



(19)

# Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets



(11)

EP 1 253 293 A2

(12)

## EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:  
30.10.2002 Patentblatt 2002/44

(51) Int Cl.<sup>7</sup>: F01D 5/30

(21) Anmeldenummer: **02405278.9**

(22) Anmeldetag: 09.04.2002

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU  
MC NL PT SE TR**

Benannte Erstreckungsstaaten:  
**AL LT LV MK RO SI**

(30) Priorität: **26.04.2001 DE 10120532**

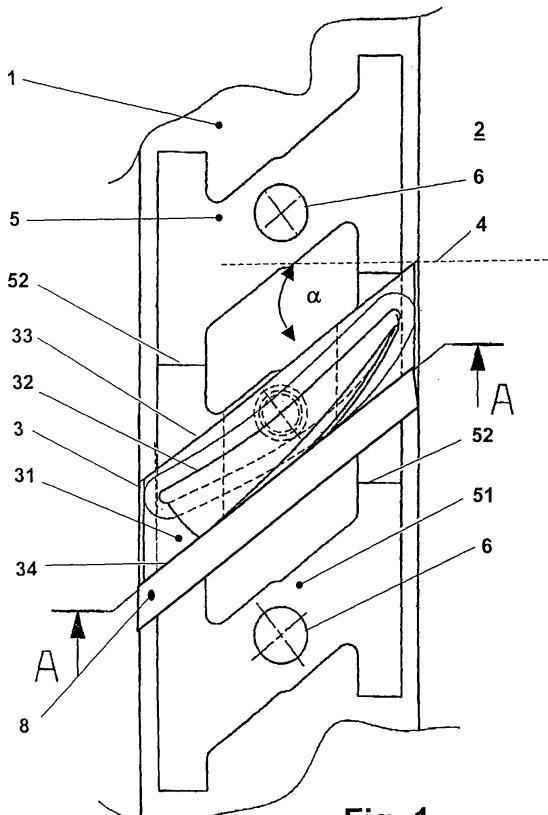
(71) Anmelder: ALSTOM (Switzerland) Ltd  
5401 Baden (CH)

(72) Erfinder:

- **Bachofner, Rene**  
5432 Neuenhof (CH)
  - **Eschbach, Urban**  
79664 Wehr (DE)
  - **Müller, Michael Prof. Dr.**  
89075 Ulm (DE)
  - **Regnath, Günter**  
79790 Küssaberg (DE)
  - **Waltke, Ulrich**  
45468 Mülheim an der Ruhr (DE)

## (54) Befestigung einer Laufschaufel am Rotor einer Turbomaschine

(57) Beschrieben wird eine Vorrichtung zur Befestigung einer Laufschaufel (3) an einem Rotor (2) einer thermischen Turbomaschine. Die Laufschaufel (3) weist einen Schaufelfuss (36), ein Schaufelblatt (32) sowie eine zwischen dem Schaufelfuss (36) und dem Schaufelblatt (32) angeordnete Plattform (31) mit wenigstens zwei Seitenflanken (33, 34) auf. Die der Erfindung zugrundeliegende Idee zur Vermeidung von auftretenden Axialkräften auf den Rotor (2) aufgrund schräg zur Rotorachse (4) gestellter Anlageflächen zwischen zwei benachbarten Laufschaufeln (3) besteht darin, dass sich benachbarte Laufschaufeln (3) lediglich an axial ausgerichteten Anlageflächen (52) begegnen.



**Fig. 1**

**Beschreibung****Technisches Gebiet**

**[0001]** Die Erfindung bezieht sich auf eine Vorrichtung zur Befestigung einer Laufschaufel am Rotor einer thermischen Turbomaschine gemäss dem Oberbegriff des Anspruch 1.

**Stand der Technik**

**[0002]** Laufschaufeln, die in Umfangsnuten an Rotoren von Turbomaschinen befestigt sind, sind in Abhängigkeit der jeweiligen Strömungsverhältnisse in geeigneter Weise zu positionieren und gegenüber möglicherweise auftretenden Dejustierungen während des Betriebes der Turbomaschinen aber insbesondere gegen vollständiges Herauslösen aus der Umfangsnut zuverlässig zu sichern.

