



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

⑫ PATENTSCHRIFT A5

⑯ Gesuchsnummer: 2992/81

⑯ Inhaber:
Kraftwerk Union Aktiengesellschaft,
Mülheim/Ruhr (DE)

⑯ Anmeldungsdatum: 08.05.1981

⑯ Erfinder:
Purcaru, Bebe-Titu, Mülheim/Ruhr (DE)

⑯ Patent erteilt: 27.03.1986

⑯ Vertreter:
Siemens-Albis Aktiengesellschaft, Zürich

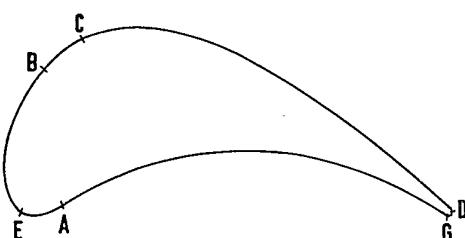
⑯ Patentschrift
veröffentlicht: 27.03.1986

⑭ Turbomaschinenschaufel.

⑮ Die Turbomaschinenschaufel weist eine im Bereich der Vorderkante, der Saugseite und der Hinterkante konvex und im Bereich der Druckseite konkav gekrümmte Profilkontur auf. Damit die Profilkontur mit geringem Aufwand an die strömungstechnischen und zugleich auch an die mechanischen Erfordernisse angepasst werden kann, ist die Profilkontur aus folgenden mit stetigem Kurvenverlauf ineinander übergehenden Profilabschnitten gebildet:

- Im Bereich der Vorderkante aus einem an einen ersten Kreisabschnitt (GA) sich anschliessenden ersten Ellipsenabschnitt (AE) und einem daran anschliessenden zweiten Ellipsenabschnitt (EB).
- Im Bereich der Saugseite aus einem an den zweiten Ellipsenabschnitt (EB) sich anschliessenden zweiten Kreisabschnitt (BC) und einem an den zweiten Kreisabschnitt (BC) sich anschliessenden Parabelabschnitt (CD) einer Parabel zweiter Ordnung.
- Im Bereich der Hinterkante aus einem an den Parabolabschnitt (CD) anschliessenden dritten Kreisabschnitt (DG), an welchen sich der erste Kreisabschnitt (GA) anschliesst.

Turbomaschinenschaufeln mit einer so ausgebildeten Profilkontur können in axial und in radial durchströmten Turbomaschinen eingesetzt werden.



PATENTANSPRÜCHE

1. Turbomaschinenschaufel mit einer im Bereich der Vorderkante der Saugseite und der Hinterkante konvex und im Bereich der Druckseite konkav gekrümmten Profilkontur, wobei die Profilkontur im Bereich der Druckseite durch einen ersten Kreisabschnitt und im Bereich der Saugseite durch einen zweiten Kreisabschnitt und einen daran anschliessenden Kurvenabschnitt einer Kurve zweiter Ordnung gebildet ist und wobei die gesamte Profilkontur einen stetigen Kurvenverlauf nimmt, gekennzeichnet durch die folgenden Merkmale:

- a) im Bereich der Vorderkante ist die Profilkontur durch einen sich an den ersten Kreisabschnitt (GA) anschliessenden ersten Ellipsenabschnitt (AE) und einen daran anschliessenden zweiten Ellipsenabschnitt (EB) gebildet,
- b) im Bereich der Saugseite ist die Profilkontur durch den sich an den zweiten Ellipsenabschnitt (EB) anschliessenden zweiten Kreisabschnitt (BC) und den sich an den zweiten Kreisabschnitt (BC) anschliessenden Kurvenabschnitt (CD) einer Parabel zweiter Ordnung gebildet,
- c) im Bereich der Hinterkante ist die Profilkontur durch einen sich an den Kurvenabschnitt (CD) und den ersten Kreisabschnitt (GA) anschliessenden dritten Kreisabschnitt (DG) gebildet.

2. Turbomaschinenschaufel nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die den ersten Ellipsenabschnitt (AE) bildende erste Ellipse und die den zweiten Ellipsenabschnitt (EB) bildende zweite Ellipse eine gemeinsame grössere Halbachse (V_0) besitzen und in dem gemeinsamen auf der grösseren Halbachse (V_0) liegenden Scheitelpunkt (E) ineinander übergehen.

