**PCT** WELTORGANISATION FÜR GEISTIGES EIGENTUM
Internationales Büro
INTERNATIONALE ANMELDUNG VERÖFFENTLICHT NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT)

(51) Internationale Patentklassifikation 6 : F04D 29/38, 29/32

A1

(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: **WO 98/05868**

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum: 12. Februar 1998 (12.02.98)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP97/04205

(22) Internationales Anmeldedatum: 1. August 1997 (01.08.97)

(30) Prioritätsdaten:
196 31 093.8 1. August 1996 (01.08.96) DE

(71) Anmelder *(für alle Bestimmungsstaaten ausser US)*: DEUTSCHE FORSCHUNGSANSTALT FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V. [DE/DE]; Südstrasse 125, D-53175 Bonn (DE).

(72) Erfinder; und
(75) Erfinder/Anmelder *(nur für US)*: LOHMANN, Dieter [DE/DE]; Rostockstrasse 4, D-38124 Braunschweig (DE).

(74) Anwalt: EINSEL, Martin; Jasperallee 1 a, D-38102 Braunschweig (DE).

(81) Bestimmungsstaaten: JP, US, europäisches Patent (AT, BE, CH, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).

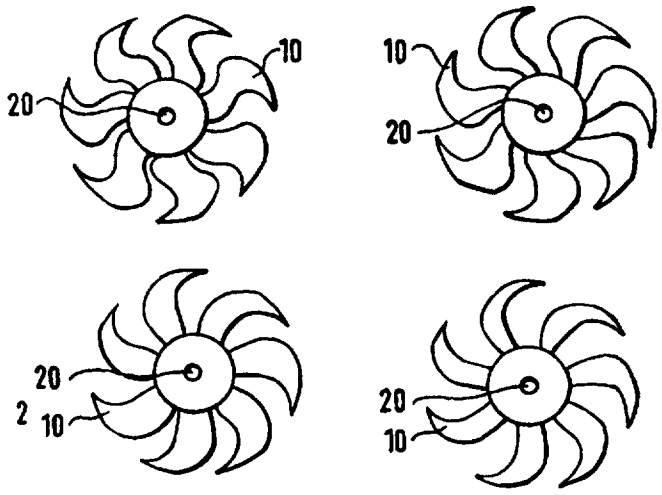
Veröffentlicht
*Mit internationalem Recherchenbericht.*
*Vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche zugelassenen Frist. Veröffentlichung wird wiederholt falls Änderungen eintreffen.*

(54) Title: AEROACOUSTIC OPTIMISATION PROCESS OF AN AXIAL FAN

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR AEROAKUSTISCHEN OPTIMIERUNG EINES AXIALLÜFTERS

(57) Abstract

A process is disclosed for optimising the aeroacoustics of an axial fan. During a first phase, based on a digital computer simulation, the blade geometry of the axial fan blades is aerodynamically optimised by applying a reverse digital design process in conjunction with a first optimisation algorithm. In a second phase, in conjunction with a second optimisation algorithm, the blade geometry is acoustically optimised a first time to reduce stochastic noise by means of another digital process based on turbulence models, then the blade geometry and distribution are acoustically optimised a second time to minimise the periodic noise fraction by means of a singularity calculation process.




(57) Zusammenfassung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur aeroakustischen Optimierung eines Axiallüfters, bei dem auf der Basis einer numerischen Computersimulation in einer ersten Phase eine aerodynamische Optimierung der Blattgeometrie der Axiallüfterblätter durch Anwendung eines inversen numerischen Entwurfsverfahrens in Verbindung mit einem ersten Optimierungsalgorithmus erfolgt, wobei in einer zweiten Phase in Kombination mit einem zweiten Optimierungsalgorithmus zunächst eine erste akustische Optimierung der Blattgeometrie zur Minderung des stochastischen Lärms mit Hilfe eines weiteren numerischen Verfahrens auf der Basis von Turbulenzmodellen, und anschließend eine zweite akustische Optimierung der Blattgeometrie und Blattteilung zur Minimierung des periodischen Lärmanteils mit Hilfe eines Singularitätenverfahrens berechnet wird.

*LEDIGLICH ZUR INFORMATION*

Codes zur Identifizierung von PCT-Vertragsstaaten auf den Kopfbögen der Schriften, die internationale Anmeldungen gemäss dem PCT veröffentlichen.

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| AL | Albanien | ES | Spanien | LS | Lesotho | SI | Slowenien |
| AM | Armenien | FI | Finnland | LT | Litauen | SK | Slowakei |
| AT | Österreich | FR | Frankreich | LU | Luxemburg | SN | Senegal |
| AU | Australien | GA | Gabun | LV | Lettland | SZ | Swasiland |
| AZ | Aserbaidschan | GB | Vereinigtes Königreich | MC | Monaco | TD | Tschad |
| BA | Bosnien-Herzegowina | GE | Georgien | MD | Republik Moldau | TG | Togo |
| BB | Barbados | GH | Ghana | MG | Madagaskar | TJ | Tadschikistan |
| BE | Belgien | GN | Guinea | MK | Die ehemalige jugoslawische Republik Mazedonien | TM | Turkmenistan |
| BF | Burkina Faso | GR | Griechenland | | | TR | Türkei |
| BG | Bulgarien | HU | Ungarn | ML | Mali | TT | Trinidad und Tobago |
| BJ | Benin | IE | Irland | MN | Mongolei | UA | Ukraine |
| BR | Brasilien | IL | Israel | MR | Mauretanien | UG | Uganda |
| BY | Belarus | IS | Island | MW | Malawi | US | Vereinigte Staaten von Amerika |
| CA | Kanada | IT | Italien | MX | Mexiko | | |
| CF | Zentralafrikanische Republik | JP | Japan | NE | Niger | UZ | Usbekistan |
| CG | Kongo | KE | Kenia | NL | Niederlande | VN | Vietnam |
| CH | Schweiz | KG | Kirgisistan | NO | Norwegen | YU | Jugoslawien |
| CI | Côte d'Ivoire | KP | Demokratische Volksrepublik Korea | NZ | Neuseeland | ZW | Zimbabwe |
| CM | Kamerun | | | PL | Polen | | |
| CN | China | KR | Republik Korea | PT | Portugal | | |
| CU | Kuba | KZ | Kasachstan | RO | Rumänien | | |
| CZ | Tschechische Republik | LC | St. Lucia | RU | Russische Föderation | | |
| DE | Deutschland | LI | Liechtenstein | SD | Sudan | | |
| DK | Dänemark | LK | Sri Lanka | SE | Schweden | | |
| EE | Estland | LR | Liberia | SG | Singapur | | |

# Verfahren zur aeroakustischen Optimierung eines Axiallüfters

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur aeroakustischen Optimierung eines Axiallüfters, bei dem auf der Basis einer numerischen Computersimulation in einer ersten Phase eine aerodynamische Optimierung der Blattgeometrie des Axiallüfters durch Anwendung eines inversen numerischen Entwurfsverfahrens in Verbindung mit einem ersten Optimierungsalgorithmus erfolgt.