**[0003]** Die Gefahr des vollständigen Herauslösens einzelner Laufschaufeln aus den jeweiligen Befestigungsvorkehrungen ist gegeben, wenn sich die innerhalb der Umfangsnuten eingesetzten und in an sich bekannter Weise befestigten Laufschaufeln innerhalb des jeweiligen Montagespiels in Umfangrichtung längs der Umfangsnut auf dem Rotor ungleichmäßig verschieben können. Durch derartige periphere Dejustierungen bei einer Vielzahl längs der Umlaufnut eingesetzten Laufschaufeln kann ein zwischen zwei benachbarten Laufschaufeln beachtlicher Spalt einstellen, der groß genug ist, dass sich eine Laufschaufel durch radiale Verdrehung aus der Umfangsnut lösen kann, wodurch sich ein erheblicher Schaden an der gesamten Turbomaschinenanlage ergibt.

**[0004]** An sich bekannte Sicherungsmaßnahmen gegen ein sich selbständiges Lösen einzelner Laufschaufeln aus der Umfangsnut beziehen sich im allgemeinen auf die Reduzierung des Spiels zwischen zwei benachbarten Schaufelfüßen innerhalb der Umfangsnut in Umfangsrichtung. Hierzu bedient man sich spezieller Zwischenstücke, die das von der Montage in Umfangsrichtung verbliebene Spiel auszufüllen vermögen, wobei die Zwischenstücke sehr eng in dem verbleibenden Zwischenpalt eingebaut werden müssen.

**[0005]** Durch den Einsatz speziell geformter Zwischenstücke, die das montagebedingte Spiel in Umfangsrichtung auf ein Maß reduzieren, das sehr viel kleiner ist als es für die freie thermische Ausdehnung der einzelnen Laufschaufeln längs der Umfangsnut notwendig wäre, entstehen beim Betrieb der Turbomaschine thermisch bedingte Zwänge, die sich zumindest längs in Umfangsrichtung zwischen den einzelnen benachbarten Laufschaufeln ausbilden. Sind die Schaufelfüße der einzelnen Laufschaufeln oder die zwischen den Schaufelfüßen und Schaufelblättern in der Regel vorgesehenen Plattformen derart schräg konturiert ausgebildet, so dass zwei benachbarte Laufschaufeln über schräge, zur Rotorachse orientierte Anlageflächen in

Kontakt treten, so führen die vorstehend erwähnten thermisch bedingten mechanischen Zwänge innerhalb der schräg zur Rotorachse orientierten Anlageflächen zu zusätzlichen Axialkräften, die zu einer Verkrümmung des Rotors und damit verbunden zu Vibrationen führen.

**[0006]** Unabhängig von der Ausbildung der Plattformen jeweiliger Laufschaufeln ist es ebenso denkbar, dass zwei innerhalb der Umfangsnut benachbart angeordnete Schaufelfüße über schräg zur Rotorachse verlaufende Schaufelfußflanken aufweisen und aneinanderliegenden, wodurch in gleicher Weise die vorstehend erläuterten Vibrationserscheinungen auftreten.

**[0007]** In US-A-4,684,325 sind gattungsgemäße Turbinenlaufschaufeln beschrieben, die in einer Vielzahl längs der Umfangsnut angeordneten Aneinanderreihung über die Seitenflanken rhombisch ausgebildeter Plattformen unmittelbar aneinander grenzen. Die rhombische Ausführung der Plattformen ist einerseits bedingt durch die Schrägstellung des jeweiligen Turbinenblattes in bezug auf die Durchströmungsrichtung, andererseits motiviert durch eine Erhöhung der Packungsdichte von längs der Umfangsnut anzuordnenden Laufschaufeln. Treten nun derart ausgebildete Turbinenlaufschaufeln über die nicht parallel zur Rotationsachse orientierten Anlageflächen, bedingt durch die in einer Turbomaschine vorherrschenden Betriebsbedingungen, in eine kraftbeaufschlagte Wirkverbindung, so führen die in Erscheinung tretenden Axialkräfte längs der einzelnen Anlageflächen zwischen den benachbarten Laufschaufeln zu unvermeidbaren Vibrationen innerhalb der Rotoranordnung, durch die entsprechende, die Rotoranordnung abstützende Lager erheblich belastet werden. Eben diesem Umstand gilt es durch entsprechende Maßnahmen wirksam entgegenzutreten.