3. Turbomaschinenschaufel nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die kleineren Halbachsen (W_{02} , W_{01}) der ersten und der zweiten Ellipse die gleiche Länge aufweisen.

4. Turbomaschinenschaufel nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass sämtliche Halbachsen (V_0 , W_{01} , W_{02}) der ersten und der zweiten Ellipse die gleiche Länge aufweisen.

5. Turbomaschinenschaufel nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der zweite Kreisabschnitt (BC) im Scheitelpunkt (C) der Parabel zweiter Ordnung in den Kurvenabschnitt (CD) der Parabel übergeht.

6. Turbomaschinenschaufel nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Parameter der die Profilkontur bildenden Kurven zweiter Ordnung zwischen Schaufelfuss und Schaufel spitze variieren und durch die folgenden Grössen definiert sind:

- a) Der in Richtung (x) eines Koordinaten-Hauptsystems (x-y) weisenden Profillänge (L),
- b) der Grösse des Halbachsenverhältnisses k_1 der den ersten Ellipsenabschnitt (AE) bildenden Ellipse,
- c) der Grösse des Halbachsenverhältnisses k_2 der den zweiten Ellipsenabschnitt (EB) bildenden Ellipse,
- d) der Länge der Halbachse (V_0), deren Verlängerung durch den Scheitelpunkt beider Ellipsen geht,
- e) der Grösse des Winkels (θ_0) der zwischen der Abszissenachse (V) eines ersten Koordinatensystems (V-W) einerseits und der Abszissenachse (x) des Koordinaten-Hauptsystems (x-y) andererseits aufgespannt wird, welch letzteres mit seiner Abszissenachse (x) im Bereich der Hinterkante und im Bereich der Vorderkante sowie mit seiner Koordinatenachse (y) im Bereich der Vorderkante an die Profilkontur tangiert, wobei auf der Abszissenachse (V) die Halbachse (V_0) liegt,
- f) der Länge des Scheitelkreisradius (R_2) der an den

zweiten Kreisabschnitt (BC) anschliessenden Parabel,

g) der Grösse des Winkels (Ψ_1) zwischen der Normalen im Punkt (A) des Überganges vom ersten Kreisabschnitt (GA) auf den ersten Ellipsenabschnitt (AE) einerseits und der

5 Ordinatenachse (Y) andererseits,

h) der Grösse des Winkels (Ψ_2) zwischen der Normalen im Punkt (B) des Überganges vom zweiten Ellipsenabschnitt (EB) auf den zweiten Kreisabschnitt (BC) einerseits und der Abszissenachse (x) andererseits,

10 i) der Länge der Koordinate (x_D) des Punktes (D) und

k) der Länge der Koordinate (y_D) des Punktes (D), wobei der Punkt (D) den Übergang vom Parabelabschnitt (CD) auf den dritten Kreisabschnitt (DG) markiert und die Koordinaten (x_D , y_D) Koordinaten des Hauptsystems (x-y) sind.

15

Die Erfindung bezieht sich auf eine Turbomaschinenschaufel gemäss Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

Eine derartige Turbomaschinenschaufel ist aus der DE-PS 976 494 bekannt. Die Profilkontur dieser bekannten Turbo-

maschinenschaufel wird im Bereich der Druckseite durch einen ersten Kreisabschnitt und im Bereich der Saugseite

25 durch einen zweiten Kreisabschnitt und einen daran anschliessenden weiteren Kreisabschnitt gebildet. Dabei gehen der zweite Kreisabschnitt und der weitere Kreisabschnitt mit stetiger Steigung ineinander über, während im Bereich der Vorderkante und im Bereich der Hinterkante

30 Knickpunkte entstehen, die zur Erzielung eines stetigen Kurvenverlaufs der Profilkontur geglättet oder abgerundet werden müssen. Da für die Bildung der Profilkontur in den geglätteten bzw. abgerundeten Profilabschnitten keine

35 mathematisch erfassbaren Kurven angegeben sind, ist die strömungstechnische Optimierung der Profilkontur bei gleichzeitiger Erfüllung der an die Festigkeit gestellten Erfordernisse mit einem erheblichen Aufwand verbunden.