Ein entsprechendes Verfahren für einen Axiallüfter, insbesondere für ein Kühlgebläse eines Kraftfahrzeugmotors ist aus der DE 43 26 147 A1 bekannt. Axiallüfter sind insbesondere diejenigen Lüfter, die zur Kühlung von Motoren von Kraftfahrzeugen eingesetzt und mechanisch oder elektrisch angetrieben werden. Im Fall eines elektrischen Antriebs schaltet ein Thermostat den Antrieb ein, wenn der Fahrtwind zur Kühlung nicht mehr ausreicht. Im Betrieb erzeugt der Axiallüfter neben der gewünschten Kühlung auch Lärm. Bei langsamer Fahrt oder im Stand kann der erzeugte Lärm das Umgebungsgeräusch übersteigen und somit zu einer erheblichen Lärmquelle werden. Es ist deshalb wünschenswert, den Lärm zu senken, ohne dadurch die Leistung des Lüfters zu verringern. Eine derartige aeroakustische Optimierung unterliegt jedoch einer Reihe von Randbedingungen, wie z. B. einer geringen Einbautiefe, niedrigen Herstellungskosten, einer möglichst recyclefähigen Bauweise und einem bestimmten erzeugten Lärmspektrum. Eine besondere Bedeutung kommt der Einbautiefe in Axialrichtung zu, da entsprechende Lüfter im Fahrzeug zwischen Kraftfahrzeugmotor und Kühler mit Kondensator eingebaut werden müssen. In der Kraftfahrzeugindustrie ist daher eine Einbautiefe von maximal 15 % des Radius gefordert. Hinsichtlich des Lärmspektrums sind gegenüber unerwünschten Pfeiftönen möglichst breitbandige Rauschtöne mit niedrigen Pegeln erwünscht.

Der aus der DE 43 26 147 A1 bekannte Axiallüfter gewährleistet aufgrund des darin beschriebenen Entwurfsverfahrens einen Axiallüfter mit dreidimensional ausgebildeten Lüfterblättern, die jeweils eine starke Vorwärtspfeilung und eine starke Rückwärtspfeilung nach Art einer Vogelschwinge aufweisen, wodurch die Aerodynamik und automatisch die Akustik gleichzeitig weitgehend optimiert werden. D. h., es ist eine Blattgeometrie für einen Axiallüfter bekannt, bei dem

BESTÄTIGUNGSKOPIE

Aufrollwirbel und induzierte Ablösungen derart beeinflußt werden, daß der Schub und der Wirkungsgrad kaum beeinflußt werden.

Weitere und experimentelle Untersuchen haben jedoch gezeigt, daß auch derart ermittelte Blattgeometrien Zonen turbulenter, abgelöster oder mit Aufrollwirbeln behafteter Strömung aufweisen. Derartige Strömungsphänomene sind stochastischer Natur und können nicht allein mit dem aus der DE 43 26 147 A1 bekannten Entwurfsverfahren errechnet und somit gänzlich vermieden werden.

Aus dem Aufsatz "Aeroakustische Optimierung einer Lüftergeometrie", von Dr.-Ing Dieter Lohmann, DLR-Nachrichten, Heft 78 (Mai 1995) Seite 15 bis 22, geht eine Weiterentwicklung des auch als LBS-Code (Lifting Body Surface) bekannten o.g. Entwurfsverfahrens hervor. Danach ist zur vollständigen Nachrechnung der Lüfterakustik noch ein zusätzlicher halbempirischer Ansatz auf der Basis von Turbulenzmodellen erforderlich, die beispielsweise hinsichtlich der Akustik eine optimale Blattgeometrie ergeben. Obgleich die damit erzielten Ergebnisse eine theoretische Lärmreduktion von einigen dB (A) aufweisen, war eine, wenn auch geringe Schub- und Wirkungsgradverminderung festzustellen, die aufgrund von nun wieder vermehrt auftretenden Ablösungserscheinungen im mittleren Bereich der Saugseite und im Vorderkantenbereich der Blattgeometrie auftraten. Unabhängig vom Rechenergebnis wurde, um die größte Ablösung zu vermeiden, aufgrund physikalischer Überzeugungen mit Erfolg im Nabenbereich die Vorwärtspfeilung etwas zurückgenommen, wodurch die Verluste wieder geringer wurden, wie Meßergebnisse im Windkanal gezeigt haben.

Unabhängig von diesem Stand der Technik werden Lüfter mit Hilfe von 2-D Gittermethoden oder Singularitätsverfahren aerodynamisch entworfen und im Windkanal getestet. Bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten, die am Lüfter auftreten, wird meistens auf eine Profilgebung der Blattgeometrien verzichtet. Vielmehr werden trotz eines größeren Strömungswiderstandes einfache Kreisbogenblechprofile verwendet, um ein Abreißen der Strömung zu verhindern. Auch durch Probieren hatte man bereits vor dem zuvor genannten Stand der Technik herausgefunden, daß Lüfter mit sichelförmig gepfeilten Blättern leiser sein können als die vorgenannten. Entsprechende sichelförmig gepfeilte Lüfter-

blätter sind beispielsweise aus der US 5,064,345, der DE 31 37 114 C2 und der WO 90/15253 bekannt. Die Art der Pfeilung ist in diesem Stand der Technik in der Regel in Probierversuchen ermittelt worden. Eine physikalische Erklärung oder gar eine mathematische Gesetzmäßigkeit, die beschreibt, warum diese Lüfter leiser sind, ist aus den letztgenannten Schriften nicht bekannt. Zusätzlich wurde herausgefunden, daß durch eine asymmetrische Aufteilung der Blätter die spektrale Verteilung verändert und damit der dB (A)-bewertete Lärmpegel vermindert werden kann. Die Höhe der entsprechenden Lärmreduktion konnte jedoch nicht ermittelt werden.

Mit den genannten bekannten Entwurfsverfahren konnten die dreidimensionalen Effekte (3-D Effekte), die für einen optimalen Entwurf von großer Bedeutung sind, nicht vollständig erfaßt werden. Darüber hinaus konnte die Art der sichelförmigen Pfeilung unter Berücksichtigung der aerodynamischen Beiwerte, der Profilform, der Blattiefe und Verwindung nicht vollständig rechnerisch bestimmt werden. Insbesondere kann mit den im Stand der Technik bekannten Verfahren generell der Schallpegel von Lüftern in Abhängigkeit von der Blattgeometrie nicht vollständig berechnet werden, weshalb die bekannten Entwurfsmethoden die nachfolgende Aufgabe nicht befriedigend lösen können.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein Verfahren zur aeroakustischen Optimierung eines Axiallüfters oder eines Gebläses, Propellers oder Rotors, insbesondere im Bereich seiner Flügelform zu schaffen, mit dem es möglich ist, den Lärm von Axiallüftern durch eine aeroakustische optimale Formgebung allein auf der Basis einer numerischen Computersimulation für sowohl aerodynamische als auch akustische Optimierung erheblich zu senken, ohne daß sich dabei die Leistung des Axiallüfters verschlechtert, dieser also eine weitgehend verlust- und störungsfreie Strömung aufweist.

Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe dadurch gelöst, daß in einer zweiten Phase in Kombination mit einem zweiten Optimierungsalgorithmus

- zunächst eine erste akustische Optimierung der Blattgeometrie zur Minderung des stochastischen Lärmanteils mit Hilfe eines weiteren numerischen Verfahrens auf der Basis von Turbulenzmodellen, und

- anschließend eine zweite akustische Optimierung der Blattgeometrie und Blatteilung zur Minimierung des periodischen Lärmanteils mit Hilfe eines Singularitätenverfahrens berechnet wird. Weiterbildungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen definiert.

Es wird also vorteilhaft mittels derselben Potentialfunktion einmal der aerodynamische und anschließend der akustische Entwurf des Lüfter-, Gebläse-, etc. Profils vorgenommen. Der akustische Druck ergibt sich dabei durch Ableiten der Potentialfunktion nach der Zeit, die Aerodynamik durch Ableiten nach den Koordinaten.

Überraschenderweise hat sich gezeigt, daß auf der Grundlage der eingangs genannten DE 43 26 147 A1 und des Aufsatzes ein Entwurfsverfahren angegeben werden kann, das es ermöglicht, innerhalb des bekannten Verfahrens den theoretischen Entwurf nachzubessern.