35

**Darstellung der Erfindung**

**[0008]** Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Vorrichtung zur Befestigung einer Laufschaufel der vorstehend beschriebenen Gattung derart weiterzubilden, dass durch thermische Verspannungen innerhalb der Laufschaufeln auftretende Axialkräfte auf den Rotor vollständig vermieden werden sollen. Gleichzeitig soll dafür Sorge getragen werden, dass ein Herauslösen

einzelner Laufschaufeln aufgrund sich möglicherweise ausbildender Spaltzwischenräume vollständig geschlossen werden kann. Die zu treffenden Maßnahmen sollen keine konstruktiv aufwendigen Arbeiten bzw. Vorkehrungen erfordern und insbesondere ein Nachrüsten bei bereits bestehenden Rotoranordnungen erlauben.

**[0009]** Erfindungsgemäß ist die Vorrichtung zur Befestigung einer Laufschaufel gemäß des Oberbegriffes des Anspruches 1 dadurch ausgebildet, dass im Bereich des in die Umfangsnut hineinreichenden Schaufelfusses mit diesem in Wirkverbindung stehende Anlageflächen vorgesehen sind, die parallel zur Rotorachse orientiert sind, und benachbart eingefügte Laufschaufeln über die parallel zur Rotorachse orientierten Anla-

geflächen jeweils innerhalb der Umfangsnut miteinander in eine lose Kraftverbindung treten.

**[0010]** Die der Erfindung zugrundeliegende Idee zur Vermeidung von auftretenden Axialkräften auf den Rotor aufgrund schräg zur Rotorachse gestellter Anlageflächen zwischen zwei benachbarten Laufschaufeln ist die Vermeidung eben jener schrägen Anlageflächen. Der Erfindungsgedanke ist daher insbesondere bei Laufschaufeln mit einem großen Anstellwinkel gegenüber der Durchströmungsrichtung in Turbomaschinen von besonderer Bedeutung, zumal die Plattformen derartiger Laufschaufeln nicht zuletzt aus Platz- und Gewichtsgründen schräg verlaufende Seitenflanken aufweisen, über die in der Regel innerhalb der Umfangsnut eingefügte, unmittelbar benachbarte Laufschaufeln oder ähnlich gestaltete Zwischenstücke aneinander grenzen.

**[0011]** Zur Vermeidung eben jener schräg zur Rotorachse orientierten Berührflächen dient in besonders vorteilhafter Weise für jede einzelne Laufschaufel eine Unterlegplatte, die radial zwischen dem Schaufelfuß und dem Rotor innerhalb der Umfangsnut eingebracht ist und mit dem jeweiligen Schaufelfuß zumindest eine lösbar feste Wirkverbindung eingeht. Die Unterlegplatte weist parallel zur Rotorachse ausgerichtete Anlageflächen auf, die die Seitenflanken der Plattform der Laufschaufel in Umfangsrichtung des Rotors überragen. Hierdurch wird erreicht, dass zwei benachbarte Laufschaufeln lediglich über die ihnen zugeordneten, parallel zur Rotorachse orientierten Anlageflächen der jeweiligen Unterlegplatten aneinander stoßen. Aufgrund der geometrischen Ausbildung der Unterlegplatten entstehen im Betrieb aufgrund thermischer Dehnungsunterschiede zwischen dem Rotor und der in Umfangsrichtung innerhalb der Umfangsnut angeordneten Unterlegplatten ausschließlich Spannungen in Umfangsrichtung, die jedoch vollkommen unkritisch für das Rotationsverhalten des Rotors sind. Aufgrund der axialen bzw. parallelen Orientierung der Anlageflächen relativ zur Rotorachse können jegliche auf den Rotor gerichtete Axialkräfte vermieden werden.

**[0012]** Die lösbar feste Wirkverbindung zwischen den einzelnen Laufschaufelfüßen und den ihnen zugeordneten Unterlegplatten erfolgt vorzugsweise mit einem kraftbeaufschlagten Bolzen, vorzugsweise federkraftbeaufschlagten Bolzen, von Seiten der Unterlegplatte, der in eine entsprechende Ausnehmung innerhalb des Schaufelfußes eingreift, wodurch einerseits eine bewegungsfreie Fixierung der Laufschaufel in Umfangsrichtung gewährleistet wird, andererseits jedoch genügend Spiel zwischen dem Rotor und dem Schaufelfuß vorhanden ist, so dass sich der Schaufelfuß innerhalb der Umfangsnut thermisch weitgehend frei ausdehnen kann. Auf diese Weise können thermische Verspannungen innerhalb des in der Umfangsnut sitzenden Schaufelfußes weitgehend vermieden werden.

