außenwand (4) der Turbinenschaufel (1) kontinuierlich so verläuft, daß zumindest an vorbestimmten Stellen der Außenwand (4) vorbestimmte Temperaturschwellenwerte (T_M) und/oder vorbestimmte Temperaturgradienten (ΔT_M) nicht überschritten werden.

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

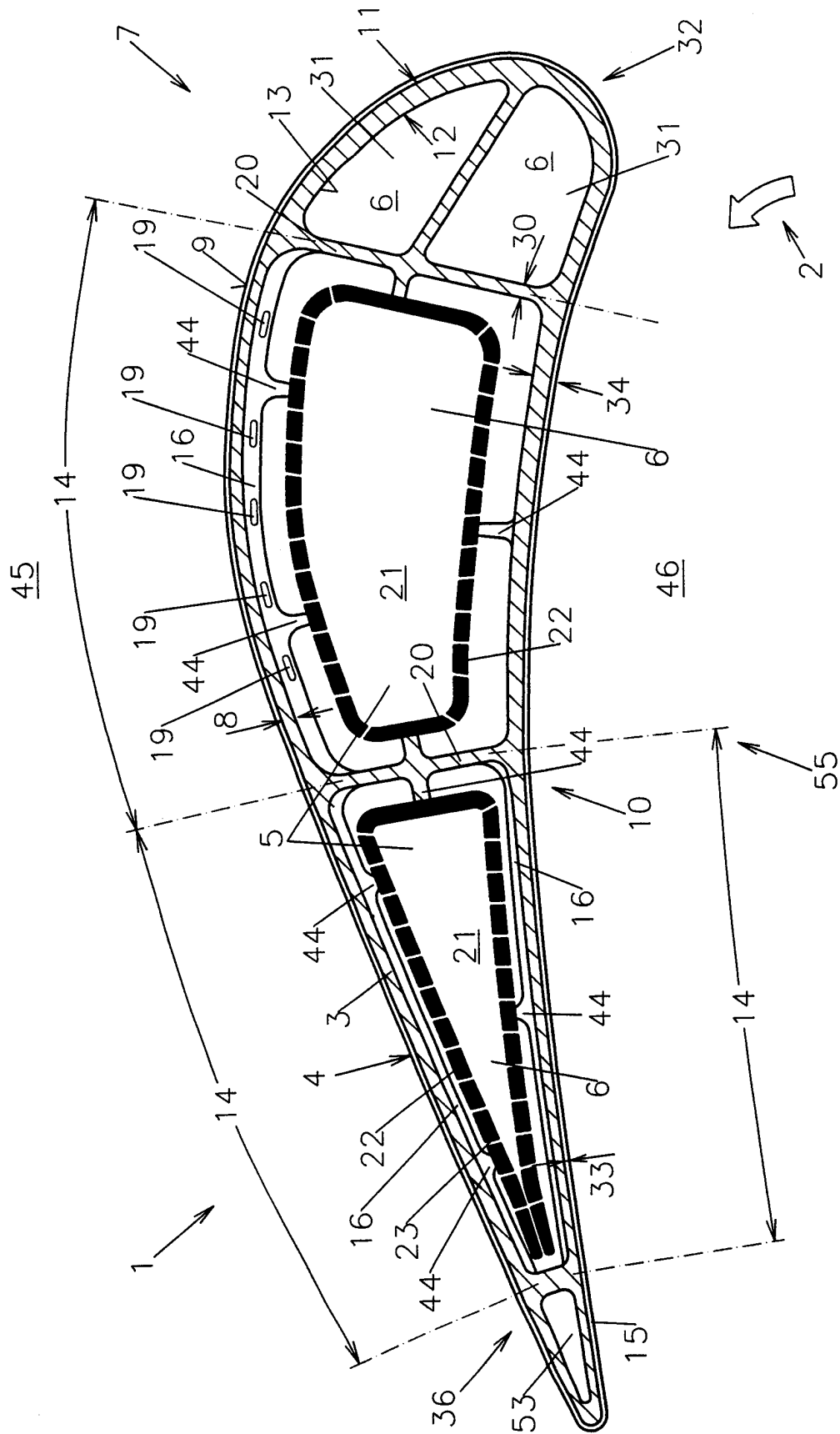


Fig.1

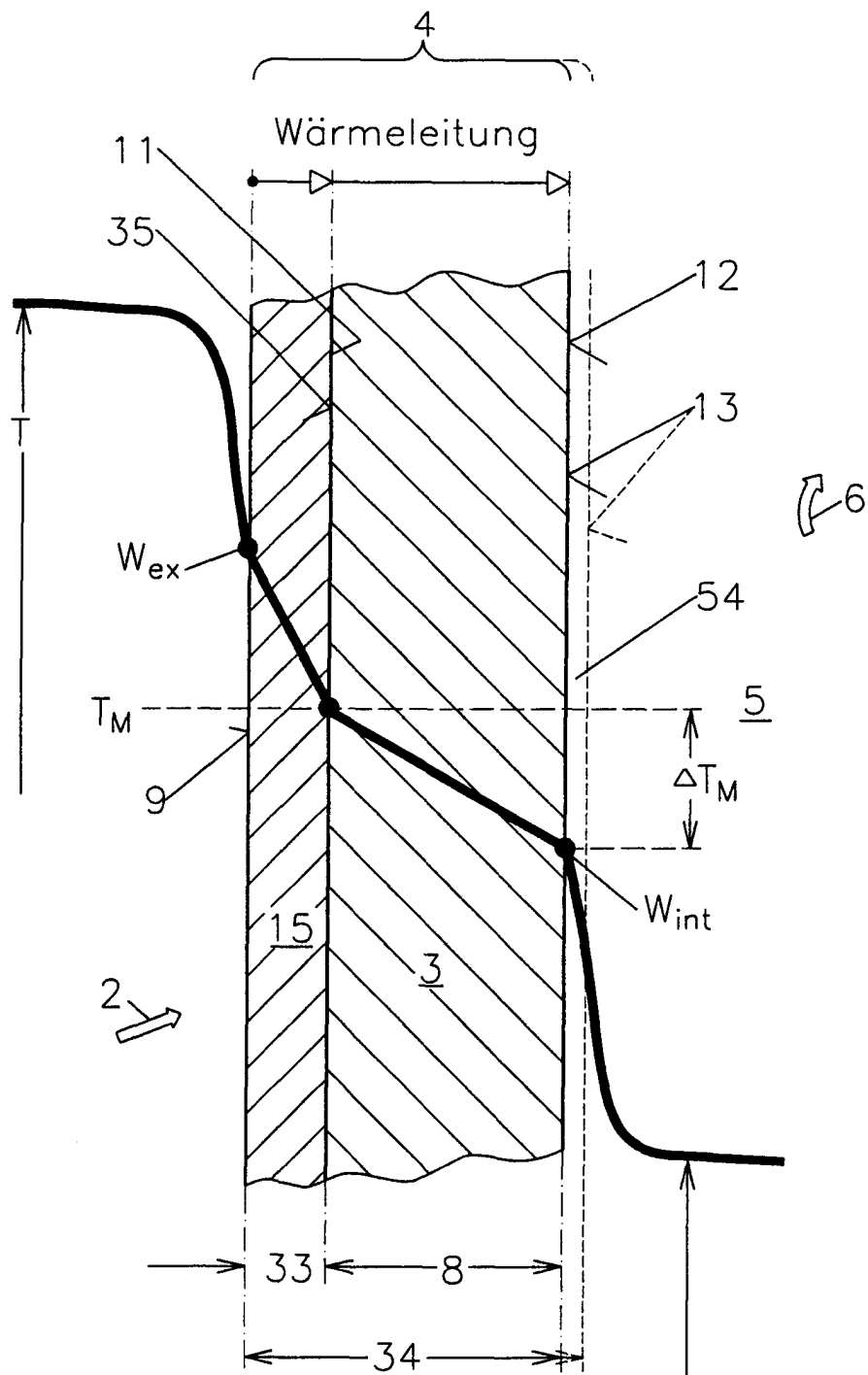


