



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 600 31 941 T2** 2007.09.13

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 111 188 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **600 31 941.5**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **00 311 563.1**

(96) Europäischer Anmeldetag: **21.12.2000**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **27.06.2001**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **22.11.2006**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **13.09.2007**

(51) Int Cl.⁸: **F01D 5/14** (2006.01)
F04D 29/32 (2006.01)

(30) Unionspriorität:

467956 21.12.1999 US

(73) Patentinhaber:

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

(74) Vertreter:

Rüger und Kollegen, 73728 Esslingen

(84) Benannte Vertragsstaaten:

DE, FR, GB, IT, SE

(72) Erfinder:

**Decker, John Jared, Liberty Township, Ohio
45044, US; Steinmetz, Gregory Todd, Cincinnati,
Ohio 45239, US; Breeze-Stringfellow, Andrew,
Montgomery, Ohio 45249, US; Szucs, Peter
Nicholas, West Chester, Ohio 45069, US**

(54) Bezeichnung: **Geneigtes Schaufelblatt mit tonnenförmiger Anströmkante**

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 ganz allgemein Gasturbinentriebwerke, und insbesondere Bläser und Kompressoren davon.

[0002] Ein Zweikreisturbinentriebwerk enthält einen Bläser, auf den wiederum ein mehrstufiger Axialverdichter folgt, wobei diese jeweils eine Reihe von in Umfangsrichtung beabstandeten Rotorlaufschaufeln aufweisen, die gewöhnlich mit Statorleitschaufeln zusammenwirken. Die Schaufeln arbeiten mit Drehzahlen, die Luftströmungen im Unterschallbis in den Überschallbereich mit den davon ausgehenden Stoßwellen hervorbringen können. Stoßwellen bringen Druckverluste ein und erzeugen während des Betriebs unerwünschten Lärm.

[0003] In dem US-Patent 5 167 489 von Wadia et al. ist eine vorwärts gepfeilte Rotorlaufschaufel offenbart, die in der Lage ist, aerodynamische Verluste während des Betriebs zu reduzieren, einschließlich solcher, die auf die Wechselwirkung von Stoßwellen und Grenzschichtluft an den Blattspitzen zurückzuführen sind.

[0004] Allerdings setzt die Konstruktion von Bläser- und Verdichterschaufeln gewöhnlich aus aerodynamischen, mechanischen und aeromechanischen Gründen viele Kompromisse voraus. Ein Triebwerk wird in vielfältigen Drehzahlbereichen betrieben, und die Schaufeln müssen mit Blick auf eine Maximierung des Pumpens des hindurchströmenden Luftstroms bei gleichzeitiger Maximierung des Verdichtungswirkungsgrads konstruiert sein. Die Rotationsgeschwindigkeit der Schaufeln erschwert deren Konstruktion und den angestrebten Wirkungsgrad derselben hinsichtlich des Pumpens und der Verdichtung der Strömung.

[0005] Bei hoher Rotationsgeschwindigkeit erreichen die Strömungsmachzahlen bezüglich der Schaufeln ihren höchsten Wert, und die Wechselwirkung von Stoßwelle und Grenzschicht ist die folgeschwerste. Bei hohen Rotordrehzahlen, bei denen sich Schwingungs- und Zentrifugalspannungen erheblichen Einfluss nehmen, sind auch mechanische Beschränkungen der Schaufel problematisch. Darüber hinaus sind außerdem aeromechanische Beschränkungen, wie Strömungsflattern, zu berücksichtigen.

[0006] Aus dem Stand der Technik sind eine ganze Reihe von Bläser- und Kompressorschaukelkonstruktionen bekannt, die die sich in aerodynamischer Pfeilung, Stapelungsverteilungen, Verdrehung, Sehnenverteilungen und in ihren Konstruktionsphilosophien der Erzielung einer Verbesserung des Rotorwirkungsgrads unterscheiden. Einige Konstruktionen weisen eine gute Rotorströmungskapazität oder ein

gutes Pumpen mit dem entsprechenden Wirkungsgrad bei maximaler Drehzahl auf, und andere Konstruktionen steigern den Wirkungsgrad bei Teilgeschwindigkeit, beispielsweise im Reiseflugbetrieb, wobei das Pumpen und die Kapazität der Strömung bei maximaler Drehgeschwindigkeit entsprechend reduziert sind.