### Kurze Beschreibung der Erfindung

**[0013]** Die Erfindung wird nachstehend ohne Beschränkung des allgemeinen Erfindungsgedankens anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnungen exemplarisch beschrieben, wobei

**Fig. 1** eine Draufsicht auf eine, in eine Umfangsnut eingefügte Laufschaufel mit zwei benachbart angeordneten Unterlegplatten zeigt,

**Fig. 2** eine Querschnittsdarstellung gemäß Schnittlinie in Fig. 1 darstellt, sowie

**Fig. 3** eine Detaildarstellung bezüglich der Verbindung zwischen Unterlegplatte und Schaufelfuß zeigt.

**[0014]** Es werden nur die für die Erfindung wesentlichen Elemente dargestellt. Gleiche Elemente werden in verschiedenen Figuren gleich bezeichnet.

### Wege zur Ausführung der Erfindung, gewerbliche Verwendbarkeit

**[0015]** Fig. 1 zeigt eine Draufsicht auf die Umfangsnut 1 eines Rotors 2 einer thermischen Turbomaschine, so eines Verdichter, einer Gas- oder Dampfturbine. Innerhalb der Umfangsnut 2 ist aus Gründen einer übersichtlicheren Darstellung lediglich eine Laufschaufel 3 (mittlere Position) mit einer rhombisch ausgestalteten Plattform 31 und einem unter einem Winkel  $\alpha$  angestellten Schaufelblatt 32 dargestellt. Die Seitenflanken 33, 34 der Plattform 31 sind im dargestellten Ausführungsbeispiel weitgehend parallel zueinander gerichtet und schließen den gleichen Anstellwinkel  $\alpha$  gegenüber der gestrichelt eingetragenen Kkoparallelen zur Rotationsachse 4 ein. Nur der Vollständigkeit halber sei darauf hingewiesen, dass das Schaufelblatt 32 in seiner Radialerstreckung geschränkt ausgeführt ist, d.h. die Schaufelspitze 35 weist einen größeren Anstellwinkel  $\alpha$  als der Schaufelblattbereich nahe der Plattform 31 auf.

**[0016]** Ferner ist der nicht dargestellte Schaufelfuß, der in der Draufsichtdarstellung gemäß Fig. 1 von der Plattform 31 vollständig überdeckt ist, in Eingriff mit einer innerhalb der Umfangsnut 1 eingearbeiteten Haltekontur, die im einzelnen aus der Querschnittsdarstellung gemäß Fig. 2 zu entnehmen ist, auf die im einzelnen noch eingegangen wird.

**[0017]** Radial unter der Laufschaufel 3 innerhalb der Umfangsnut 1 ist in eine Unterlegplatte 5 vorgesehen, die in einer Vielzahl in Umfangsrichtung verteilt jeweils unmittelbar aneinandergrenzend angeordnet sind. Die Unterlegplatten 5 weisen jeweils parallel zur Rotorachse 4 orientierte Anlageflächen 52 auf. Aus Gründen einer übersichtlicheren Darstellung ist lediglich über die in der Fig. 1 mittleren Unterlegplatte 5 die zugehörige Laufschaufel 3 eingezeichnet, die über ein Verbindungsmitte wenigstens lösbar fest mit der ihr zugeordneten Unterlegplatte 5 verbunden ist. Das Verbindungs-

mittel 6 ist derart gewählt, dass die Laufschaufel 3 sicher in Umfangsrichtung längs zur Umfangsnut 1 fixiert ist. Auf eine spezielle Ausbildung des Verbindungsmittels 4 wird nachstehend in Fig. 3 eingegangen.