Mit den bekannten Entwufsverfahren des Standes der Technik sind bislang keine Auslegungen bzw. Optimierungen von kleinen und großen Lüftern möglich gewesen, ohne experimentell tätig zu werden. Erfindungsgemäß wird aber nun eine Optimierung von Lüftern etc. kleiner und großer Bauart ermöglicht, die rechnerisch vorgeht und lediglich einzelne Konstanten innerhalb des Entwurfscodes durch ein Experiment validiert, ansonsten jedoch eine rein rechnerische Optimierung in Aerodynamik und Akustik erlaubt.

An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, daß mit Blattgeometrie immer die Geometrie eines Rotorblattes eines Lüfters, Propellers oder Rotors beschrieben ist und mit dem Begriff Lüfter der eingangs genannte Axiallüfter beschrieben wird. Es ist jedoch selbstverständlich, daß das vorgeschlagene Verfahren in ähnlicher Form auf andere Lüfter übertragen werden kann. Insbesondere wird ferner darauf hingewiesen, daß die eingangs genannte DE 43 26 147 A1 vollständig beschreibender Bestandteil dieser Anmeldung sein soll.

Erfindungsgemäß ist vorteilhaft vorgesehen, daß in der ersten Phase als inverses numerisches Entwurfsverfahren das Verfahren nach Larrabee zur Anwendung kommt und als Berechnungsvorgabe je nach Reynoldszahl ein geeignetes

Laminarprofil oder Kreisprofil gewählt wird und damit die Blatt-Tiefe und die Verwindung β für eine elliptische Lastverteilung im Entwurfspunkt E mit einem Entwurfscode DESI1, welches ein aerodynamisch inverses Entwurfsverfahren ist, berechnet wird. Bei dem Verfahren nach Larrabee werden Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte des Profils (Polare) mit berücksichtigt und ein Entwurf im Optimalpunkt der Kennlinie durchgeführt. Die dimensionslosen induzierten Geschwindigkeiten in axialer ($a_v$) und azimuthaler ($a_\Omega$) Richtung des Propellers oder Lüfters ergeben sich aus

$$a_v = \frac{1}{\frac{(4F\sin\Phi\cos\Phi)}{(\sigma c_x)} + 1} \qquad (1)$$

$$a_\Omega = \frac{1}{\frac{(4F\sin\Phi)}{(\sigma c_y)} + 1} \qquad (2)$$

wobei der Teilungsfaktor (Solidity) σ

$$\sigma = \frac{B(\frac{t}{R})}{(2\pi\frac{r}{R})} \qquad (3)$$

ist, mit B : Blattzahl

t : Teilung

R : Blattspitzenradius

r : lokaler Radius; $\frac{r}{R}$ : relativer Radius

F : Prandtl'sche Näherungsfunktion

$\Phi$ : Winkel zwischen effektiver Anströmung und Drehebene

$c_x$ : Kraftbeiwert normal zur Propellerachse

$c_y$ : Kraftbeiwert tangential zur Propellerachse.

Die Berechnung erfolgt also durch Iteration. Da der Propeller oder Lüfter durch die Blattzahl, den Verlauf der Teilung, den Blattwinkel β sowie die Beiwerte von Auftrieb und Widerstand als Funktion des relativen Radius bestimmt ist, wird zunächst der Anstellwinkel α vorgegeben, daraus $\Phi_\alpha = \beta - \alpha$ und Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte $c_a$, $c_w$ nach

$$\Phi_a = \arctan\left(\frac{V(1+a_v)}{\Omega r(1-a_\Omega)}\right) \qquad (4)$$

berechnet, woraus sich $a_v$ und $a_\Omega$ ergeben.

Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis die Differenz $|\Phi_a - \Phi_\alpha|$ gering genug ist, wodurch sich die Verwindung β aus $\Phi_\alpha$ ergibt.

Die Blatt-Tiefe läßt sich dann mittels der Grundrißgleichung

$$\left(\frac{c}{R}\right)\frac{c_a}{\zeta} = \left(\frac{4\pi}{B}\right)\frac{\lambda G}{\sqrt{1+x^2}} \qquad (5)$$

bestimmen, wobei der Formfaktor ζ aus der Schubvorgabe, also der gewünschten statischen Druckdifferenz berechnet wird und G die Goldstein-Funktion ist.

Die Goldstein-Funktion ist definiert als

$$G = \frac{Fx^2}{1+x^2} \tag{6}$$

$$\text{mit } x = \frac{\Omega r}{V} \tag{7}$$

wobei F:Prandl'sche Näherungsfunktion

x : reziproker lokaler Fortschrittsgrad

Ω : Winkelgeschwindigkeit

r : lokaler Radius

V : axiale Anströmungsgeschwindigkeit ist.

Der erste Optimierungsalgorithmus ermittelt so ein Optimum für die Lastverteilung. Bei der Ermittlung des Optimums werden folgende Formeln genutzt:

Das Verhältnis der Verschiebungsgeschwindigkeit in axialer Richtung zur axialen Anströmgeschwindigkeit wird durch ζ gekennzeichnet und ist als

$$\zeta = \frac{I_1}{2I_2}\left(1-\sqrt{1-\frac{4I_2T_c}{I_1^2}}\right) = \frac{V'}{V} \tag{8}$$

definiert.

Dabei ergibt sich $I_1$ und $I_2$ aus

$$I_1 = 4\int_0^1 G(1-\frac{D/L}{x})\xi d\xi \qquad (9)$$

$$I_2 = 2\int_0^i \frac{G(1-\frac{D/L}{x})\xi d\xi}{x^2+1} \qquad (10)$$

und der Schubkoeffizient $T_c$ zu

$$T_c = \zeta \cdot I_1 - \zeta^2 \cdot I_2 \qquad (11)$$

wobei D/L das Verhältnis der radialen Verschiebung des Blattes und

$\xi$ die Stellen auf dem Blatt, an denen die Geschwindigkeit bestimmt wird

als Verhältnis

$$\xi = \frac{r}{R} \qquad (12)$$

angibt.

Der Blattwinkel $\beta$ an jedem radialen Ort ergibt sich aus der Summe aus Verwindungswinkel $\Phi$ und Anstellwinkel $\alpha$, wobei sich der Verwindungswinkel $\Phi$ ergibt zu

$$\phi = \tan^{-1}\left[ (\frac{\lambda}{\xi})(1+\frac{1}{2}\zeta) \right] \qquad (13)$$

wobei $\frac{1}{2}\zeta$ den Schlupf angibt.

Der Wirkungsgrad des Lüfters bzw. Rotors ergibt sich dann zu

$$\eta = \frac{\int_0^1 \eta_e \left( \frac{dT_c}{d\xi} \right) d\xi}{T_c} = \frac{T_c}{P_c} \qquad (14)$$

wobei $P_c$ der Leistungskoeffizient ist und $\eta_e$ sich berechnet aus

$$\eta_e = \frac{\tan\phi}{\tan(\phi+\varepsilon)} \left( \frac{1}{1+\frac{1}{2}\zeta} \right) \qquad (15)$$

mit

$$\varepsilon = \tan^{-1}(D/L) \qquad (16)$$

Bei einem Axiallüfter wird das Optimierungsverfahren wie folgt modifiziert:

Die Blattspitzen-Winkelberechnung entfällt, die induzierte axiale Geschwindigkeit $a_v$ wird gleich Null gesetzt und die Volumenziffer φ wird gemäß Bernoulli geändert in: $\varphi - \left(\frac{J}{\pi}\right)^2$, wobei $\frac{J}{\pi}$ der Fortschrittsgrad ist und definiert ist

zu $\frac{\varphi}{1-\nu^2}$ (mit ν : Nabenverhältnis) bzw. zu $\frac{V}{\Omega R_T}$ (mit V : Anströmgeschwindigkeit, Ω : Drehgeschwindigkeit, $R_T$ : Blattspitzenradius).