[0007] Das Dokument US 5 735 673 offenbart eine Rotorlaufschaufel für ein Turbinentriebwerk mit einer Druckseite und einer Saugseite, die sich in Spannweitenrichtung entlang der Querrichtung von der Wurzel der Schaufel aus zu der Spitze erstrecken und sich in Schnittsehnenrichtung zwischen einer Anströmkante und einer Abströmkante der Schaufel erstrecken.

[0008] Es besteht daher Bedarf nach einer verbesserten Bläser- oder Verdichterschaufel, die sowohl einen verbesserten Wirkungsgrad bei Teilgeschwindigkeit, z.B. im Reiseflugbetrieb, als auch hohes Pumpen oder hohe Kapazität der Strömung bei hoher Geschwindigkeit in Verbindung mit akzeptablen Betriebsgrenzen für Abdrosselung und Flattern aufweist.

[0009] Erfindungsgemäß ist eine Luftschaufel geschaffen, die:
eine Druckseite und eine Saugseite aufweist, die sich in Spannweitenrichtung entlang der Querrichtung von einer Wurzel bis zu einer Spitze und in Schnittsehnenrichtung zwischen einer Anströmkante und einer Abströmkante erstrecken, dadurch gekennzeichnet, dass
die Sehnen außerhalb der Wurzel in ihrer Länge zunehmen, um die Luftschaufel von ihr ausgehend auszubauhen, und
die Luftschaufel eine aerodynamische Vorwärtspfeilung an der Spitze und einwärts davon eine aerodynamische Rückwärtspfeilung aufweist.

[0010] Die Erfindung schafft eine Luftschaufel, die zwischen einer Wurzel und einer Spitze eine Anströmkantensehnenausbauchung und eine aerodynamische Vorwärtspfeilung an der Spitze aufweist.

[0011] Die Erfindung wird gemäß bevorzugten und exemplarischen Ausführungsbeispielen in Verbindung mit weiteren Aufgaben und Vorteilen der Erfindung in der folgenden detaillierten Beschreibung anhand der beigefügten Figuren näher erörtert:

[0012] [Fig. 1](#) zeigt in einer axialen Projektionsansicht von der Seite eine Reihe von Rotorschaukeln gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung.

[0013] [Fig. 2](#) zeigt von vorne nach hinten betrachtet und längs der Schnittlinie 2-2 genommen eine radiale Ansicht eines Abschnitts des in [Fig. 1](#) veranschau-

lichten Bläusers.

[0014] [Fig. 3](#) zeigt die in [Fig. 2](#) veranschaulichten Bläuserschaukeln in einer ebenen Draufsicht längs der Schnittlinie 3-3.

[0015] [Fig. 1](#) veranschaulicht in einer Teilansicht einen Bläser **10** eines exemplarischen Zweikreisturbinenriebwerks. Der Bläser **10** ist um eine mittige axiale Achse **12** achsensymmetrisch.

[0016] Der Bläser enthält eine Reihe von in Umfangsrichtung beabstandeten Schaufeln **14** in der exemplarischen Gestalt von Bläserlaufschaukeln, wie sie in [Fig. 1–Fig. 3](#) veranschaulicht sind. Wie zunächst in [Fig. 3](#) gezeigt, weist jede der Schaufeln **14** eine im Wesentlichen konkave Druckseite **16** und eine in Umfangsrichtung gegenüberliegende, im Wesentlichen konvexe Saugseite **18** auf, die sich in Längsrichtung oder radial in Spannweitenrichtung längs transversaler oder radialer Abschnitte von einer radial innenliegenden Wurzel **20** zu einer radial äußeren Spitze **22** erstrecken.

[0017] Wie in [Fig. 1](#) gezeigt, erstreckt sich jede Schaufel **14** längs einer radialen Achse **24**, entlang der die sich verändernden radialen oder transversalen Abschnitte des Schaufelblattes definiert sein können, radial nach außen. Jede Schaufel weist ferner axial oder in Sehnenrichtung voneinander beabstandete Anströmkanten und Abströmkanten **26**, **28** auf, zwischen denen sich die Druckseiten und Saugseiten in axialer Richtung erstrecken.