**[0018]** Die jeweils mit einer Laufschaufel 3 verbindbaren Unterlegplatten 5 sind gemäß Ausführungsbeispiel nach Fig. 1 vorzugsweise in Art eines schräggestellten "H" ausgebildet und weisen einen mittleren Verbindungssteg 51 auf, in dem das entsprechende Verbindungsmitte 6 integrierbar ist. Die in Umfangsrichtung zur Umfangsnut 1 gerichteten Seitenschenkel enden jeweils in Bereichen mit den parallel zur Rotorachse 4 orientierten Anlageflächen 52, die allesamt die Laufschaufel 3 in radialer Projektion überragen, wodurch sichergestellt ist, dass sich zwei in der Umfangsnut 1 benachbart angeordnete Laufschaufeln vorzugsweise ausschließlich jeweils über die Anlageflächen 52 kraftbeaufschlagt berühren. Insbesondere durch die im Betrieb einer Turbomaschine vorherrschenden sehr hohen Temperaturen dehnen sich auch die Unterlegplatten 5 gegenüber dem Rotormaterial aus, wodurch jedoch ausschließlich mechanische Zwänge in Umfangsrichtung zwischen den einzelnen Unterlegplatten 5 entstehen, jedoch aufgrund der parallelen Orientierung der Anschlagsflächen relativ zur Rotorachse jegliche Axialkräfte auf den Rotor vermieden werden.

**[0019]** Die der Erfindung zugrundeliegende Idee zur Vermeidung von auftretenden Axialkräften auf den Rotor 2 aufgrund schräg zur Rotorachse 4 gestellter Anlageflächen zwischen zwei benachbarten Laufschaufeln 3 besteht allgemein darin, dass sich benachbarte Laufschaufeln 3 lediglich an axial ausgerichteten Anlageflächen 52 begegnen, unabhängig davon, ob sich diese Anlageflächen 52 an einer Unterlegplatte 5, direkt am Schaufelfuss 36 befestigt sind oder in einer anderen Wirkweise mit dem Schaufelfuss 36 verbunden sind. Die parallel zur Rotorachse ausgerichtete Anlageflächen überragen die Seitenflanken 33, 34 der Plattform 31 der Laufschaufel 3 in Umfangsrichtung des Rotors zu dem erfinderischen Zweck.

**[0020]** In Fig. 2 ist ein Schnittbild längs der Schnittlinie A-A gemäß Fig. 1 dargestellt. Diese der Laufschaufel 3 zugeordnete Unterlegplatte 5 befindet sich in einem Zwischenspalt 7 zwischen dem Schaufelfuß 36 und dem Rotor 2. Ebenso kann aus der Querschnittsdarstellung gemäß Fig. 2 die Plattform 31 entnommen werden, deren Oberseite bündig mit der Rotoroberseite abschließt. Mittig zum Schaufelfuß 36 ist als Verbindungsmitte 6 ein federkraftbeaufschlagter Bolzen 7 vorgesehen, durch den die Laufschaufel 3 relativ zur Unterlegplatte 5 fixiert wird.

**[0021]** Aus Fig. 3 ist eine entsprechende Querschnittsdarstellung des Verbindungsmittels 6 dargestellt. Die Unterlegplatte 5 ist hierbei über eine Presspassung mit einer Hülse 62 verfügt, innerhalb der ein Federelement 63 vorgesehen ist, das einen Bolzen 61 vertikal nach oben zu treiben vermag. Der Bolzen 61 sowie die Hülse 62 ragen im Verbund mit der Laufschaufel 3 in eine entsprechende Ausnehmung 64 innerhalb des Schaufelfußes 36 ein.

**[0022]** Wie in der Fig. 1 unterhalb der Laufschaufel 3 schematisch angedeutet kann innerhalb der Umfangsnut 1 zwischen zwei Laufschaufeln 3 wenigstens ein Zwischenstück 8 als Distanzstück eingefügt sein, das als Befestigungselement einen Schaufelfusses, sowie eine Plattform aufweist, die bündig mit dem Rotor 2 sowie mit den Plattformen 31 beider benachbarter Laufschaufeln 3 abschließt.

**[0023]** In besonders vorteilhafter Weise eignet sich die erfindungsgemäße Maßnahme als Nachrüstsatz bei bereits im Betrieb befindlichen Turbomaschinen. Lediglich gilt es im Bereich der Schaufelfüße das Axial- und eventuell das Umfangsspiel durch Nachbearbeitung, beispielsweise durch Nachschleifen, zu vergrößern, um genügend Platz für das Einlegen der Unterlegplatten zu schaffen.