Da bekannte Feldverfahren, insbesondere im Hinblick auf Optimierungsrechnungen sehr rechenintensiv sind, empfiehlt sich für die Untersuchung der Aeroakustik der Lüfter und deren Auslegung ein Singularitätenverfahren oder ein Verfahren wie nach Larrabee, welches dann, wie Versuche gezeigt haben, mit einem Optimierungsalgorithmus zu einer angenähert aerodynamisch optimalen Blattgeometrie führt. Im Falle von festen Grenzflächen in einer Strömung können schallerzeugende Kräfte durch eine Verteilung von Dipol-Singularitäten an der Oberfläche eines Lüfter(blatt)profils ersetzt werden. Aus den lokalen Auftriebsbeiwerten folgen damit als Ursache des erzeugten Luftstroms die integralen aerodynamischen Beiwerte der Druckdifferenz vor und hinter dem Gebläse und der Leistung. Der Wirkungsgrad ist dann dem Schub direkt und der Leistung umgekehrt proportional. Wie Vergleiche zwischen Theorie und Experiment gezeigt haben, läßt sich die Aerodynamik im Entwurfspunkt E nahe dem Wirkungsgradmaximum mit ausreichender Genauigkeit theoretisch vorhersagen.

Vorteilhaft ist ferner vorgesehen, daß zur Berechnung und Optimierung in der zweiten Phase die aus der Optimierung der ersten Phase hervorgegangene Geometrie bzw. aerodynamischen Beiwerte als Vorgabe verwendet werden. Für die erste akustische Optimierung wird eine optimale Pfeilung der Blattgeometrie zur Dekorrelation schallerzeugender Wirbelstrukturen an der Blatthinterkante und die Blattiefe im Entwurfspunkt E mit einem Entwurfscode DESI2, welcher ein halbempirisches Verfahren zur Berechnung von stochastischem Lärm ist, berechnet. Dekorrelation bedeutet dabei das Beeinflussen von makroskopischen Wirbelstrukturen so, daß kleinere Wirbelstrukturen entstehen. Saugspitzen, die zu unangenehmem Pfeifen führen, können zusätzlich zu einem frühen Umschlagen von laminarer zu turbulenter Strömung führen, wodurch weitere Schallquellen entstehen. Die Saugspitze kann mit dem LBS-Code berechnet werden. Damit kann die Größe des Schallquellenfeldes infolge Turbulenz abgeschätzt werden.

LBS bedeutet Lifting Body Surface-Verfahren, welches ein rechnergestütztes Singularitäten- oder Panelverfahren zur Berechnung von Aerodynamik und Akustik (LBS-Code AERO bzw. AKU) umströmter Körper ist. Als Panel oder Singularität wird ein bestimmter Bereichsausschnitt auf dem Lüfterblatt bezeichnet. Für diesen jeweiligen Ausschnitt kann ein Koordinatensystem definiert werden mit $\xi$, $\eta$, $\zeta$, wobei $\zeta$ die Normale auf die Panelfläche wiedergibt. Außerhalb der Blattoberfläche wird zur Berechnung des akustischen Drucks -zur Berechnung der Aerodynamik auf dieser - ein Beobachter-Kontrollpunkt, z.B. in Form eines Mikrophons, gebildet. Der Abstand zur Panelfläche wird mit d bezeichnet. Propeller bzw. Lüfter und Mikrophon bewegen sich relativ zueinander, wobei definitionsgemäß sich beim LBS-Code AKU das Mikrophon während einer Gesamtrechnung einmal um $2\pi$ bewegt.

Die Berechnung des akustischen Drucks p ergibt sich durch Ableitung der Potentialfunktion nach der Zeit (durch Ableitung derselben Potentialfunktion nach den Koordinaten ergeben sich die entsprechenden Formeln zur Berechnung der Aerodynamik mit Hilfe des LBS-Codes AERO) folgende Formel:

$$-4\pi p = \frac{1}{a_\infty}\frac{\partial}{\partial t}\int_S \frac{a_\infty \rho_\infty V + \Delta p \cos\Theta}{d(1-M_d)}dS$$

$$+\int_s \frac{(p-p_\infty)\cos\Theta}{d^2(1-\mathrm{M}_d)}dS \qquad (17)$$

$$+\frac{1}{a_\infty^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\int_S \frac{a_\infty^2 \rho_\infty \delta}{d(1-\mathrm{M}_d)}dS$$

wobei

$\Theta$ der Winkel zwischen dem Abstandsvektor $\vec{d}$ und dem Einheitsvektor normal zum Panel $\vec{n}$

$a_\infty$ die Schallgeschwindigkeit

$\rho_\infty$ die Dichte der ungestörten Strömung

V die Normalgeschwindigkeitskomponente der Anströmung

$M_d$ die Machzahl in Richtung Panel (=Quelle)-Beobachter

$p, p_\infty$ aerodynamischer Druck am Panel

S die Panelfläche

$\delta$ die Grenzschichtdicke ist.

Der erste Term gibt den Dickenlärm an, berechnet entsprechend der Profildicke. Der zweite Term repräsentiert den Dipollärm und der dritte Term berücksichtigt den Quadrupol- bzw. Grenzschichtlärm. Jeder Schallquellentyp wird also separat untersucht. Im Falle stationärer Strömung sind d und $M_d$ Funktionen der Zeit.

Vorteilhaft ist vorgesehen, daß der LBS-Code AKU anschließend den Druckzeitverlauf des Lüfterdrehklangs berechnet. Die somit ermittelten theoretischen Werte stimmen gut mit experimentell ermittelten überein. Das Entwurfsverfahren liefert somit hinsichtlich periodischer Signale von Lüftern eine gute Konstruktionsgrundlage.

Wie Experimente gezeigt haben, sind jedoch weiterhin Zonen turbulenter, abgelöster oder mit Aufrollwirbeln behafteter Strömungen vorhanden, welche stochastischer Natur sind und nicht unmittelbar berechnet werden können. Zur vollständigen Nachrechnung bzw. Korrektur der Lüfterakustik ist daher noch ein zusätzlicher halbempirischer Ansatz auf der Basis von Turbulenzmodellen erforderlich, wie dies mit dem Entwurfscode DESI2 möglich ist. Mit diesem Code kann die Aeroakustik eines Lüfters befriedigend nachgerechnet bzw. korrigiert werden. Erfindungsgemäß koppelt man das Nachrechnungsverfahren mit einem Optimierungscode, so kann diese Arbeit mit dem zweiten Optimierungsalgorithmus durchgeführt werden. Es wird somit beispielsweise nach einer

Geometrieänderung in kleinen Schritten zuerst die Aerodynamik und dann die Akustik nachgerechnet, wobei ein Minimum an Lärm unter Beibehaltung der aerodynamischen Leistung als Kriterium gewählt wird. Die Geometrie kann beispielsweise in der Blattiefe und Verschiebung einzelner Schnitte geändert werden, so daß sich aus einem rechteckigen ein sichelförmiger Blattgrundriß ergibt. Allerdings sind auch andere Optimierungen denkbar, wie z. B. die Verwindung der Blätter, die Blattzahl gemeinsam mit dem Durchmesser oder einer asymmetrischen Aufteilung der Blätter etc.

Bei einer stochastischen Zeitabhängigkeit von Geschwindigkeiten wie in turbulenten Grenzschichten können die stochastischen Geräusche nicht den aerodynamischen Quellen (wie bei periodischem Schall nach Gleichung (17)) zugeordnet werden. Es sind statistische Aufschlüsselungen in Raum- und Zeitfaktoren erforderlich, weswegen Turbulenzmodelle gebildet werden. Es findet eine Beschreibung mit Transferfunktionen statt, die auf experimentell bestimmten Auto- und Kreuzkorrelations-Funktionen der aerodynamischen Belastungen beruhen.

Das DESI2-Verfahren beruht auf diesen Turbulenzmodellen. Die Schallquellen werden dabei als Dipole formuliert, wobei sich ein Leistungsspektrum ergibt. Auch zur Berechnung des Breitbandlärms nach diesem Verfahren wird das Lüfter- oder Rotorblatt ähnlich paneliert wie beim DESI1-Verfahren.