[0018] Wie in [Fig. 3](#) gezeigt, weist jeder radiale oder quer verlaufende Abschnitt eine Sehne auf, die durch ihre zwischen der Anströmkante und der Abströmkante gemessene Länge C repräsentiert ist. Die Schaufel weist eine von der Wurzel zur Spitze hin verdrehte Gestalt auf, die dazu dient, mit der während des Betriebs darüber geleiteten Luft **30** zusammenzuwirken. Die abschnittswisen Sehnen variieren hinsichtlich ihres Verdrehungswinkels A von der Wurzel zur Spitze hin in herkömmlicher Weise.

[0019] Wie in den [Fig. 1](#) und [Fig. 3](#) gezeigt, nehmen die abschnittswisen Sehnen des Schaufelblattes in ihrer Länge außerhalb der Wurzel **20** von dieser ausgehend nach außen zur Spitze **22** hin zu, um die Schaufel oberhalb der Wurzel auszubauchen. Gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung wird die Sehnenausbauchung längs der Schaufelblattanströmkante **26** verwirklicht, um die Anströmkante stromaufwärts oder vor einer zwischen der Wurzel und der Spitze verlaufenden Geraden an der Anströmkante in axialer Projektion zu verlängern.

[0020] Wie am besten in [Fig. 1](#) veranschaulicht, weist die Schaufel- oder Sehnenausbauchung in axi-

aler oder seitlicher Projektion zwischen der Anströmkante **26** und der Abströmkante **28** der Druckseite und der Saugseite ein maximales Ausmaß auf. Die maximale Ausbauchung tritt an einem intermediären quer verlaufenden Abschnitt **32** längs der Spannweite des Schaufelblattes an einer geeigneten radialen Position auf, die in dem Ausführungsbeispiel knapp unterhalb des Abschnitts mittlerer Spannweite oder Steigung des Schaufelblattes veranschaulicht ist.

[0021] Vorzugsweise erstreckt sich die Anströmkante **26** in der Ausbauchung axial vor der Wurzel **20**, und die Abströmkante **28** ist entsprechend ausgebaucht und erstreckt sich von der Wurzel **20** aus axial nach hinten. Auf diese Weise wird die Schaufelausbauchung in seitlicher Projektion sowohl längs der Anströmkante **26** als auch der Abströmkante **28** bewirkt.

[0022] Wie in [Fig. 1](#) zu sehen, weist die Schaufel an ihrer Spitze **22** eine vorwärts gerichtete oder negative, aerodynamische Pfeilung, sowie einwärts davon eine rückwärts gerichtete oder positive, aerodynamische Pfeilung auf. Die aerodynamische Pfeilung ist ein herkömmlicher Parameter, der durch einen lokalen Pfeilungswinkel repräsentiert ist, der eine Funktion der Richtung der ankommenden Luft und der Orientierung der Schaufeloberfläche sowohl in axialer als auch in Umfangs- oder tangentialer Richtung ist. Der Pfeilungswinkel ist im Einzelnen in dem oben erwähnten US-Patent 5 167 489 definiert. In [Fig. 1](#) ist der aerodynamische Pfeilungswinkel beispielsweise mit dem Großbuchstaben S bezeichnet und weist für Vorwärtspfeilung einen negativen Wert (–) und für Rückwärtspfeilung einen positiven Wert (+) auf.

[0023] Wie in [Fig. 1](#) gezeigt, weist die Schaufelspitze **22** vorzugsweise sowohl an der Anströmkante als auch an der Abströmkante an der Spitze **22** eine Vorwärtspfeilung (S[–]) auf.

