



(10) **DE 10 2013 219 814 B3** 2014.11.27

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2013 219 814.0**  
(22) Anmeldetag: **30.09.2013**  
(43) Offenlegungstag: –  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **27.11.2014**

(51) Int Cl.: **F04D 29/68** (2006.01)  
**F04D 29/38** (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:  
**Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.,  
51147 Köln, DE**

(74) Vertreter:  
**von Kreisler Selting Werner - Partnerschaft von  
Patentanwälten und Rechtsanwälten mbB, 50667  
Köln, DE**

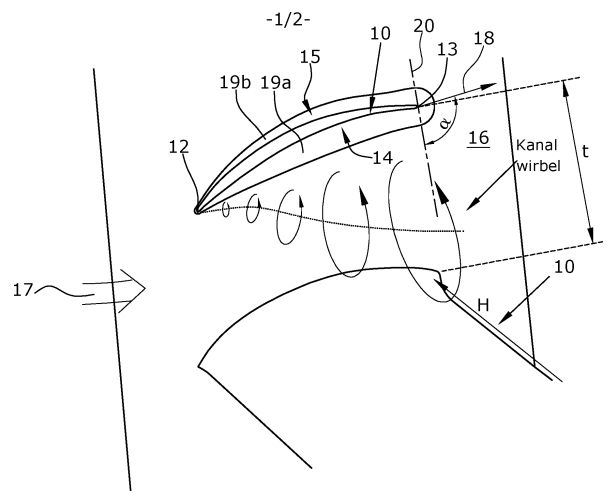
(72) Erfinder:  
**Hemmert-Pottmann, Stefan, 46514 Schermbeck,  
DE; Reutter, Oliver, 53227 Bonn, DE; Hergt,  
Alexander, Dr., 53111 Bonn, DE; Nicke, Eberhard,  
Dr., 51145 Köln, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

**DE 10 2005 026 525 A1**  
**US 2004 / 0 062 636 A1**  
**US 2004 / 0 081 548 A1**  
**US 2006 / 0 233 641 A1**  
**US 2006 / 0 275 112 A1**

(54) Bezeichnung: **Axialverdichter**

(57) Zusammenfassung: Bei einem Axialverdichter mit einem Verdichtungsgitter mit einem Kranz von Schaufeln (10), deren radial innere und/oder äußere Enden mit einer ringförmigen Endwand (16) verbunden sind und die jeweils eine Anströmkannte (12), eine Abströmkannte (13), eine Druckseite (14), eine Saugseite (15) und eine Höhe H aufweisen, wobei der Kranz von Schaufeln (10) eine Teilung t besitzt, und mit jeweils einer den Übergang zwischen einer Schaufel (10) und der Endwand (16) bildenden Ausrundung (19a, 19b), ist vorgesehen, dass die Ausrundung (19a) auf der Druckseite (14) eine sich entlang der Endwand (16) erstreckende Breite  $b_D$  und eine entlang der Schaufel (10) erstreckende Höhe  $h_D$  besitzt, und dass die Höhe  $h_D$  der Ausrundung (19a) auf der Druckseite (14) von der Anströmkannte (12) aus stromabwärts zunimmt.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft einen Axialverdichter mit einem Verdichtergitter mit einem Kranz von Schaufeln, deren radial innere und/oder äußere Enden mit einer ringförmigen Endwand verbunden sind und jeweils eine Anströmkannte, eine Abströmkannte, eine Druckseite und eine Saugseite aufweisen.

**[0002]** Bei der Durchströmung von Leit- und Laufschaufelgittern von Turbomaschinen kommt es zu Verlusten, welche den Wirkungsgrad der Schaufelreihen und damit auch der gesamten Maschine begrenzen. Diese Strömungsverluste lassen sich im Wesentlichen in Reibungsverluste an den Oberflächen (Schaufel sowie Naben- und Gehäusewände) und Verluste aufgrund von Sekundärströmungen im Randzonenbereich der Schaufelgitter unterteilen. Speziell die Verringerung der Sekundärströmungsverluste ist ein wichtiger Bestandteil der Forschung auf dem Gebiet der Verdichtertechnologie, da vor dem Hintergrund einer immer weiter steigenden Nachfrage an Energie und eines stetig zunehmenden Flugverkehrsaufkommens der Belastung der Umwelt durch CO<sub>2</sub> nur durch effizientere Gasturbinen und Flugtriebwerke entgegengewirkt werden kann.

**[0003]** Die Beeinflussung und Verringerung der Sekundärströmung und der aus ihr resultierenden Verluste ist speziell in der Verdichteraerodynamik in den letzten Jahrzehnten eines der zentralen Themen der Forschung gewesen. Da gerade die Strömungsverhältnisse in den Randzonen durch komplexe Wirbelsysteme und Sekundärströmungen geprägt sind, stellt sich deren gezielte Beeinflussung als wissenschaftliche Herausforderung dar.