Das akustische Leistungsspektrum des Seitenband-Spektrums ergibt sich dimensionslos zu

$$\langle S(f,d,\Psi)\rangle = p_o \int_{\xi\ \min}^{\infty} \xi d\xi \left( \sum_{n=n_1}^{n_2} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \mathrm{E}_{\mathrm{int}} \mathrm{E}_l \mathrm{E}_{turb} \mathrm{E}_{aero} \mathrm{E}_{span} \right) \qquad (18)$$

mit $\xi = \nu\Delta$; $\nu$ : Nabenverhältnis; $\Delta$ : charakteristische Turbulenzlänge; $\Psi$ : Winkel zwischen der Rotorachse und $R_p$, also dem Abstand zwischen Lüfterzentrum und Beobachter-Kontrollpunkt.

$E_{int}$ ist die Interferenz des Schalls im Fernfeld

$$E_{int} = \left[ \cos\mu \cos\Psi - \frac{(nB - I)\sin\mu}{M_0 (f/\Omega)} \right]^2 J_{nB-1}{}^2 (M_0 \frac{f}{\Omega} \sin\Psi) \qquad (19)$$

$E_I$ ist die Modulation der Frequenzen der Harmonischen infolge Turbulenz

$$E_I = J_I^2 \left( \frac{M_0}{M_c} \sqrt{\left(\frac{V_c}{\Delta\Omega}\right)^2 \xi^2 - \left(\frac{f}{\Omega} - nB\right)} \right) \qquad (20)$$

$E_{turb}$ ist der Einfluß der Turbulenz nach Liepmann's Turbulenzmodell

$$E_{turb} = \frac{(\frac{V_c}{\Delta\Omega})^2 \xi^2 - (\frac{f}{\Omega} - nB)}{(1 + 4\pi^2 \xi^2)^3} \qquad (21)$$

und

$$E_{aero} = \frac{J_0^2 (\frac{M_0^2 \tilde{k}^2}{1 - M_0^2}) + J_1^2 (\frac{M_0^2 \tilde{k}^2}{1 - M_0^2})}{1 + \frac{2\pi}{1 - M_0^2} \tilde{k}_T} \qquad (22)$$

$$E_{span} = (1 + \tilde{k}_c c / \pi a_\infty)_{-1} \qquad (23)$$

bescheiben die Transferfunktionen bzw. das Verhalten der Belastung auf dem Blatt im Hinblick auf konvektierte Nachläufe.

Mittels der akustischen Spektraldichte bzw. -leistung kann unmittelbar der Schallpegel des Hinterkanten- und Seitenband-Geräusches berechnet werden.

Das Leistungsspektrum des Breitbandspektrums wird mit Hilfe der Fouriertransformation der Kreuzkorrelationsfunkton des Druckes berechnet:

$$\langle S(f,d,\tilde{a})\rangle = \frac{1}{\rho a_\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d\tau \, \overline{\langle p(d,\tilde{a},t-\tau/2)\, p(d,\tilde{a},t+\tau/2)\rangle} e^{-\Omega\pi f\tau} \qquad (24)$$

Gleichung (24) berücksichtigt alle Korrelationen in Raum und Zeit, wobei

$\tilde{\alpha}$ Winkel zwischen $R_p$ und der Hinterkante

$a_\infty$ Schallgeschwindigkeit

$\tau$ Zeitpunkt der Emissionen

t Zeit

p Druck

$\rho$ Dichte

f Frequenz

d Abstand Beobachter-Kontrollpunkt zur Panelfläche ist.

Die erste Methode, die in Code DESI 2 zur Berechnung des Hinterkantengeräuschs implementiert wurde, ist die Methode von Howe. Als Transfer-Funktion wird dabei eine Wirbel-Korrelationsfunktion eingeführt, die aus der Messung stochastisch schwankender Wandgrenzschichten stammt. Die Schallquellen werden erzeugt durch einfallende und abgelöste Wirbelschichten nahe einer flachen Platte. Das Fernfeldergebnis dieser Rechnung ist

$$p(f,\tilde{\alpha},\tilde{\Theta}) = \frac{p_0(f,l,V_c)}{d} \sin\tilde{\alpha} \cos^{3/2}\beta \, \sin(\tilde{\Theta}/2) \qquad (25)$$

$$x \frac{(1-M_0+M_c)}{(1+M_0\cos\tilde{\Theta})^{3/2}(1+(M_0-M_c)\cos\tilde{\Theta})}$$

Wobei $p_0$ die Transferfunktion beschreibt. Die Frequenz f folgt aus der Strouhal-Zahl

$$S_l = f\frac{l}{V_c} \tag{26}$$

Hier ist $l$ der Wirbeldurchmesser, $V_c$ die Wirbel-Konvektionsgeschwindigkeit, $\tilde{\Theta}$ der Winkel zwischen d und der Tangente an der Hinterkante,

$M_0$ die Anströmungs-Machzahl und $M_c$ die Konvektions-Machzahl mit $M_c = \frac{V_c}{a_\infty}$.

Nach Grosveld und Schlinker sind die theoretischen Ergebnisse an den gemessenen akustischen Daten eines überströmten Flügelsegments skaliert. Danach ist akustische Spektraldichte

$$\frac{\langle S(f,d,\tilde{\alpha})\rangle}{p_{ref}} = \sum_{l=1}^{l_{max}} K_2 U^5 BD \frac{\delta}{d^2} (f/f_{max})^4 \left[(f/f_{max})+0.5\right]^{-4} \tag{27}$$

mit der Richtcharakteristik

$$D = \frac{\sin^2(\tilde{\Theta}/2)\cos\beta^3 \sin^2(\tilde{\alpha})}{(1+M_0\cos\Theta)\left[1+(M_o - M_c)\cos\Theta\right]^2} \tag{28}$$

die um den Hinterkanten-Pfeilwinkelfaktor cosß für Code DESI 2 erweitert ist. Bei der Einführung des Pfeilwinkels wird der Faktor $K_2$ neu skaliert.

Es bedeuten:

$K_2$ empirisch ermittelte Konstante; wird nach Validierung durch Experiment angepaßt

U Anströmgeschwindigkeit

B Blattzahl

$\delta$ Grenzschichtdichte.

Die Mittelfrequenz ist definiert zu

$$f_{max} = S_{max} \frac{U}{\delta} \qquad (29)$$

mit $S_{max}$ = 0.1. Auch zur Berechnung des Breitbandlärms mit Code DESI 2 wird das Propellerblatt ähnlich paneliert wie im Fall von Code DESI 1. Dabei werden die Schallquellen in der Nähe des Kutta-Panels (angeordnet an der Hinterkante, nur Tangentialgeschwindigkeit per definitionem dort wirksam) angeordnet.

Gemäß einer besonderen Ausgestaltung ist vorgesehen, daß in der zweiten Phase die zweite akustische Optimierung der Blattgeometrie oder Blatteilung in Form einer asymmetrischen Teilung der Blätter zur Schallminimierung berechnet wird. Dabei wird der Lärm spektral umverteilt oder zum Teil durch Interferenz ausgelöscht. Bei einer Änderung der spektralen Verteilung wird der Lärmpegel bestimmter Frequenz auf Gebiete benachbarter Frequenzen so umverteilt, daß insgesamt kleinere Lärmpegel entstehen. Durch diese in den zweiten Optimierungsalgorithmus integrierte Variationsmöglichkeit der Blatteilung oder Änderung der Blattgeometrie ist eine weitere Lärmreduzierung mittels des einen Verfahrens möglich.