[0024] Sowohl die bevorzugte Sehnenausbauchung als auch die Pfeilung der Bläuserschaukeln kann in herkömmlicher Weise durch radiales Stapeln der einzelnen quer verlaufenden Abschnitte des Schaufelblattes längs einer Stapelachse verwirklicht werden, die von einer geraden radialen Achse aus entweder in axialer oder in Umfangsrichtung oder in beiden Richtungen mit einer entsprechenden nicht linearen Krümmung entsprechend variiert. Darüber hinaus ist die Schaufel außerdem durch die radiale Verteilung der Sehnen an jeden der transversalen Abschnitte definiert, die die Sehnenlänge C und den Verdrehungswinkel A aufweisen, wie sie in [Fig. 3](#) dargestellt sind.

[0025] Die Sehnenausbauchung des Schaufelblattes in Verbindung mit der Vorwärtspfeilung der Spitze weist erhebliche Vorteile auf. Ein Hauptvorteil ist die Vermehrung der wirksamen Fläche der Anströmkante

te des Schaufelblattes, was die mittlere relative Machzahl der Anströmkante entsprechend reduziert. Außerdem beginnt der durch die Schaufel hervorgerufene Verdichtungs Vorgang im Vergleich zu einer Schaufel, die keine Anströmkantenausbauchung aufweist, an einer weiter stromaufwärts gelegenen Stelle. Dementsprechend bewirkt die Schaufel eine Steigerung ihrer Förderkapazität bei hoher oder maximaler Drehzahl bei gleichzeitiger Verbesserung des Wirkungsgrads und der Stabilitätsgrenze bei Teilgeschwindigkeit.

[0026] Diese Vorteile sind für die Schaufel **14** in Form der Bläserlaufschaufel von besonderer Bedeutung, da diese rotiert. Allerdings können auch entsprechende Vorteile für Bläser- oder Verdichterleitradschaufeln erzielt werden, die nicht rotieren. In dem in [Fig. 1](#) veranschaulichten Ausführungsbeispiel einer Schaufel ist die Schaufel auf herkömmliche Weise mittels eines einstückigen Schwalbenschwanzes **34** an einer tragenden Rotorscheibe oder Nabe **36** angebracht, und diskrete Plattformen **38** sind zwischen benachbarten Schaufeln an deren entsprechenden Wurzeln befestigt, um die radial innere Strömungspfadbegrenzung für die Luft **30** zu definieren. Ein Außengehäuse **40** umgibt die Schaufelreihe und definiert die radial äußere Strömungspfadbegrenzung für die Luft.

[0027] Im Falle der Rotorlaufschaufelkonstruktion des in den [Fig. 1–Fig. 3](#) veranschaulichten Schaufelblattes nehmen die abschnittswisen Sehnen C in ihrer Länge vorzugsweise ausgehend von der Wurzel **20** über den gesamten Weg bis zu der Spitze **22** zu, die eine maximale Sehnenlänge aufweist. Die Ausbauchung des Schaufelblattes wird auf diese Weise sowohl durch die radiale Sehnenverteilung als auch durch die in [Fig. 3](#) veranschaulichten sich ändernden Verdrehungswinkel erzielt, so dass die in [Fig. 1](#) veranschaulichte bevorzugte axiale Projektion oder Seitenansicht hervorgebracht wird.

[0028] Wie in [Fig. 1](#) schematisch gezeigt, wird die Spitzenvorwärtspfeilung des Schaufelblattes vorzugsweise sowohl an der Abströmkante **28** als auch an der Anströmkante **26** erzeugt. Die Vorwärtspfeilung der Schaufelblattspitze ist gewünscht, um den Verdichtungswirkungsgrad und die Drosselstabilitätsgrenze bei Teilgeschwindigkeit aufrecht zu erhalten. Die Vorwärtspfeilung der Abströmkante an der Spitze stellt höchst wirkungsvoll sicher, dass radial nach außen wandernde Luft die Abströmkante verlässt, bevor sie zu der Schaufelspitze gelangt, und die Spitzengrenzschichtluft- und Stoßwellenverluste darin während des Betriebs reduziert. Der Luftstrom an den Schaufelspitzen erfährt für einen vorgegebenen mittleren Anstieg des statischen Drucks des Rotors außerdem einen geringeren statischen Druckanstieg als im Falle herkömmlicher Schaufeln.