Der Erfindung liegt dabei die Aufgabe zugrunde, eine Turbomaschinenschaufel zu schaffen, deren Profilkontur ausschliesslich aus mathematisch erfassbaren und mit stetiger Steigung ineinander übergehenden Kurvenabschnitten gebildet ist, wobei die Profilkontur durch eine Variation der Parameter der einzelnen Kurven an die strömungstechnischen und zugleich auch an die mechanischen Erfordernisse angepasst werden kann.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäss durch die im kennzeichnenden Teil des Patentanspruchs 1 aufgeführten Merkmale gelöst.

Die erfindungsgemäss Turbomaschinenschaufel besitzt also eine Profilkontur, welche abschnittsweise aus mathematisch exakt erfassbaren Kurven zweiter Ordnung derart zusammengesetzt ist, dass die gesamte Kontur einen stetigen Kurvenverlauf nimmt. Somit können auch die Profilfläche,

55 die Schwerpunktlage, die Neigung der Hauptträgheitsachsen, die Trägheitsmomente, die Biegewiderstandsmomente, die Lage des Schubmittelpunktes, der Drillwiderstand und das Torsionswiderstandsmoment mathematisch exakt berechnet werden, wobei die genaue Kennung dieser Grössen eine zuverlässige und genaue Berechnung des Festigkeitsverhal-

60 tens und des Schwingungsverhaltens erlaubt. Durch geeignete Wahl der Parameter der die Profilkontur bildenden Kurven zweiter Ordnung kann eine Profilkontur entworfen werden, welche den strömungstechnischen und mechanischen Erfordernissen genügt. Nach erfolgter strömungstechnischer Berechnung, bei welcher Druckverteilung, Abströmwinkel, Profilverluste und dergleichen ermittelt werden, kann dann durch geringfügige Änderungen der Parameter eine strömungstechnische Optimierung vorgenommen werden,

ohne dass die erforderlichen Festigkeitseigenschaften verschlechtert werden. Diese Möglichkeit einer strömungstechnischen Optimierung ohne Festigkeitsbeeinträchtigung ist bei den bekannten Profilkonturen nicht gegeben. Weitere Vorteile der erfindungsgemäss ausgebildeten Turbomaschinenschaufeln ergeben sich bei der Fertigung. Es können die bisher bekannten Bearbeitungsmethoden angewendet werden, wobei dank der mathematisch erfassbaren Profilkontur die Fertigungsgenauigkeit erheblich gesteigert werden kann, da jeder Punkt der Profilkontur exakt festgelegt und praktisch eine unbegrenzte Anzahl von Bezugspunkten gewählt werden kann.

Die erfindungsgemäss Turbomaschinenschaufel kann auch eine Profilkontur erhalten, bei welcher die den ersten Ellipsenabschnitt bildende erste Ellipse und die den zweiten Ellipsenabschnitt bildende zweite Ellipse eine gemeinsame grössere Halbachse besitzen und in dem gemeinsamen auf der grösseren Halbachse liegenden Scheitelpunkt ineinander übergehen. Die kleineren Halbachsen der ersten und der zweiten Ellipse können dabei die gleiche Länge aufweisen, d.h. der erste und der zweite Ellipsenabschnitt stellen Unterabschnitte eines derselben Ellipsen-Abschnitts dar. Weisen dann zusätzlich noch sämtliche Halbachsen der ersten und zweiten Ellipse die gleiche Länge auf, so gehören der erste und der zweite Ellipsenabschnitt in diesem Sonderfall zu einem einzigen Kreisabschnitt.

Bei einer bevorzugten Ausführungsform der erfindungsgemässen Turbomaschinenschaufel geht der zweite Kreisabschnitt im Scheitelpunkt der Parabel zweiter Ordnung in den Parabelabschnitt über.

Da der Übergang hierbei einen stetigen Kurvenverlauf nimmt, bedeutet dies, dass der Radius des zweiten Kreisabschnitts dem Radius des Scheitelpunktes der Parabel zweiter Ordnung entspricht.

Die Parameter der die Profilkontur bildenden Kurven zweiter Ordnung können auch zwischen Schaufelfuss und Schaufel spitze variieren. Somit ist eine rasche und unkomplizierte Gestaltung von zylindrischen und von verwundenen Turbomaschinenschaufeln möglich, deren Masse längs des Schaufelblattes konstant oder variabel sein kann. Die Änderung der Masse kann sowohl linear, exponentiell, entsprechend körpereigener Zugfestigkeit oder nach einem beliebigen vorgegebenen Variationsgesetz sein.