Vorteilhaft ist vorgesehen, daß in der zweiten Phase zur zweiten akustischen Optimierung der Blatteilung oder Blattgeometrie eine Berechnung unter Berücksichtigung von drei unmittelbar vor dem Einlauf des Lüfters mit Winkeln von $\psi$ = 60°, 70° und 75° zum Lüfterzentrum angeordneten Mikrophonen

ebenfalls mit dem Panelverfahren zur Berechnung der Akustik, genannt LBS-Code AKU, im Entwurfspunkt E erfolgt.

Ausgangsgleichung des LBS-Codes ist eine Integro-Differentialgleichung, die sowohl die akustischen als auch die aerodynamischen Felder stationärer/instationärer reibungsbehafteter kompressibler Unterschallströmungen beschreibt. Die Lösung der aeroakustischen Potentialgleichung wird dabei durch die Differentiation eines Geschwindigkeits- und Beschleunigungspotentials erhalten. Als Ergebnis erhält man das Geschwindigkeitsfeld als Ableitung der Potentiale nach den Koordinaten. Der dritte Term, der den Einfluß der Scherschicht in Form eines Volumenintegrals beschreibt, kann zur Berechnung der Reibung benutzt werden. Dazu ist eine Umwandlung des Integrals in ein Oberflächenintegral zur Beschreibung von Ausblaseschwindigkeit notwendig, die eine Grenzschicht simulieren und mit denen die Randbedingung an der Blattoberfläche entsprechend modifiziert werden kann (Transpirationsmethode). Der akustische Druck folgt unmittelbar aus der Potentialgleichung durch Differentiation nach der Zeit anstatt nach den Koordinaten.

Ein Ausführungsbeispiel wird nachfolgend unter Bezugnahme auf eine Zeichnung näher erläutert. Darin zeigt:

Fig. 1 einen zu optimierenden rechteckigen Blattgrundriß,

Fig. 2 einen Schnitt durch das Blatt gemäß Fig. 1,

Fig. 3 ein Wirkungsgrad $\eta$ - Volumenstrom $\dot{V}$ - Diagramm

Fig. 4 eine Draufsicht auf ein erfindungsgemäß sichelförmiges Blatt,

Fig. 5 eine schematische Ansicht in axialer Richtung eines Axiallüfters,

Fig. 6 eine schematische Seitenansicht eines Axiallüfters, und

Fig. 7 eine schematische Ansicht von vier Optimierungsschritten.

**Fig. 1** zeigt schematisch einen Blattgrundriß 10, welcher in der dargestellten axialen Ansicht eine rechteckige Projektionsfläche aufweist und einerseits an einer Nabe 11 und andererseits an einem Mantelelement 12 befestigt ist. Der Pfeil A deutet die Drehrichtung an. Die Linie 13 zeigt eine Schnittlinie des Laminarprofils des Blattes 10.

**Fig. 2** zeigt einen Schnitt der Fig. 1 entsprechend der Schnittlinie 13. Die Blatttiefe 14 ist am Laminarprofil ebenso zu erkennen, wie der Verwindungswinkel $\beta$.

**Fig. 3** zeigt ein $\eta$-$\dot{V}$-Diagramm, in dem der Entwurfspunkt E nahe dem Wirkungsgradmaximum eingetragen ist.

**Fig. 4** zeigt ähnlich wie Fig. 1 einen Blattgrundriß 10, welcher mit einem Mantelelement 12 und einer Nabe 11 verbunden ist und eine sichelförmige Ausgestaltung aufweist. Das sichelförmige Blatt 10 weist an seiner Vorderkante 15 und an seiner Hinterkante 16 jeweils eine starke Vorwärtspfeilung 17 und eine starke Rückwärtspfeilung 18 auf.

**Fig. 5** zeigt in axialer Richtung eine schematische Darstellung eines Axiallüfters 19 mit sieben Blättern 10. Gut zu erkennen ist die unterschiedliche Blatteilung t.

**Fig. 6** zeigt eine Seitenansicht eines schematisch dargestellten Axiallüfters 19 mit Blättern 10 und einem Mantelelement 12, dem auf einer seiner Seiten Mikrophone M1, M2 und M3 unter dem Winkel $\psi$ = 60°, 70° und 75°, bezogen auf die Lüfterachse 20, zugeordnet sind.

Um den Lärm von Lüftern 19 durch die erfindungsgemäße aeroakustisch optimale Formgebung merklich zu senken, ohne daß dabei die Leistung des Lüfters 19 verschlechtert wird, kann nun in vorteilhafter Weise wie folgt vorgegangen werden.

Das Blatt 10, welches ein Laminar- oder Kreisprofil hat, ist gemäß Fig. 1/2 vorgegeben. Die Blatt-Tiefe und-Verwindung $\beta$ wird mit einem Entwurfscode DESI1 (unter Verwendung der vorstehenden Formeln) unter Berücksichtigung der Profilpolaren berechnet, wobei ein Optimum für eine elliptische Lastverteilung im Entwurfspunkt E (vgl. Fig. 3) berechnet wird. Das DESI1-Verfahren ist ein Singularitätenverfahren, mit dem die Aerodynamik an bzw. auf den Singularitäten bzw. Paneln auf der Oberfläche des Lüfterblattes berechnet wird.

Die aus der vorgenannten Berechnung sich ergebenden Geometriedaten und aerodynamischen Beiwerte sind nun Grundlage für die Berechnung der optimalen Pfeilungen 17, 18 des Blattprofils 10 zur Dekorrelation schallerzeugender Wirbelstrukturen an der Blatthinterkante 16, also zur Beeinflussung makroskopischer Wirbelstrukturen so, daß kleinere Wirbelstrukturen entstehen. Aus dieser Berechnung folgt ebenfalls die Blattiefe 14, berechnet im Entwurfspunkt E mit Entwurfscode DESI2 und einer Mikrophonposition etwa 1 m vom Einlauf auf der Rotorachse mit einem Winkel $\psi$ = 0° (vgl. Fig. 6). Das DESI2-Verfahren wird zur Berechnung ausschließlich stochatisch erzeugter akustischer Signale genutzt. Die Änderung der Blattgeometrie und der asymmetrischen Teilung t der Rotorblätter 10 zur Schallminderung infolge veränderter Spektralverteilung und Auslöschung erfolgt aus einer Berechnung im Entwurfspunkt E mit LBS-Code AERO und AKU, dem bereits im vorstehenden beschriebenen Lifting Body Sur-

face-Verfahren, unter Anwendung auf drei Mikrophonpositionen M1, M2 und M3 unmittelbar vor dem Einlauf des Lüfters 19 unter dem Winkel $\psi$ = 60°, 70° und 75°, bezogen auf die Lüfterachse 20 (vgl. Fig. 6). Das Ergebnis einer solchen Optimierung zeigt **Fig. 7**, wobei die einzelnen Optimierungsschritte I - IV skizziert sind.