[0029] Die Vorwärtspfeilung der Schaufelblattanströmkante an der Spitze ist außerdem erwünscht, um die Stabilität der Strömung zu fördern. Weiter ist die Vorwärtspfeilung an der Abströmkante **28** nahe der Schaufelspitze vorzugsweise größer als die Vorwärtspfeilung an der Anströmkante **26** nahe der Spitze.

[0030] Vorzugsweise nimmt die in [Fig. 1](#) veranschaulichte Vorwärtspfeilung an der Abströmkante **28** ausgehend von der Spitze bis zur Wurzel hin ab, wobei an der Spitze ein Maximalwert vorliegt und der Werts bis zu der maximalen Sehnenausbauchung bei dem intermediären Abschnitt **32** abnimmt. Die Abströmkante **28** sollte in Richtung der Wurzel **20** entlang der Spannweite so weit nach unten hin mit einer Vorwärtspfeilung ausgebildet sein, wie es mechanische Grenzen, z.B. eine während des Betriebs angemessene Zentrifugalspannung, zulassen. In dem in [Fig. 1](#) veranschaulichten exemplarischen Ausführungsbeispiel weist die Abströmkante **28** radial einwärts der maximalen Ausbauchung eine Rückwärtspfeilung auf, die radial außenseitig davon in die Vorwärtspfeilung übergeht.

[0031] Da die Schaufelausbauchung in Kombination mit der gewünschten Vorwärtspfeilung an der Spitze des Schaufelblattes verwirklicht wird, weist die in [Fig. 1](#) veranschaulichte Anströmkante **26** eine Vorwärtspfeilung auf, die von der Spitze **22** aus zwischen der Spitze und der maximalen Ausbauchung bei dem intermediären Abschnitt **32** in eine Rückwärtspfeilung übergeht. Die Rückwärtspfeilung der Anströmkante geht einwärts der maximalen Ausbauchung bei dem intermediären Abschnitt **32** anschließend in eine Vorwärtspfeilung über. Die einwärts angeordnete Vorwärtspfeilung der Anströmkante kann sich nach unten hin bis zu der Wurzel **20** fortsetzen.

[0032] Allerdings geht gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel die Anströmkante **26** außenseitig der Wurzel **20** und einwärts der maximalen Ausbauchung bei dem intermediären Abschnitt **32** wieder von der Vorwärts- in die Rückwärtspfeilung über. Auf diese Weise kombiniert die Schaufelblattanströmkante sowohl eine Sehnenausbauchung als auch eine Vorwärtspfeilung der Spitze, um die aerodynamische Leistung sowohl bei Teilgeschwindigkeit als auch bei voller Geschwindigkeit erheblich zu verbessern.

[0033] Eine dreidimensionale Rechenanalyse ergab, dass die oben offenbarte vorwärts gepfeilte, ausgebauchte Schaufel **14** wirksame Anströmkantenflächen aufweist, die bis etwa ein Prozent größer sind als bei herkömmlichen radial gestapelten Bläserschaufeln. Dies entspricht einer Steigerung der Förderkapazität um ein Prozent bei gleichem oder größeren Verdichtungswirkungsgrad.

[0034] Darüber hinaus kann auch eine Steigerung der Wirkungsgrade bei Teilgeschwindigkeit oder im Reiseflug in der Größenordnung von etwa 0,8 Prozent gegenüber herkömmlichen Schaufeln erreicht werden. Ein Großteil des Vorteils der Steigerung des Wirkungsgrads bei Teilgeschwindigkeit lässt sich auf die Vorwärtspfeilung der Spitze, die Verluste an der Spitze reduziert, und auf die aufgrund der Sehnen- ausbauchung ausgebildete Rückwärtspfeilung in Höhe der intermediären Spannweite der Schaufel zurückführen, die zu einer geringeren Stoßwellenintensität und entsprechend verminderten Stoßwellenverlusten führt.

[0035] Die Modifikation einer Bläterschaukel zur Vermehrung einer wirksamen Stirnfläche durch nicht radiales Stapeln der quer verlaufenden Abschnitte und durch Sehnenausbauchung in Verbindung mit der örtlichen Verwendung einer Vorwärtspfeilung an den Blattspitzen weist nicht nur für Bläterschaukeln Vorteile auf, sondern lässt sich auch für schallnahe Bläser-Statorleitschaukeln sowie zur Verbesserung der Förderkapazität und Verringerung aerodynamischer Verluste einsetzen.