**[0004]** Die Fig. 4 zeigt die wesentlichen Sekundärströmungen und Wirbelstrukturen wie sie sich in einem Verdichtergitter ausbilden. Sie beinhaltet auch Sekundärströmungen, welche aufgrund eines radialen Spaltes zwischen der Schaufel und der Endwand entstehen können. In Fig. 4 sind zwei Schaufeln **10** eines Schaufelkranzes dargestellt. Die Schaufeln sind an ihren radial inneren Enden mit einer Nabe **11** verbunden, die eine Endwand bildet. Die Schaufeln **10** bilden somit ein Schaufelgitter, das einen Rotor eines Verdichters bilden kann. Die Schaufeln **10** haben jeweils eine Anströmkannte **12**, eine Abströmkannte **13**, eine Druckseite **14** und eine Saugseite **15**. Die Druckseite **14** ist konkav gestaltet und die Saugseite **15** ist konvex gestaltet. Infolge der sich an der Saugseite **15** ausbildenden höheren Strömungsgeschwindigkeit ist dort der Druck gering. An der Druckseite **14** hingegen entsteht bei dem Verdichtergitter ein erhöhter Druck. Im Bereich der Anströmkannte **12** (Vorderkannte) kommt es an der Nabe **11** zu einem Aufrollen der Grenzschicht, so dass sich dort der sogenannte Hufeisenwirbel bildet. Weiterhin bildet sich aufgrund des Druckgradienten zwischen der Druckseite **14** einer

Schaufel **10** und der Saugseite **15** der benachbarten Schaufel **10** eine Querströmung in der Passage an den begrenzenden Wänden von Nabe **11** und Gehäuse aus. Vergleichbare Strömungen entstehen auch an Statoren, bei denen die Endwand durch die Gehäusewand gebildet ist, von der die Schaufeln radial abstehen. Aus dieser Querströmung resultieren zwei zueinander entgegengesetzt rotierende Kanalwirbel, welche an der Naben- und Gehäusewand energiereiches Grenzschichtmaterial in den Eckenbereich zwischen Wand und Schaufelsaugseite transportieren. Die starke Verzögerung der Strömung im Schaufelgitter sorgt dafür, dass es im Bereich der Ecke zu einer massiven Ablösung der Strömung kommen kann. Aus dieser Ablösung und den vorhandenen Rückströmgebieten auf Schaufel und den Wänden ergeben sich signifikante Totaldruckverluste in der Schaufelpassage, welche mit sinkendem Schaufelhöhenverhältnis immer dominanter werden. Neben den entstehenden Totaldruckverlusten verursachen insbesondere die Kanalwirbel hinter der Schaufelreihe eine inhomogene Abströmung im Randzonenbereich. Nahe der Endwand kommt es zu einer Abweichung von einer idealen Abströmwinkelverteilung, wobei zwei Gebiete existieren. Direkt an der Endwand liegt ein geringerer Abströmwinkel vor, was zu einer Überumlenkung führt. Mit zunehmender radialer Entfernung von der Endwand nimmt der Abströmwinkel zu, wobei es zu einem gegenüber der idealen Abströmwinkelverteilung erhöhten Abströmwinkel kommen kann, was einer Minderlenkung entspricht. Unter Abströmwinkel wird der Winkel zwischen der Abströmung und der durch die Abströmkannten benachbarter Schaufeln verlaufenden Abströmebene verstanden, wobei der Winkel ausgehend von der Abströmung im mathematisch negativen Drehsinn zu der Abströmebene bestimmt wird.

**[0005]** Eine weitere Steigerung des Wirkungsgrades moderner Verdichter ist demzufolge stark mit der Beeinflussung der Sekundärströmungseffekte (Kanalwirbel) gekoppelt, da auf diese Weise die Verluste reduziert werden können.

**[0006]** Eine möglichst homogene Verteilung des Abströmwinkels hinter den einzelnen Schaufelreihen eines Verdichters ist im Auslegungsprozess ein wesentliches Kriterium, da zu große Abweichungen bzw. Schwankungen des Abströmwinkels eine stark inhomogene Zuströmung zur nachfolgenden Schaufelreihe bedeutet. Dies kann erheblichen Einfluss auf das Leistungs- und Verlustverhalten der einzelnen Stufen sowie des gesamten Verdichters haben.