## 20 Bezugszeichenliste

### [0024]

1	Umfangsnut	
2	Rotor	
3	Laufschaufel	
30	31	Plattform
32	Schaufelblatt	
33, 34	Seitenflanken	
35	Schaufelblattspitze	
36	Schaufelfuß	
40	4	Rotorachse
5	Unterlegplatte	
51	Verbindungssteg	
45	52	Anlageflächen
6	Verbindungsmitte	
50	61	Bolzen
62	Hülse	
55	63	Federelement
64	Ausnehmung	
7	Zwischenspalt	

8 Zwischenstück

### Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Befestigung von Laufschaufeln (3) längs einer innerhalb eines Rotors (2) einer thermischen Turbomaschine verlaufenden Umfangsnut (1), bei der

- die Laufschaufeln (3) einen Schaufelfuss (36), ein Schaufelblatt (32), sowie eine zwischen dem Schaufelfuss (36) und dem Schaufelblatt (32) angeordnete Plattform (31) mit wenigstens zwei Seitenflanken (33, 34) aufweist,
- die Umfangsnut (1) eine zur Aufnahme der Schaufelfüsse (36) ausgebildete Innenkontur vorsieht, und
- die Seitenflanken (33, 34) der Plattform (31) der sich in der Umfangsnut befindenden Laufschaufeln (3) schräg zur Rotorachse (4) geneigt sind,

#### **dadurch gekennzeichnet, dass**

- im Bereich des in die Umfangsnut (1) hineinreichenden Schaufelfusses (36) mit diesem in Wirkverbindung stehende Anlageflächen (52) vorgesehen sind, die parallel zur Rotorachse (4) orientiert sind, und
- benachbart eingefügte Laufschaufeln (3) über die parallel zur Rotorachse (4) orientierten Anlageflächen (52) jeweils innerhalb der Umfangsnut (1) miteinander in eine lose Kraftverbindung treten.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1,

#### **dadurch gekennzeichnet, dass**

innerhalb der Umfangsnut (1) radial zwischen dem Schaufelfuss (36) und dem Rotor (2) ein Zwischen-  
spalt (7) vorgesehen ist, in dem eine Unterlegplatte (5) eingebracht ist, die die Anlageflächen (52) aufweist, wobei die Unterlegplatte (5) über die zwei Seitenflanken (33, 34) in Umfangsrichtung hinausgeht.

3. Vorrichtung nach Anspruch 2,

#### **dadurch gekennzeichnet, dass**

die Unterlegplatte (5) ein Verbindungsmittel (6) aufweist, durch das die Unterlegplatte (5) mit dem Schaufelfuss (36) lösbar fest verbindbar ist.

4. Vorrichtung nach Anspruch 3,

#### **dadurch gekennzeichnet, dass**

das Verbindungsmittel (6) ein kraftbeaufschlagter Bolzen (61) ist, der von Seiten der Unterlegplatte (5) in eine entsprechend innerhalb des Schaufelfusses (36) vorgesehene Ausnehmung (64) eingreift.

5. Vorrichtung nach Anspruch 2,  
**dadurch gekennzeichnet, dass**

die Unterlegplatte (5) fest mit dem Schaufelfuss (36) verfügt oder einstückig mit dem Schaufelfuss (36) verbunden ist.

6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 2 bis 5,  
**dadurch gekennzeichnet, dass**

die Unterlegplatte (5) in Art eines "H" ausgebildet ist, deren Verbindungsschenkel (51) weitgehend parallel zu den Seitenflanken (33, 34) der Plattform (31) orientiert ist und vier parallel zur Rotorachse (4) ausgerichtete Anlageflächen (52) aufweist.

15 7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6,  
**dadurch gekennzeichnet, dass**

die radial zum Schaufelblatt (32) gerichtete Oberfläche der Plattform (31) im verfügten Zustand der Laufschaufel (3) mit dem Rotor (2) bündig mit dieser abschließt.

8. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 7,  
**dadurch gekennzeichnet, dass**

zwischen zwei benachbarten Laufschaufeln (3) ein bündig mit dem Rotor (2) abschließendes Zwischenstück in die Umfangsnut (1) eingefügt ist, das sich weitgehend kraftlos an die Seitenflanken (33, 34) der Plattform (31) beiden der benachbarten Laufschaufeln (3) anschmiegt.

9. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 8,  
**dadurch gekennzeichnet, dass**

die Plattform (31) eine rhombisch ausgebildete Form aufweist, bei der sich die Seitenflanken (33, 34) längs der Breite des Schaufelblattes (32) erstrecken.

10. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 9,  
**dadurch gekennzeichnet, dass**

zwischen zwei benachbarten Laufschaufeln (3) innerhalb der Umfangsnut (1) wenigstens ein Zwischenstück eingefügt ist, das einen Schaufelfusses (36), sowie eine Plattform (31) aufweist, die bündig mit dem Rotor (2) sowie mit den Plattformen (31) beider benachbarter Laufschaufeln (3) abschließt.

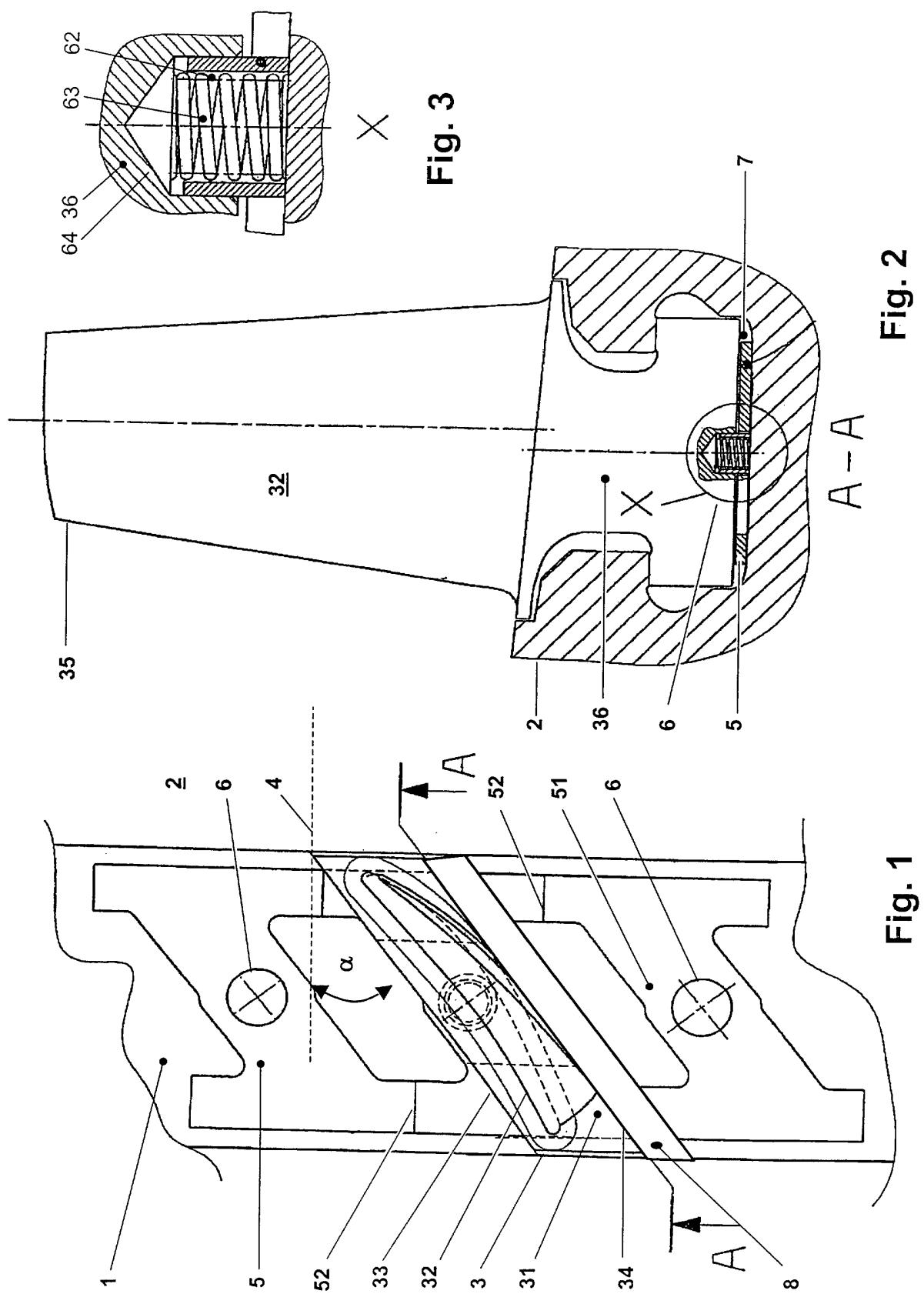


Fig. 3

Fig. 2

Fig. 1