## Bezugszeichenliste

| | |
|---|---|
| 10 | Blattgrundriß |
| 11 | Nabe |
| 12 | Mantelelement |
| 13 | Schnittlinie des Laminarprofils |
| 14 | Blattiefe |
| 15 | Vorderkante |
| 16 | Hinterkante |
| 17 | Vorwärtspfeilung |
| 18 | Rückwärtspfeilung |
| 19 | Axiallüfter |
| 20 | Lüfterachse |
| A | Pfeil (für Drehrichtung) |
| β | Verwindungswinkel |
| E | Entwurfspunkt |
| t | Blatteilung |
| M1 | Mikrophon |
| M2 | Mikrophon |
| M3 | Mikrophon |
| ψ | Winkel Mikrophon-Lüfterachse |

# Patentansprüche

1. Verfahren zur aeroakustischen Optimierung eines Axiallüfters, bei dem auf der Basis einer numerischen Computersimulation in einer ersten Phase eine aerodynamische Optimierung der Blattgeometrie des Axiallüfters durch Anwendung eines inversen numerischen Entwurfsverfahrens in Verbindung mit einem ersten Optimierungsalgorithmus erfolgt,
**dadurch gekennzeichnet,**
**daß** in einer zweiten Phase in Kombination mit einem zweiten Optimierungsalgorithmus

- zunächst eine erste akustische Optimierung der Blattgeometrie zur Minderung des stochastischen Lärms mit Hilfe eines weiteren numerischen Verfahrens auf der Basis von Turbulenzmodellen, und
- anschließend eine zweite akustische Optimierung der Blattgeometrie und Blatteilung zur Minimierung des periodischen Lärmanteils mit Hilfe eines Singularitätenverfahrens berechnet wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1,
**dadurch gekennzeichnet,**
**daß** in der ersten Phase als inverses numerisches Entwurfsverfahren das Verfahren nach Larrabee in modifizierter Form oder ein Panelverfahren LBS AERO für ummantelte Propeller zur Anwendung kommt und als Berechnungsvorgaben die Polare eines Profils (10) und damit die Blattiefe (14) und eine Verwindung β für eine elliptische Lastverteilung im Entwurfspunkt E mit einem Entwurfscode DESI1 berechnet wird, so daß der erste Optimierungsalgorithmus ein Optimum für die Lastverteilung ermittelt.

3. Verfahren nach Anspruch 2,
**dadurch gekennzeichnet,**
**daß** zur Berechnung und Optimierung in der zweiten Phase die aus der Optimierung der ersten Phase hervorgegangenen Geometrien (10) und aerodynamischen Beiwerte als Vorgabe verwendet werden und für die erste akustische Optimierung eine optimale Pfeilung (17, 18) der Blattgeometrie zur Dekorrelation schallerzeugender Wirbelstrukturen an der Blatthinterkante (16) und im Zusammenhang damit erneut die Blattiefe (14) im Entwurfspunkt E mit Entwurfscode DESI2 berechnet wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3,
**dadurch gekennzeichnet,**
**daß** der Entwurfscode DESI2 den Schallpegel in einem Abstand von ca. 1 m vom Einlauf der Lüfterachse (20) entfernt in einem Winkel $\psi = 0°$ berechnet.

5. Verfahren nach Anspruch 4,
**dadurch gekennzeichnet,**
**daß** in der zweiten Phase eine zweite akustische Optimierung der Blattgeometrie und Blatteilung t mit Hilfe eines Singularitäten- oder Panelverfahrens, insbesondere des LBS-Codes erfolgt.

6. Verfahren nach Anspruch 5,
**dadurch gekennzeichnet,**
**daß** mit Hilfe des Panelverfahrens LBS AERO zur vorliegenden Geometrie (10, 12) die aerodynamischen Beiwerte und damit in der zweiten Phase die zweite akustische Optimierung der Blatteilung t oder Blattgeometrie (10) zur Änderung der spektralen Verteilung oder Interferenz eine Schallminderung mit dem LBS-Code AKU berechnet wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6,
**dadurch gekennzeichnet,**
**daß** in der zweiten Phase zur zweiten akustischen Optimierung der Blatteilung und Blattgeometrie (10, 12) eine Lärmberechnung unter Berücksichtigung von drei umittelbar vor dem Einlauf des Lüfters (19) mit Winkeln von $\psi = 60°$, 70° und 75° zum Lüfterzentrum angeordneten Mikrophonpositionen M1, M2, M3 mit LBS-Code im Entwurfspunkt E erfolgt.

8. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche,
**dadurch gekennzeichnet,**
**daß** mittels des Verfahrens Gebläse, Propeller und/oder Rotoren, insbesondere von Windkraftanlagen optimiert werden.

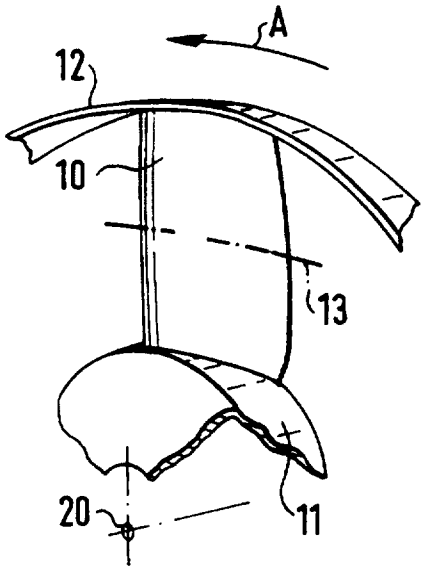



FIG.1

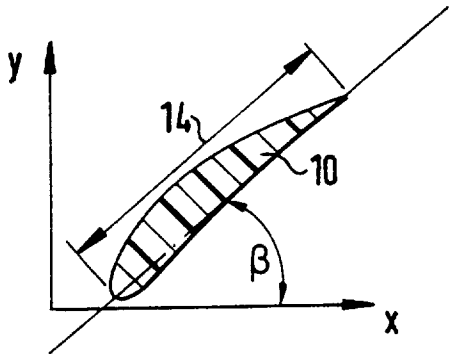



FIG.2

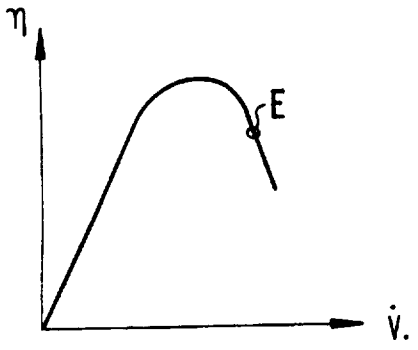



FIG.3

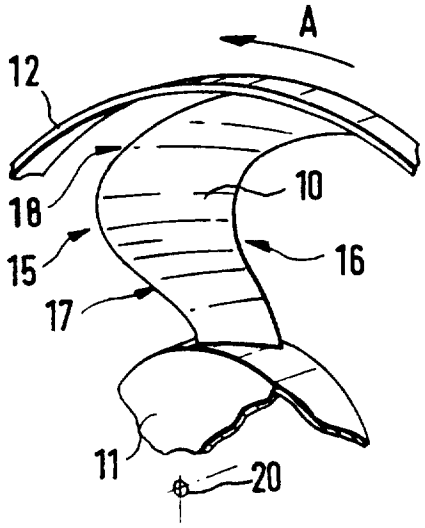



FIG.4

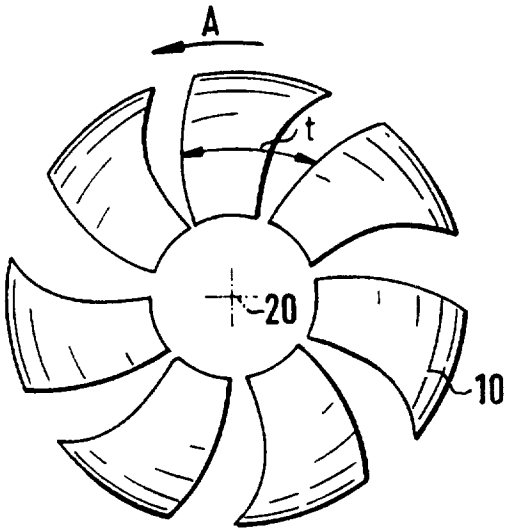



FIG.5

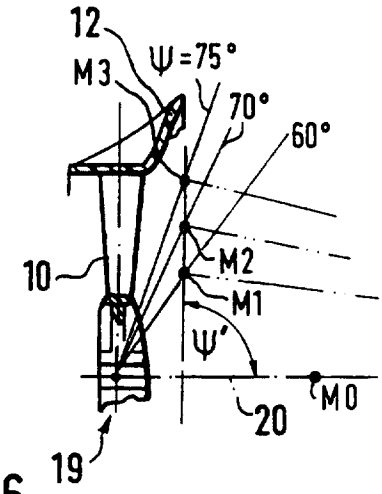



FIG.6

FIG.7-I

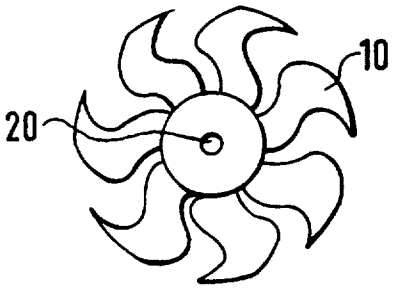
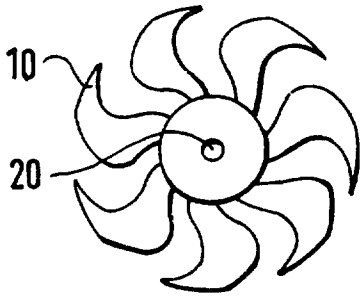