Fig.2

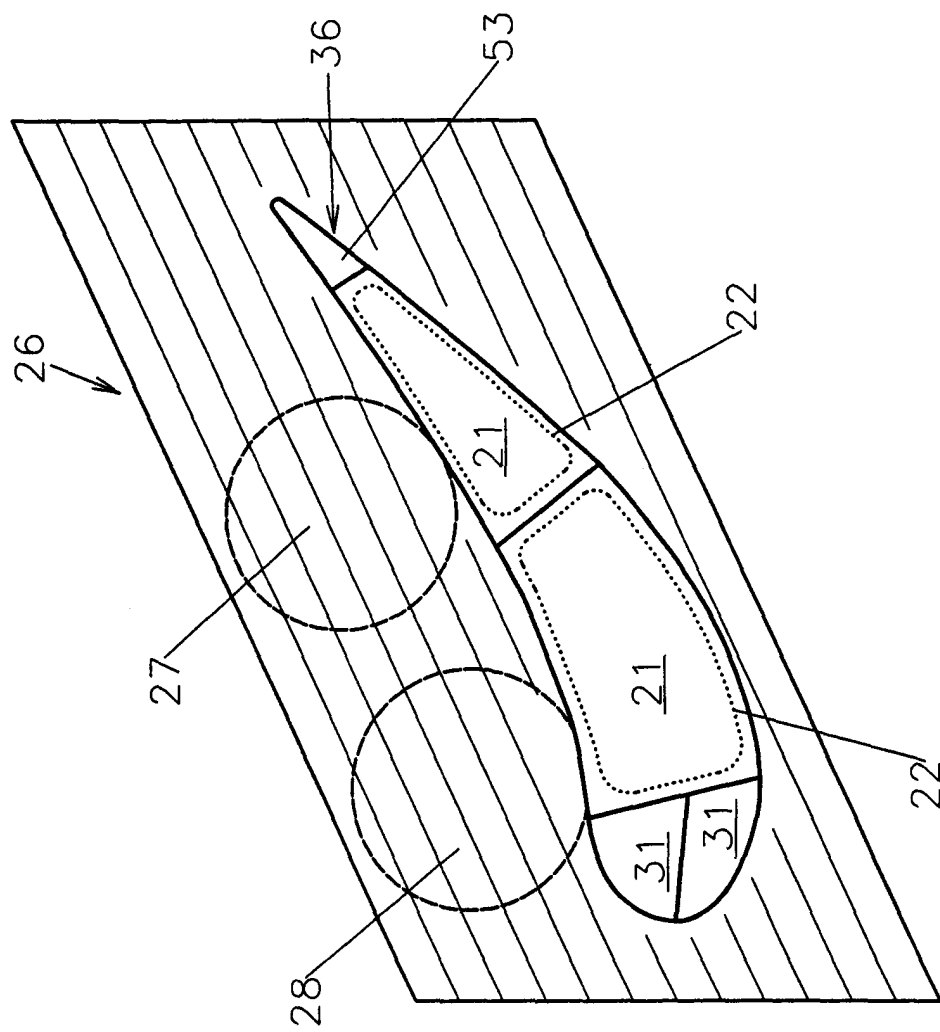


Fig. 3

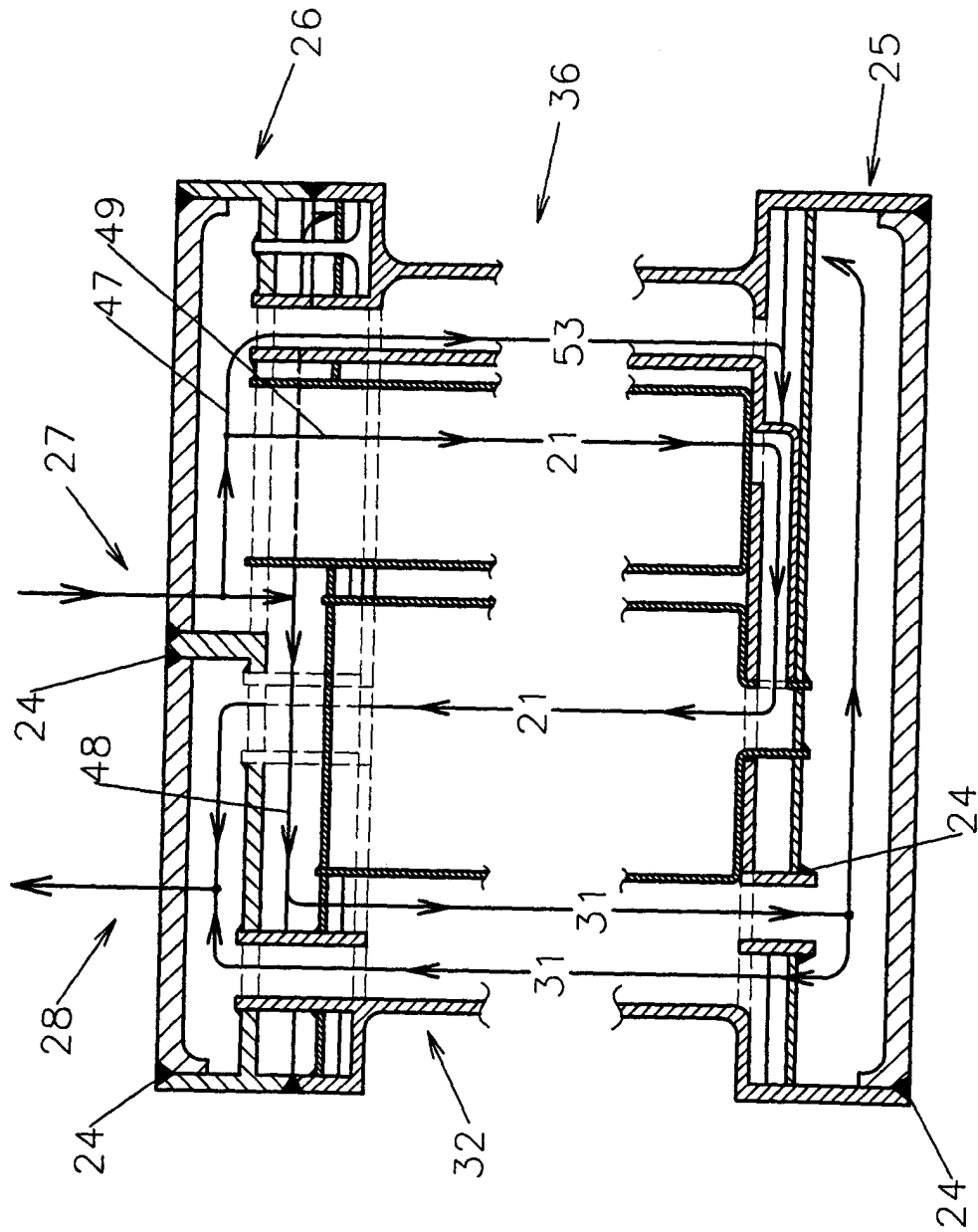


Fig.4

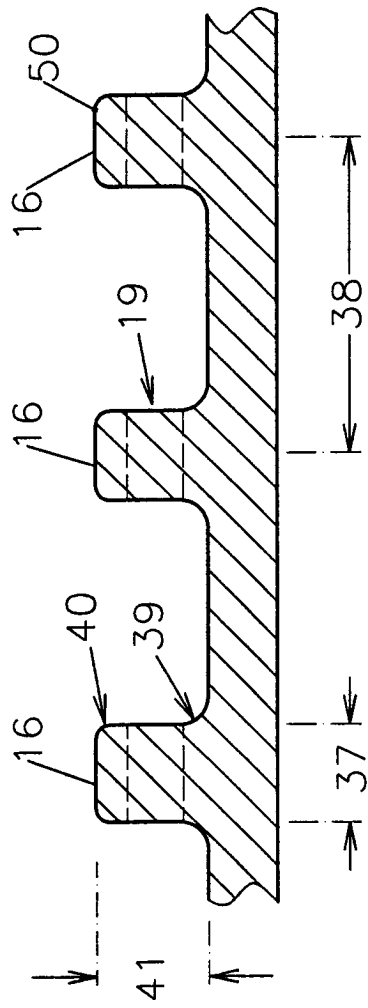


Fig. 5

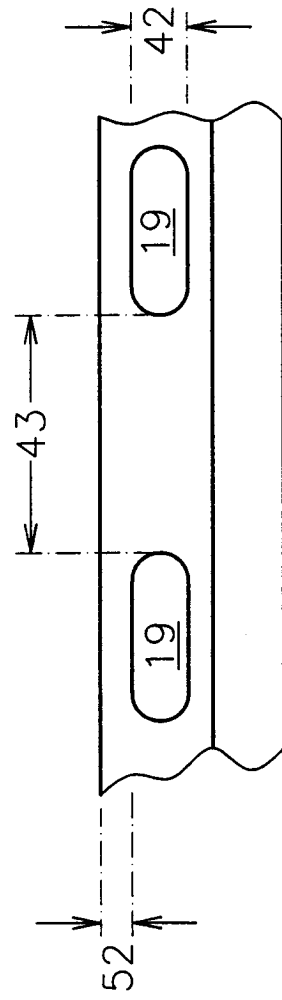


Fig. 6

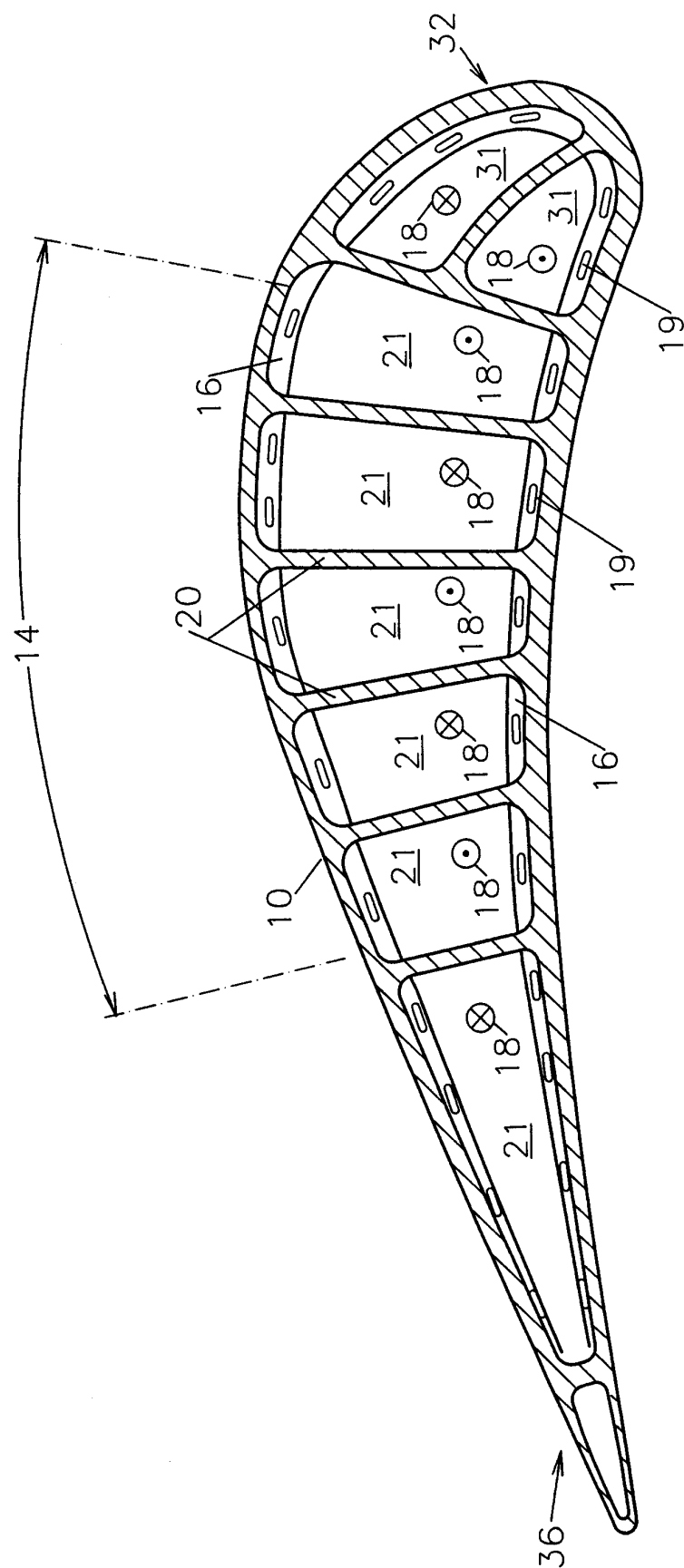


Fig. 7

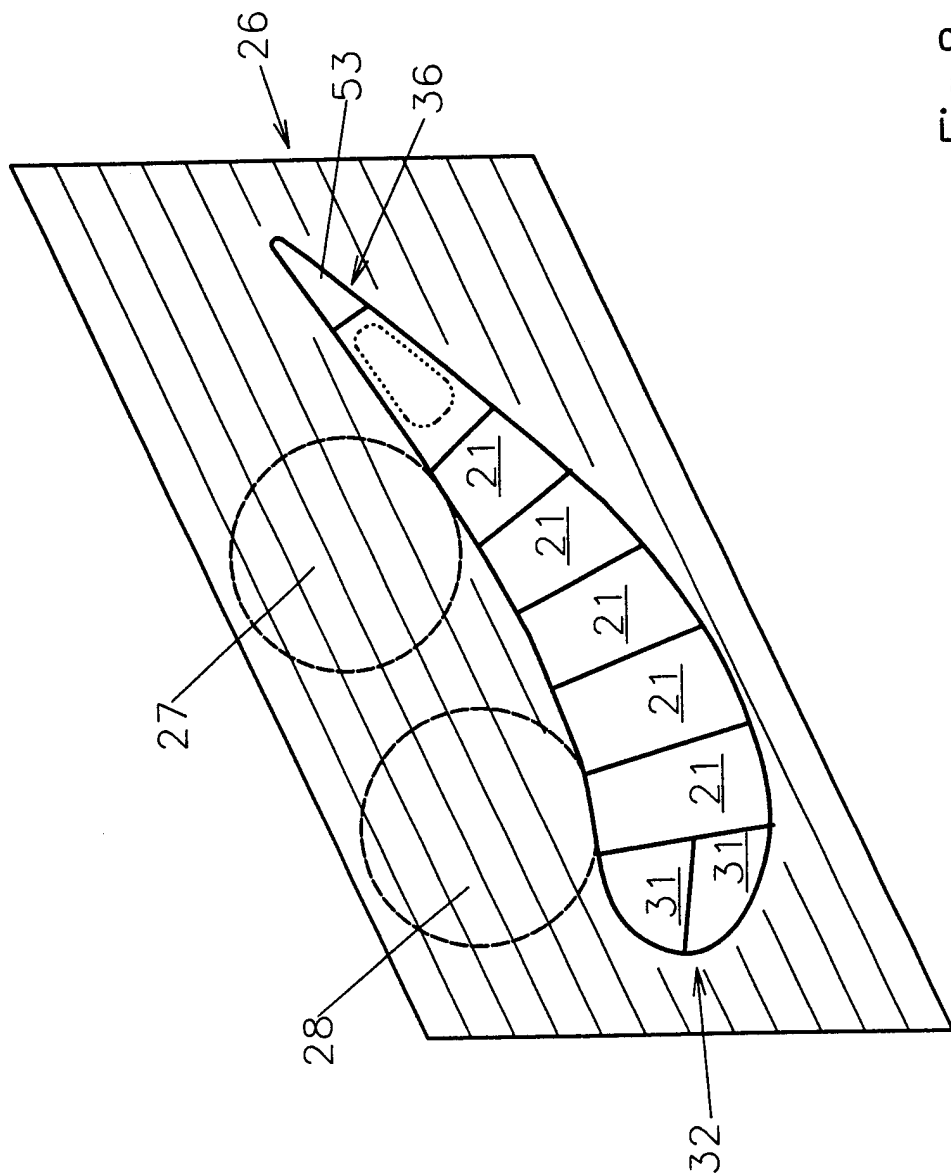


Fig. 8

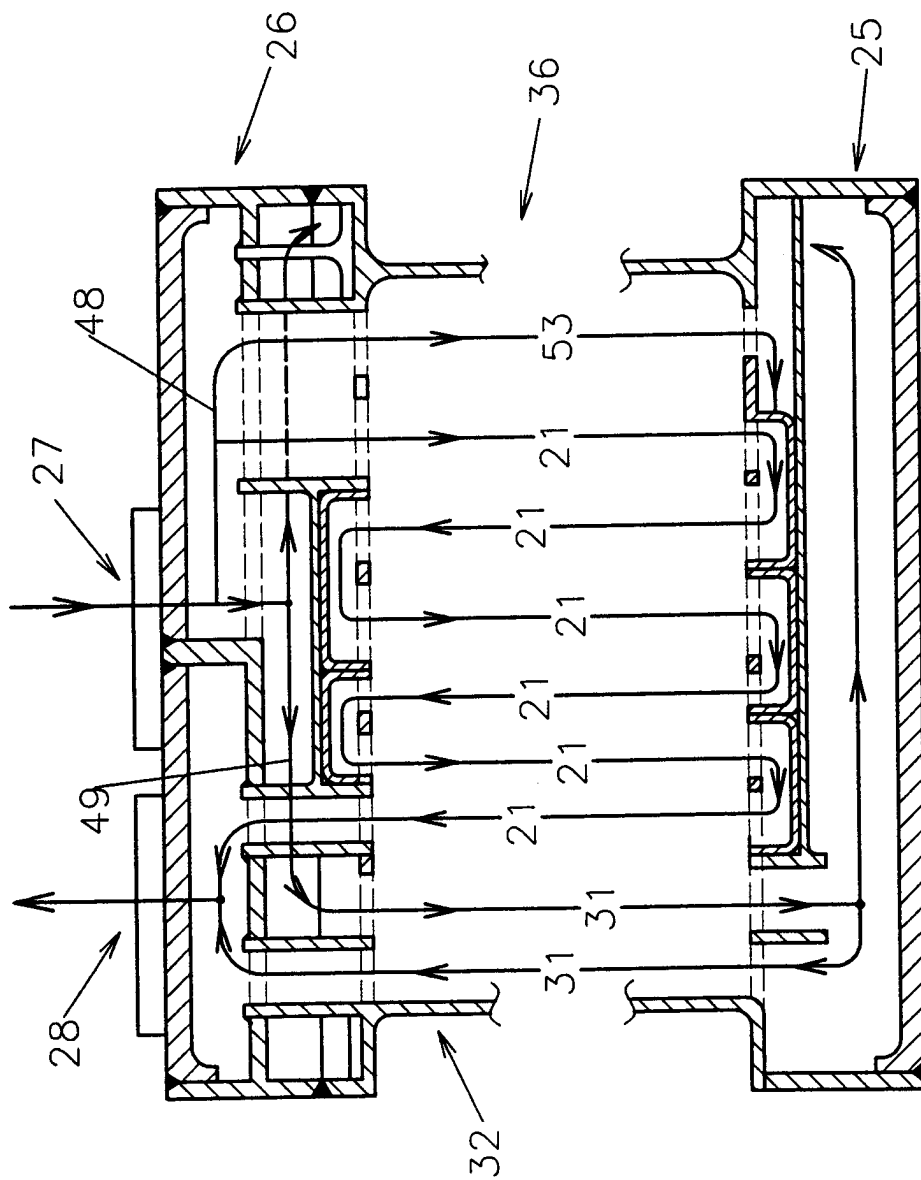


Fig.9