**[0007]** Die inhomogenen Abströmwinkelverteilungen treten im Wesentlichen in den Randzonen der Schaufelreihen und somit im Übergangsbereich zwischen Endwand und der Schaufel auf und werden durch die dort vorherrschenden Sekundärströmungsphänomene verursacht. Eine bekannte Metho-

de zur Strömungsbeeinflussung ist die Verwendung einer Ausrundung am Schaufelwandübergang, sogenannte Fillets. Fillets haben die Aufgabe, den Übergang der Querströmung von den Wänden auf die Schaufel möglichst verlustarm zu realisieren. Fertigungsbedingt werden zurzeit Schaufeln zumeist mit einem Fillet mit konstantem Radius hergestellt, wobei derartige Fillets keinen signifikanten Effekt auf die Abströmwinkelverteilung haben.

**[0008]** Axialverdichter nach dem Oberbegriff von Anspruch 1 sind beispielsweise in DE 10 2005 026 525 A1, US 2006/0275112 A1, US 2006/0233641 A1, US 2004/0081548 A1 oder US 2004/0062636 A1 offenbart.

**[0009]** Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, einen Axialverdichter zu schaffen, der eine verbesserte Abströmwinkelverteilung aufweist.

**[0010]** Der erfindungsgemäße Axialverdichter ist durch die Merkmale des Patentanspruchs 1 definiert.

**[0011]** Der erfindungsgemäße Axialverdichter weist ein Verdichtungsgitter mit einem Kranz von Schaufeln auf, deren radial äußere und/oder innere Enden mit einer ringförmigen Endwand verbunden sind und die jeweils eine Anströmkannte, eine Abströmkannte, eine Druckseite, eine Saugseite und eine Höhe  $H$  aufweisen, wobei der Kranz von Schaufeln eine Teilung  $t$  besitzt. Den Übergang zwischen einer Schaufel und der Endwand bilden Ausrundungen, sogenannte Fillets. Die Ausrundungen erstrecken sich auf der Druckseite entlang der Endwand mit einer Breite  $b_D$  und entlang der Schaufel mit einer Höhe  $h_D$ . Die Höhe  $h_D$  der Ausrundung auf der Druckseite nimmt von der Anströmkannte aus stromabwärts zu.

**[0012]** Es hat sich herausgestellt, dass über die Kontur der Ausrundung die Ausbildung des Kanalwirbels beeinflusst werden kann. Die erfindungsgemäße Kontur der Ausrundung erstreckt sich insbesondere im stromabwärtigen Bereich der Schaufel relativ weit auf die Schaufel. Auf diese Weise wird der statische Druck im Eckenbereich reduziert und der Druckgradient in Teilungsrichtung nimmt ab. Dieser Druckgradient ist die treibende Kraft für die Querströmung an der Endwand von der Druckseite einer Schaufel zu der Saugseite der benachbarten Schaufel und somit auch für die Ausbildung des Kanalwirbels. Durch den reduzierten Druckgradienten entsteht eine geringere Ablenkung der Strömung an der Endwand und folglich wird die Überumlenkung im wandnahen Bereich reduziert. Die Abschwächung des Druckgradienten verringert auch die Rotation des Kanalwirbels, wodurch die oberhalb der Endwand vorliegende Minderumlenkung reduziert ist. Die erfindungsgemäße Ausgestaltung der Ausrundung führt somit zu einer verbesserten Abströmverteilung und somit zu einer verbesserten Zuströmung einer nachfolgenden Schau-

felreihe. Der Kranz von Schaufeln kann einen Rotor bilden, bei dem die Endwand durch die Nabe gebildet ist oder einen Stator, bei dem die Endwand durch die Gehäusewand gebildet ist. Ferner sind Ausführungsbeispiele möglich, bei dem ein Stator sowohl durch die Nabe als auch durch die Gehäusewand gebildete Endwände aufweist.

**[0013]** Vorzugsweise ist vorgesehen, dass auf der Druckseite im Bereich der ersten Schaufelhälfte die Breite  $b_D$  der Ausrundung von der Anströmkannte aus stromabwärts zunimmt. Dabei ist vorzugsweise die Breite  $b_D$  in der Schaufelmitte maximal. Eine derartige Kontur der Ausrundung führt auf der Druckseite im stromabwärtigen Bereich der Schaufel zu einer sehr großen Ausrundung, wobei sich diese relativ weit auf die Endwand erstreckt. Dadurch wird der statische Druck im Eckenbereich weiter reduziert, wodurch der Druckgradient in Teilungsrichtung weiter abnimmt. Dadurch kann, wie bereits beschrieben, die Ausbildung des Kanalwirbels beeinflusst werden, wodurch eine Reduzierung der Überumlenkung bzw. Minderumlenkung erreicht werden kann.

**[0014]** Vorzugsweise ist vorgesehen, dass auf der Druckseite gilt:  $b_D/t \geq h_D/H$ . Ein derartiges Verhältnis der Breite  $b_D$ , die auf die Teilung  $t$  bezogen ist, und der Höhe  $h_D$ , die auf die Schaufelhöhe  $H$  bezogen ist, hat sich als besonders vorteilhaft herausgestellt.