Patentansprüche

1. Luftschaukel (14), die:
eine Druckseite und eine Saugseite (16, 18) aufweist, die sich in Spannweitenrichtung entlang der Quer- richtung von einer Wurzel (20) bis zu einer Spitze (22) und in Schnittsehnenrichtung zwischen einer An- strömkante und einer Abströmkante (26, 28) erstre- cken, **dadurch gekennzeichnet**, dass
die Sehnen außerhalb der Wurzel in ihrer Länge zu- nehmen, um die Luftschaukel von ihr ausgehend aus- zubauchen, und
dass die Luftschaukel eine aerodynamische Vor- wärtspfeilung an der Spitze und einwärts davon eine aerodynamische Rückwärtspfeilung aufweist.

2. Luftschaukel nach Anspruch 1, bei der die Spit- zenvorwärtspfeilung an der Abströmkante (28) reali- siert ist.

3. Luftschaukel nach Anspruch 2, bei der die Spit- zenvorwärtspfeilung an der Anströmkante (26) reali- siert ist.

4. Luftschaukel nach Anspruch 3, bei der die ab- schnittsweisen Sehnen hinsichtlich ihres Verdre- hungswinkels zwischen der Wurzel (20) und der Spit- ze (22) variieren, wobei die Ausbauchung ein maxi- males Ausmaß zwischen der Anströmkante und der Abströmkante (26, 28) in Axialprojektion der Seiten (18, 20) aufweist.

5. Luftschaukel nach Anspruch 4, bei der sich in der Ausbauchung die Anströmkante (26) axial vor- wärts zu der Wurzel (20) und bei der sich in der Aus-

bauchung die Abströmkante (28) axial rückwärts zu der Wurzel erstreckt.

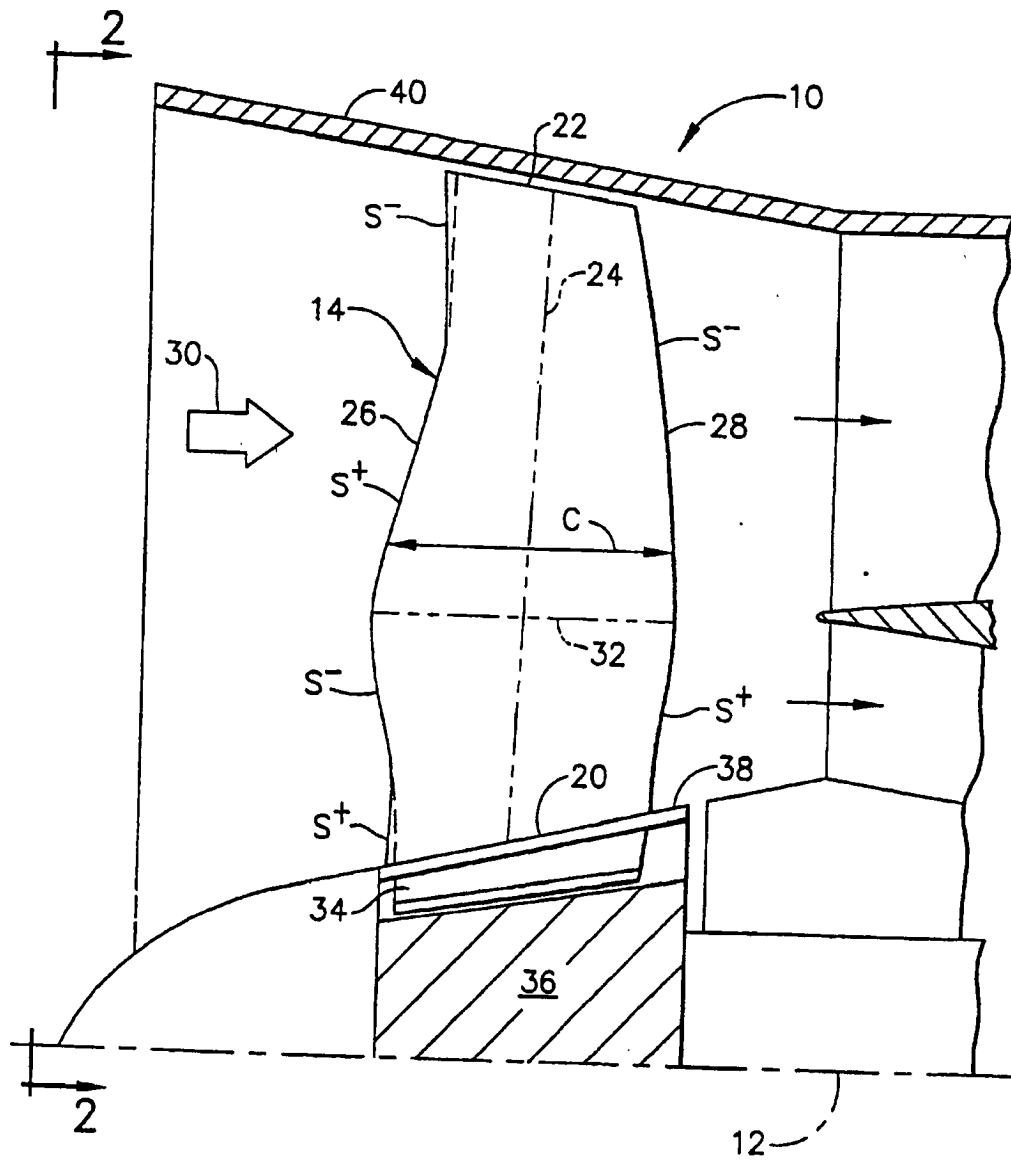
6. Luftschaukel nach Anspruch 1, bei der die Spit- zenvorwärtspfeilung sowohl an der Anströmkante als auch an der Abströmkante (26, 28) realisiert ist.