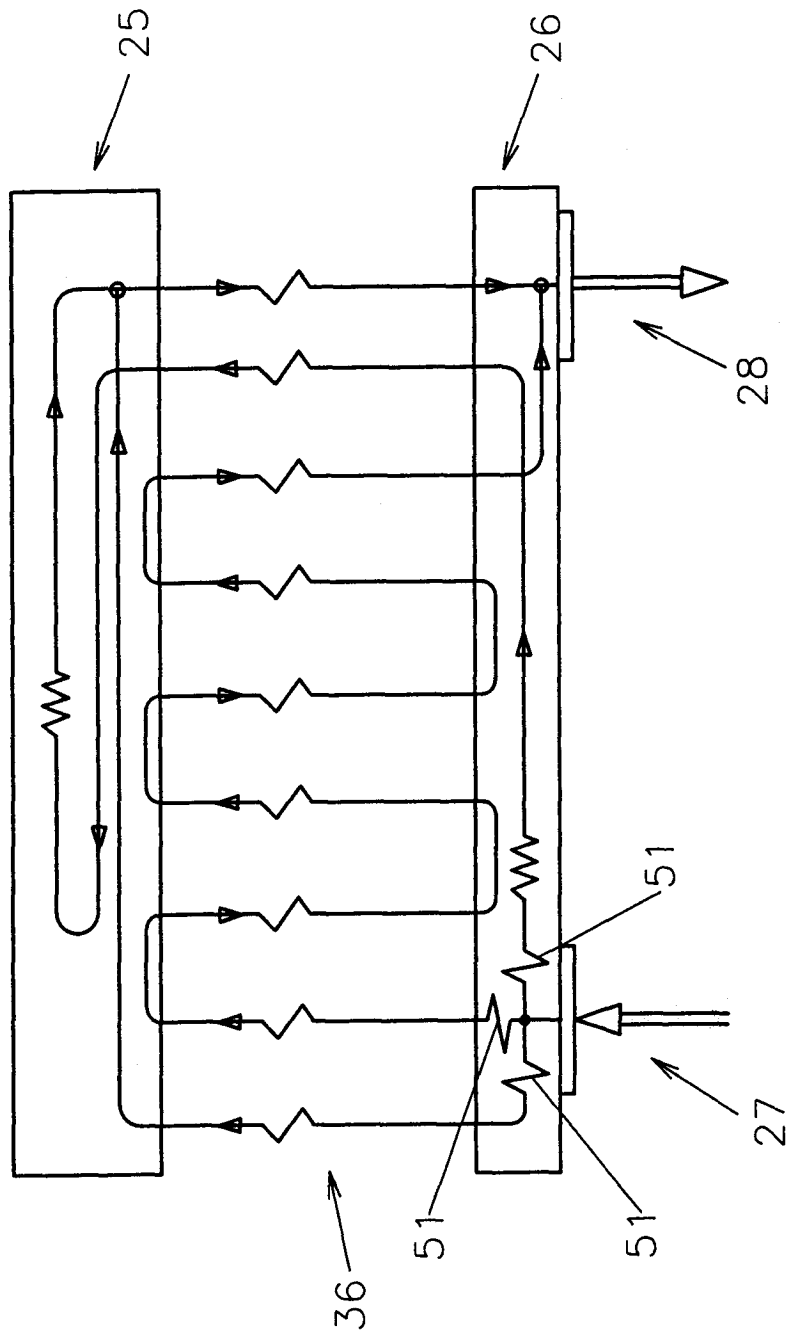


Fig. 10

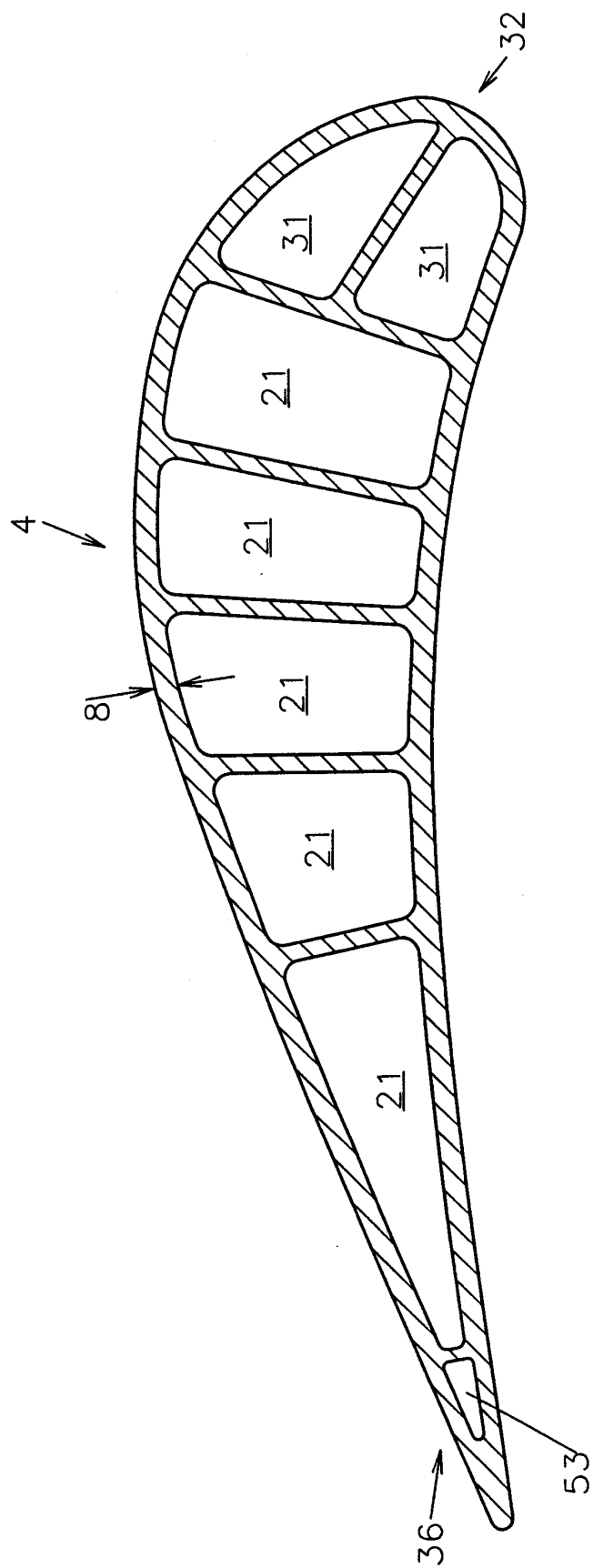


Fig. 11

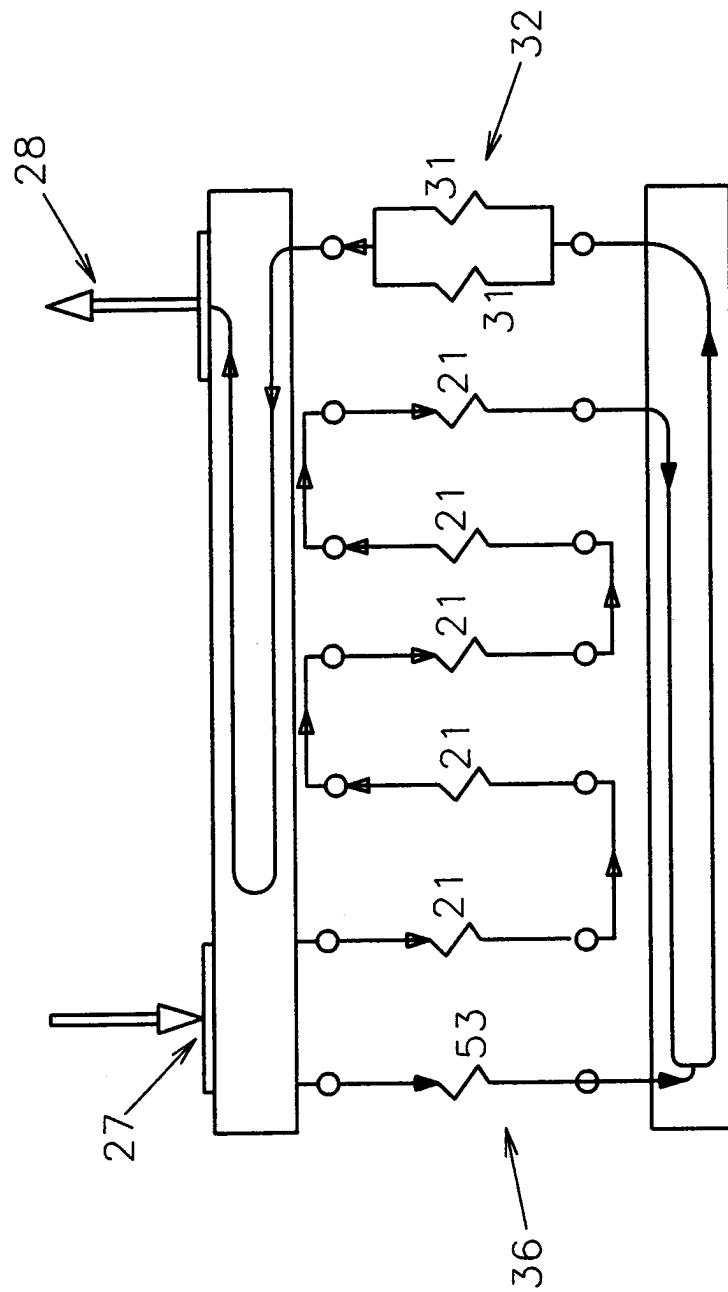


Fig.12



Europäisches
Patentamt

EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung
EP 99 12 2757

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (Int.Cl.7)
X	US 3 836 283 A (MATSUKI M ET AL) 17. September 1974 (1974-09-17)	1,3-5, 10,15, 18,20, 22,26	F01D5/18