Im folgenden werden Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand der Zeichnung näher erläutert. Dabei zeigt:

Fig. 1 eine Profilkontur, welche aus zwei Ellipsenabschnitten, einem Parabelabschnitt und drei Kreisabschnitten gebildet ist,

Fig. 2 die in Fig. 1 dargestellte Profilkontur mit den Bezugachsen und Parametern der einzelnen Kurvenabschnitte,

Fig. 3 eine stark gekrümmte Profilkontur, welche ebenfalls aus zwei Ellipsenabschnitten, einem Parabelabschnitt und drei Kreisabschnitten gebildet ist,

Fig. 4 eine Profilkontur, welche als Grenzfall zwei Ellipsenabschnitte aufweist, die ein und denselben Ellipse angehören, ferner den Parabelabschnitt und die drei Kreisabschnitte,

Fig. 5 eine Profilkontur, welche als weiterer Grenzfall durch die zwei Ellipsenabschnitte, die Teil ein und desselben Kreisumfangs sind, und ferner aus dem Parabelabschnitt und den drei Kreisabschnitten gebildet ist, und

Fig. 6 eine äusserst flache Profilkontur, welche aus zwei Unterabschnitten ein und desselben Ellipsenabschnitts, einem Parabelabschnitt und den drei Kreisabschnitten gebildet ist, wobei aber der an den zweiten Ellipsen-Unterabschnitt angrenzende Kreisabschnitt eine sehr kleine Bogenlänge hat.

Fig. 1 zeigt die Profilkontur einer Turbomaschinenschaufel mit insgesamt sechs stetig ineinander übergehenden Profilabschnitten. Beginnend im Übergangsbereich zwischen der Druckseite und der Vorderkante wird die Profilkontur zwischen den Punkten A und E durch einen ersten Ellipsenabschnitt gebildet. An diesen Ellipsenabschnitt AE schliesst sich ein in den Bereich der Saugseite übergehender zweiter Ellipsenabschnitt EB an. Der weitere Verlauf der Profilkontur im Bereich der Saugseite wird durch einen zweiten Kreisabschnitt BC und einen daran anschliessenden Parabelabschnitt CD einer Parabel zweiter Ordnung bestimmt. Die Hinterkante wird durch einen dritten Kreisabschnitt DG gebildet, welcher sich an den Parabelabschnitt CD anschliesst. Im Bereich der Druckseite schliesst sich an den dritten Kreisabschnitt DG ein erster Kreisabschnitt GA an, welcher zur Vorderkante hin in den ersten Ellipsenabschnitt AE übergeht.

Zur weiteren Erläuterung der in Fig. 1 dargestellten Profilkontur wird auf Fig. 2 verwiesen. Hier dient als Bezugssystem ein ebenes kartesisches Koordinatensystem x-y mit der Abszissenachse x und der Ordinatenachse y, wobei die Abszissenachse x im Bereich der Hinterkante und im Bereich der Vorderkante an die Profilkontur tangiert und wobei die Ordinatenachse y im Bereich der Vorderkante an die Profilkontur tangiert.

Der erste Ellipsenabschnitt AE ist lokal auf ein Koordinatensystem V-W bezogen, dessen Mittelpunkt mit O₁ bezeichnet ist und dessen Abszissenachse V den Winkel Θ₀ mit der Abszissenachse x des Hauptsystems bildet. Der erste Ellipsenabschnitt AE kann dann durch die Mittelpunktsgleichung

$$W = \frac{1}{k_1} \sqrt{V_0^2 - V^2}$$

dargestellt werden, wobei V₀ die grössere Halbachse, W₀₂ die kleinere Halbachse bzw.

$$k_1 = \frac{V_0}{W_{02}}$$

das Halbachsenverhältnis bezeichnet.

Der zweite Ellipsenabschnitt EB ist lokal ebenfalls auf das Koordinatensystem V-W bezogen und kann durch die Mittelpunktsgleichung

$$W = \frac{1}{k_2} \sqrt{V_0^2 - V^2}$$

dargestellt werden, wobei V₀ die grössere Halbachse, W₀₁ die kleinere Halbachse bzw.

$$k_2 = \frac{V_0}{W_{01}}$$

das Halbachsenverhältnis bezeichnet.