FIG.7-II



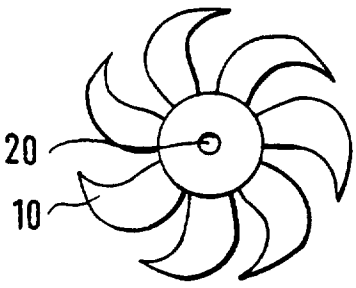




FIG.7-III

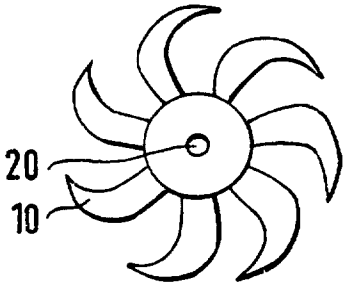



FIG.7-IV

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Int ional Application No
PCT/EP 97/04205

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC 6 F04D29/38 F04D29/32

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
IPC 6 F04D

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category ° | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|---|---|---|
| A | CAROLUS: "Rechnergestützte Entwicklung von Axialgebläsen für den Einzatz in Kraftfahrzeugen" ATZ AUTOMOBILTECHNISCHE ZEITSCHRIFT, vol. 93, no. 2, February 1991, STUTTGART, pages 96-100, XP000206766 --- | 1-8 |
| A | FR 2 723 408 A (LICENTIA PATENT VERWALTUNGS GMBH) 9 February 1996 see the whole document --- | 1-8 |
| A | LOHMANN: "Aeroakustische Optimierung einer Lüftergeometrie" DLR-NACHRICHTEN, no. 78, May 1995, BRAUNSCHWEIG, pages 15-22, XP002047806 cited in the application --- | 1-8 |
| | -/-- | |

[X] Further documents are listed in the continuation of box C.

[X] Patent family members are listed in annex.

° Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

"&" document member of the same patent family

1

| Date of the actual completion of the international search | Date of mailing of the international search report |
|---|---|
| 21 November 1997 | 16/12/1997 |

| Name and mailing address of the ISA | Authorized officer |
|---|---|
| European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2<br>NL - 2280 HV Rijswijk<br>Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,<br>Fax: (+31-70) 340-3016 | Teerling, J |

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 1992)

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Int. .tional Application No
PCT/EP 97/04205

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|---|---|---|
| A | DE 43 26 147 A (LICENTIA PATENT-VERWALTUNGS-GMBH) 24 November 1994 cited in the application | |
| A | DE 31 37 114 A (BOLT BERANEK AND NEWMAN) 22 April 1982 cited in the application | |
| A | WO 91 07593 A (AIRFLOW RESEARCH AND MANUFACTURING CORPORATION) 30 May 1991 cited in the application | |
| A | US 5 320 493 A (SHIH) 14 June 1994 | |

1

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No
PCT/EP 97/04205

| Patent document cited in search report | Publication date | Patent family member(s) | Publication date |
|---|---|---|---|
| FR 2723408 A | 09-02-96 | NONE | |
| DE 4326147 A | 24-11-94 | NONE | |
| DE 3137114 A | 22-04-82 | US 4358245 A | 09-11-82 |
| | | JP 1696904 C | 28-09-92 |
| | | JP 3059279 B | 10-09-91 |
| | | JP 57083695 A | 25-05-82 |
| WO 9107593 A | 30-05-91 | US 5064345 A | 12-11-91 |
| | | DE 69021076 D | 24-08-95 |
| | | DE 69021076 T | 14-12-95 |
| | | EP 0500782 A | 02-09-92 |
| | | ES 2076511 T | 01-11-95 |
| | | JP 5501744 T | 02-04-93 |
| US 5320493 A | 14-06-94 | NONE | |

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Inte ionales Aktenzeichen
PCT/EP 97/04205

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
IPK 6 F04D29/38 F04D29/32

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole )
IPK 6 F04D

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

| Kategorie° | Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile | Betr. Anspruch Nr. |
|---|---|---|
| A | CAROLUS: "Rechnergestützte Entwicklung von Axialgebläsen für den Einzatz in Kraftfahrzeugen" ATZ AUTOMOBILTECHNISCHE ZEITSCHRIFT, Bd. 93, Nr. 2, Februar 1991, STUTTGART, Seiten 96-100, XP000206766 --- | 1-8 |
| A | FR 2 723 408 A (LICENTIA PATENT VERWALTUNGS GMBH) 9.Februar 1996 siehe das ganze Dokument --- | 1-8 |
| A | LOHMANN: "Aeroakustische Optimierung einer Lüftergeometrie" DLR-NACHRICHTEN, Nr. 78, Mai 1995, BRAUNSCHWEIG, Seiten 15-22, XP002047806 in der Anmeldung erwähnt --- | 1-8 |

-/--

[X] Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

[X] Siehe Anhang Patentfamilie

° Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

1

| Datum des Abschlusses der internationalen Recherche | Absendedatum des internationalen Recherchenberichts |
|---|---|
| 21.November 1997 | 16/12/1997 |

| Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde | Bevollmächtigter Bediensteter |
|---|---|
| Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2<br>NL – 2280 HV Rijswijk<br>Tel. (+31–70) 340–2040, Tx. 31 651 epo nl,<br>Fax: (+31–70) 340–3016 | Teerling, J |

Formblatt PCT/ISA/210 (Blatt 2) (Juli 1992)

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Inte. .onales Aktenzeichen
PCT/EP 97/04205

C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

| Kategorie | Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile | Betr. Anspruch Nr. |
|---|---|---|
| A | DE 43 26 147 A (LICENTIA PATENT-VERWALTUNGS-GMBH) 24.November 1994 in der Anmeldung erwähnt | |
| A | DE 31 37 114 A (BOLT BERANEK AND NEWMAN) 22.April 1982 in der Anmeldung erwähnt | |
| A | WO 91 07593 A (AIRFLOW RESEARCH AND MANUFACTURING CORPORATION) 30.Mai 1991 in der Anmeldung erwähnt | |
| A | US 5 320 493 A (SHIH) 14.Juni 1994 | |

1

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP 97/04205

| Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument | Datum der Veröffentlichung | Mitglied(er) der Patentfamilie | Datum der Veröffentlichung |
|---|---|---|---|
| FR 2723408 A | 09-02-96 | KEINE | |
| DE 4326147 A | 24-11-94 | KEINE | |
| DE 3137114 A | 22-04-82 | US 4358245 A | 09-11-82 |
| | | JP 1696904 C | 28-09-92 |
| | | JP 3059279 B | 10-09-91 |
| | | JP 57083695 A | 25-05-82 |
| WO 9107593 A | 30-05-91 | US 5064345 A | 12-11-91 |
| | | DE 69021076 D | 24-08-95 |
| | | DE 69021076 T | 14-12-95 |
| | | EP 0500782 A | 02-09-92 |
| | | ES 2076511 T | 01-11-95 |
| | | JP 5501744 T | 02-04-93 |
| US 5320493 A | 14-06-94 | KEINE | |