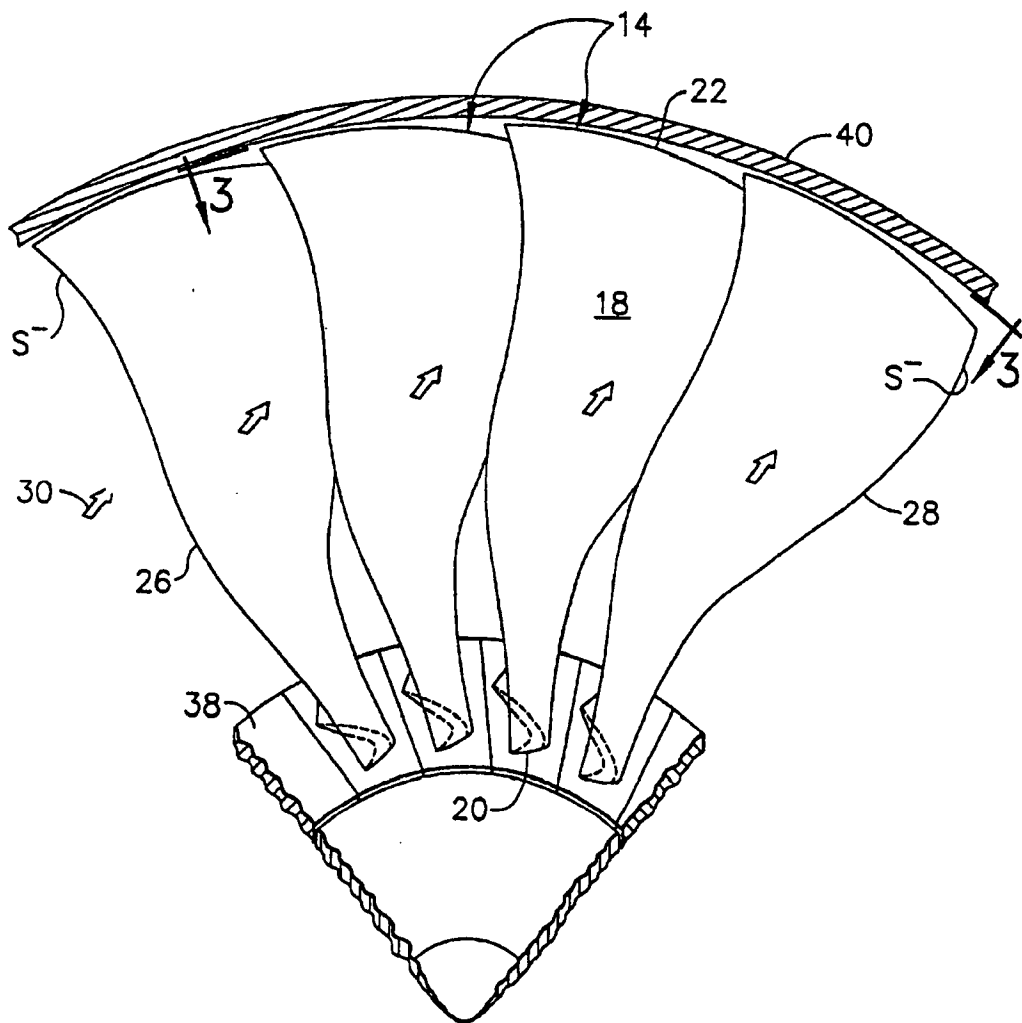
7. Luftschaukel nach Anspruch 6, bei der die An- strömkante (26) sich in der Ausbauchung axial vor- wärts zu der Wurzel (20) und die Abströmkante (28) in der Ausbauchung axial rückwärts zu der Wurzel er- streckt.