Da die grössere Halbachse V₀ für beide Ellipsen gleich ist, bildet der Punkt E einen gemeinsamen Scheitelpunkt des ersten Ellipsenabschnitts AE und des zweiten Ellipsenabschnitts EB.

Der zweite Kreisabschnitt BC wird durch einen Kreis festgelegt, dessen Mittelpunkt mit O₂ und dessen Radius mit R₂ bezeichnet ist.

Der Parabelabschnitt CD ist lokal auf ein Koordinatensystem ζ-η bezogen, dessen Nullpunkt in C liegt und dessen Abszissenachse ζ durch den Mittelpunkt O₂ des Kreisabschnitts BC geht. Der Parabelabschnitt CD kann dann durch

die Scheitelgleichung

$$v^2 = 2 R_2 \zeta$$

dargestellt werden. Aus dieser Scheitelgleichung geht auch hervor, dass der Radius des zweiten Kreisabschnitts BC gleich dem Radius des Scheitelkreises der Parabel ist. Der zweite Kreisabschnitt BC kann somit auch durch die Scheitelgleichung

$$v^2 = \zeta (2 R_2 - \zeta)$$

dargestellt werden.

Der dritte Kreisabschnitt DG wird durch einen Kreis festgelegt, dessen Mittelpunkt mit O_3 und dessen Radius mit R_3 bezeichnet ist. Dieser Kreis wird auf das Koordinatensystem x-y bezogen und tangiert an der Abszissenachse x.

Der erste Kreisabschnitt GA wird durch einen Kreis festgelegt, dessen Mittelpunkt mit O_4 und dessen Radius mit R_4 bezeichnet ist. Dieser Kreis wird ebenfalls auf das Koordinatensystem x-y bezogen.

In Fig. 2 ist weiterhin mit L die Länge der Profilkontur bezeichnet. Mit ψ_1 ist der Winkel zwischen der Normalen im Punkt A und der Ordinatenachse y und mit ψ_2 der Winkel zwischen der Normalen im Punkt B der Abszissenachse x bezeichnet.

Die Form der Profilkontur wird dann von den folgenden zehn Parametern bestimmt:

1. Der Profillänge L,
2. der Grösse des Halbachsenverhältnisses k_1 ,
3. der Grösse des Halbachsenverhältnisses k_2 ,
4. der Länge der Halbachse V_0 ,
5. der Grösse des Winkels Θ_0 ,
6. der Länge des Scheitelkreisradius R_2 der Parabel,
7. der Grösse des Winkels ψ_1 ,
8. der Grösse des Winkels ψ_2 ,
9. der Länge der Koordinate x_D des Punktes D und
10. der Länge der Koordinate y_D des Punktes D.

Durch Variation der vorstehend aufgeführten Parameter kann bei der Konstruktion einer Turbomaschinenschaufel eine geeignete Profilkontur gefunden werden, welche die strömungstechnischen und mechanischen Erfordernisse erfüllt. In den Fig. 3 bis 6 sind Beispiele typischer Profilkonturen dargestellt, wobei zur Vereinfachung der zeichnerischen Darstellung zum Teil auf eine Eintragung der Bezugsysteme und der einzelnen Parameter verzichtet wurde. Die in Fig. 2 dargestellten Bezugssysteme und Parameter sollen jedoch in gleicher Weise auch für die in den Fig. 3 bis 6 dargestellten Profilkonturen gelten.

Fig. 3 zeigt eine stark gekrümmte Profilkontur. Massgebend für die starke Krümmung sind der relativ grosse Winkel Θ_0 und eine relativ grosse Länge des Scheitelkreisradius R_2 der Parabel.

Fig. 4 zeigt eine Profilkontur, bei welcher die Halbachsenverhältnisse k_1 und k_2 gleich gross sind. Die Ellipsenabschnitte AE und EB gehören also der gleichen Ellipse an, d.h., dass die Profilkontur in diesem Bereich durch zwei Unterabschnitte ein und desselben Ellipsenabschnitts AB gebildet wird.