Y	* das ganze Dokument *	2,6-8, 12-14,23	
X	DE 892 698 C (DECHER) 8. Oktober 1953 (1953-10-08) * das ganze Dokument *	1,3-5	
Y	US 5 472 316 A (TASLIM MOHAMMAD E ET AL) 5. Dezember 1995 (1995-12-05)	6-8,10, 14	
A	* Zusammenfassung; Abbildungen 2,5 *	1	
Y	FR 981 719 A (ESCHER WYSS) 30. Mai 1951 (1951-05-30)	2	
A	* das ganze Dokument *	1	
Y	EP 0 392 664 A (TOKYO SHIBAURA ELECTRIC CO) 17. Oktober 1990 (1990-10-17)	10, 12-14, 18-20, 22,23	RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (Int.Cl.7)
A	* das ganze Dokument *	1	F01D
Y	US 5 536 143 A (JACALA ARIEL ET AL) 16. Juli 1996 (1996-07-16)	6-8,10, 12-14, 18-20, 22,23	
A	* das ganze Dokument *	1-5,16, 25	
A	EP 0 814 234 A (MITSUBISHI HEAVY IND LTD) 29. Dezember 1997 (1997-12-29)		
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort DEN HAAG		Abschlußdatum der Recherche 4. April 2000	Prüfer Iverus, D
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1603 03.92 (P04039)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 99 12 2757

In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.
Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Daten des Europäischen Patentamts am
Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

04-04-2000

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 3836283 A	17-09-1974	JP 881717 C JP 49006310 A JP 52007482 B FR 2184261 A	13-09-1977 21-01-1974 02-03-1977 21-12-1973
DE 892698 C		KEINE	
US 5472316 A	05-12-1995	KEINE	
FR 981719 A	30-05-1951	BE 487558 A CH 265293 A	
EP 0392664 A	17-10-1990	JP 2241902 A DE 69017493 D DE 69017493 T US 5120192 A	26-09-1990 13-04-1995 21-09-1995 09-06-1992
US 5536143 A	16-07-1996	EP 0735240 A JP 8319803 A	02-10-1996 03-12-1996
EP 0814234 A	29-12-1997	JP 2971386 B JP 9189203 A US 5954475 A CA 2214826 A WO 9725522 A	02-11-1999 22-07-1997 21-09-1999 17-07-1997 17-07-1997

EPO FORM P4461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82