8. Luftschaukel nach Anspruch 7, bei der die Vor- wärtspfeilung an der Abströmkante (28) größer ist als die Vorwärtspfeilung an der Anströmkante (26).

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen





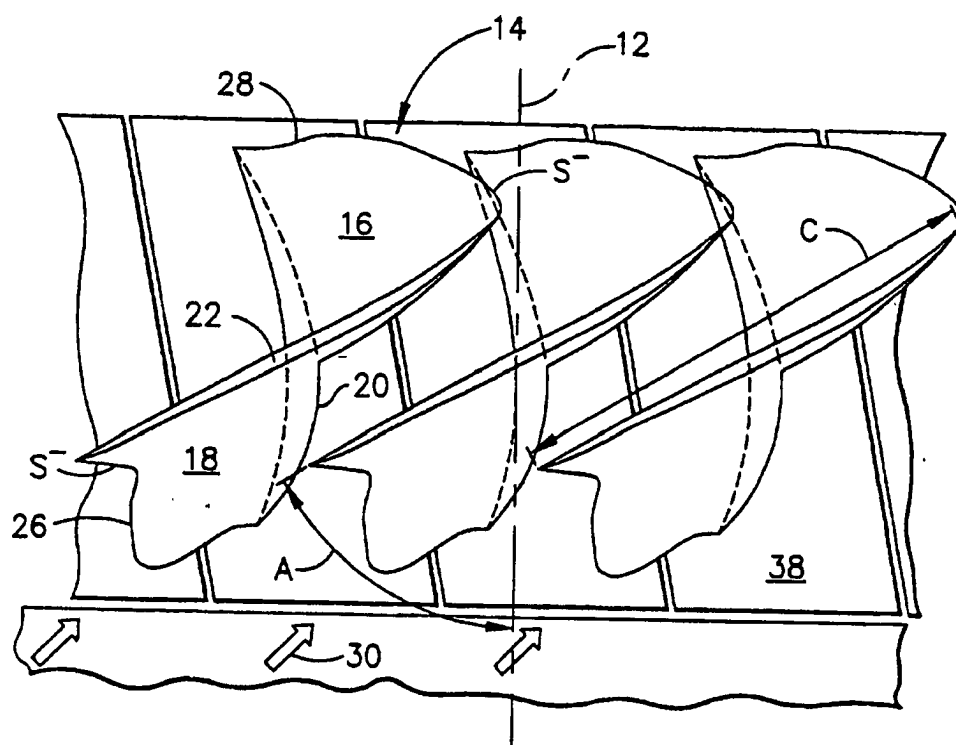


FIG. 3