Fig. 5 zeigt einen Sonderfall, bei welchem die Halbachsenverhältnisse k_1 und k_2 gleich gross sind und den Wert eins annehmen. In diesem Fall liegen die beiden Ellipsenabschnitte AE und EB als Bogenstücke auf einem Kreis mit dem Radius $R_1 = V_0$, und die Profilkontur wird zwischen den Punkten A und B durch die beiden Bogenstücke AE und EB gebildet.

Fig. 6 zeigt schliesslich eine äusserst flache Profilkontur, die beispielsweise für den äusseren Endbereich einer Turbomaschinenschaufel geeignet ist. Massgebend für die geringe Krümmung sind ein sehr kleiner Winkel Θ_0 und eine geringe Länge des Scheitelkreisradius R_2 der Parabel. Die beiden Ellipsenabschnitte AE und EB bilden zwei Unterabschnitte ein und desselben Ellipsenabschnitts AB, da die Halbachsenverhältnisse k_1 und k_2 gleich gross sind. Die Bogenlänge des ersten Kreisabschnittes BC ist bei der dargestellten Profilform sehr gering, so dass die Punkte B und C sehr eng beieinanderliegen.

Allgemein sind bei der Konstruktion einer Profilkontur folgende Einflüsse der Parameter auf die Profilform zu beachten:

- 15 a) Einfluss der Halbachsenverhältnisse k_1 und k_2 .

Fall 1: $k_1 = k_2 > 1$.

- 20 b) Die Ellipsenabschnitte AE und EB liegen symmetrisch zur Abszissenachse V.

Allgemein ist festzustellen, dass je grösser k_1 und k_2 sind, die Ellipsenabschnitte AE und EB um so näher an die Abszissenachse V_0 heranrücken.

- 25 c) Einfluss der Länge der Halbachse V_0 .

Der Ellipsenabschnitt mit dem kleineren k -Wert liegt von der Abszissenachse V weiter entfernt als der Ellipsenabschnitt mit dem grösseren k -Wert.

Fall 2: $1 < k_1 \neq k_2 > 1$

30 d) Einfluss des Winkels Θ_0 .

Die Grösse von V_0 beeinflusst zusammen mit den Halbachsenverhältnissen k_1 und k_2 direkt die Form der Ellipsenabschnitte AE und EB.

- 35 e) Einfluss des Winkels ψ_1 .

Je grösser der Winkel Θ_0 ist, um so gekrümmter ist auch die Profilkontur und umgekehrt.

- 40 f) Einfluss des Radius R_2 .

Der Parabelabschnitt CD ist um so flacher, je kleiner der Radius R_2 ist.

- 45 g) Einfluss des Winkels ψ_2 .

Bei zuwachsendem Winkel ψ_2 verlängert sich der Ellipsenabschnitt AE und der Radius R_4 verkürzt sich.

- 50 h) Einfluss der Koordination des Punktes D.

Die Vergrösserung des Ordinatenwertes y_D verursacht eine Verlängerung des dritten Kreisabschnittes DG.

Der Abszissenwert x_D beeinflusst die Lage des Krümmungsmaximums im Bereich der Saugseite.

Anhand der angegebenen Parameter ist man in der Lage, Profile mit den erforderlichen Festigkeitseigenschaften und

55 aerodynamischen Formen zu entwerfen. Nach erfolgter aerodynamischen Berechnung und aufgrund der erzielten Ergebnisse kann durch geringfügige Änderungen geeigneter Parameter eine aerodynamische Optimierung vorgenommen

werden, ohne dass die erforderlichen Festigkeitseigenschaften verschlechtert werden. Für die Erstellung der Profilkontur, die Festigkeitsberechnung, die aerodynamische

Berechnung und die aerodynamische Optimierung können entsprechend programmierte Rechner eingesetzt werden.

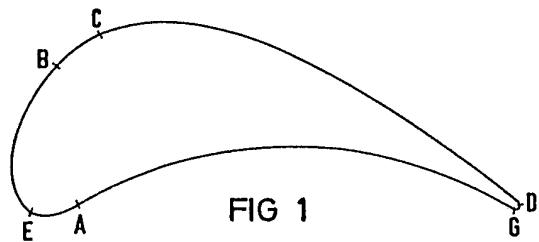


FIG 1

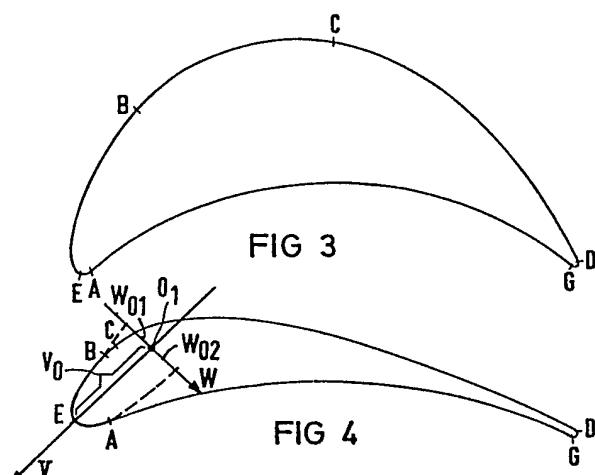


FIG 3

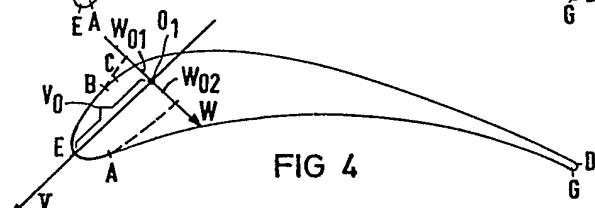


FIG 4

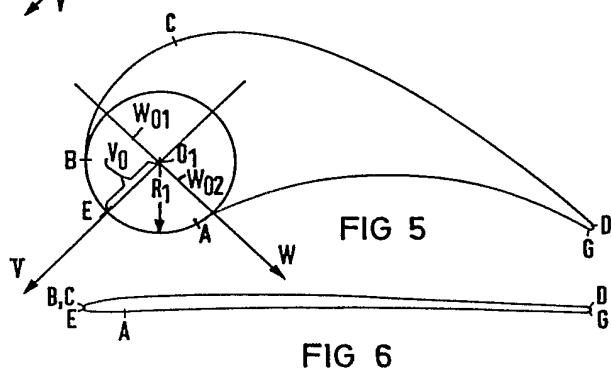


FIG 5

FIG 6

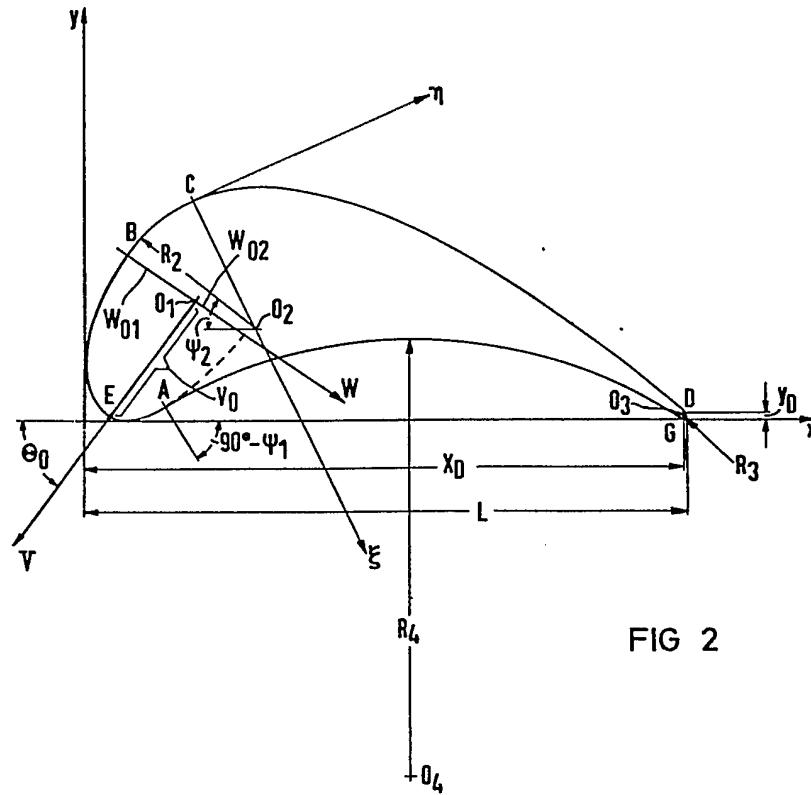


FIG 2