**[0015]** Vorzugsweise ist vorgesehen, dass die Ausrundung auf der Druckseite eine gleichgerichtete Krümmung aufweist. Ferner kann ein gleichmäßiger Übergang zwischen der Schaufel und der Endwand, der glatt und kantenlos ist, bestehen.

**[0016]** In einem Ausführungsbeispiel der Erfindung ist vorgesehen, dass auf der Druckseite der den Übergang zwischen Schaufel und Ausrundung beschreibende Gradient  $\text{grad}_{DS}$  zumindest in der zweiten Schaufelhälfte stromabwärts abnimmt. Die Länge des Gradienten beschreibt den Verlauf der Oberfläche der Ausrundung, wobei ein kleiner Gradient einer Kontur der Ausrundung bildet, deren Verlauf sich frühzeitig von der Schaufeloberfläche löst und somit eine relativ dicke Ausrundung bildet. Ein großer Gradient hingegen führt zu einer Kontur der Ausrundung, die sich in ihrem Verlauf langsam von der Schaufeloberfläche löst und somit eine dünne Ausrundung bildet. Es hat sich herausgestellt, dass eine Kontur der Ausrundung, bei der auf der Druckseite stromabwärts der Gradient  $\text{grad}_{DS}$  abnimmt und somit die Dicke der Ausrundung am Übergang zur Schaufel zunimmt, besonders vorteilhaft für die Beeinflussung des Kanalwirbels ist.

**[0017]** Die Erfindung kann ferner vorsehen, dass auf der Druckseite der dem Übergang zwischen Endwand und Ausrundung beschreibende Gradient  $\text{grad}_{DE}$  zumindest in der zweiten Schaufelhälfte stromab-

wärts zunimmt. Die Kontur der Ausrundung wird somit stromabwärts bei dem Übergang zwischen Endwand und Ausrundung dünner. Eine derartig ausgebildete Ausrundung hat sich als besonders vorteilhaft zur Beeinflussung des Kanalwirbels herausgestellt.

**[0018]** In einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung ist vorgesehen, dass die Ausrundung auf der Saugseite eine sich entlang der Endwand erstreckende Breite  $b_S$  und eine entlang der Schaufel erstreckende Höhe  $h_S$  besitzt und dass die Höhe  $h_S$  der Ausrundung auf der Saugseite von der Anströmkante aus stromabwärts zunimmt, wobei vorzugsweise die Höhe  $h_S$  an der Abströmkante maximal ist. Die Ausrundung an der Saugseite erstreckt sich somit insbesondere im stromabwärts gelegenen Bereich relativ weit auf die Schaufel. Eine derartige Ausgestaltung der Ausrundung auf der Saugseite kann bei einem Axialverdichter auch unabhängig von der erfindungsgemäßen Ausgestaltung der Ausrundung auf der Druckseite verwirklicht sein.

**[0019]** Es hat sich herausgestellt, dass durch eine sich stromabwärts verändernde Kontur der Ausrundung auf der Saugseite die Eckenablösung verringert bzw. verhindert werden kann, wodurch nicht nur die Abströmwinkelverteilung verbessert werden kann, sondern darüber hinaus durch die Ausrundung entstehende Verluste verringert werden können.

**[0020]** Dabei kann vorgesehen sein, dass die Breite  $b_S$  der Ausrundung auf der Saugseite von der Anströmkante aus stromabwärts zunimmt, wobei vorzugsweise die Breite  $b_S$  an der Abströmkante maximal ist.

**[0021]** Die Ausrundung erstreckt sich somit insbesondere im stromabwärts gelegenen Bereich sehr weit auf die Endwand.

**[0022]** Es hat sich herausgestellt, dass eine Ausrundung, die auf der Saugseite stromabwärts langsam anwächst und die maximale Größe im Bereich der Abströmkante besitzt, ein Ablösegebiet mit geringem statischen Druck an der Endwand hervorruft. Dadurch wird in diesem Bereich der Endwand ein zusätzliches Druckgefälle geschaffen, welches im Gegensatz zu dem in Teilungsrichtung wirkenden Druckgradienten gerichtet ist. Auf diese Weise kann die Überumlenkung an der Endwand bei der Abströmung von der Abströmkante reduziert werden.

**[0023]** Die Erfindung kann vorsehen, dass auf der Saugseite gilt:  $b_S/t \geq h_S/H$ . Es hat sich herausgestellt, dass dieses Verhältnis der auf die Teilung  $t$  bezogenen Breite  $b_S$  zu der auf die jeweilige Schaufelhöhe  $H$  bezogenen Höhe  $h_S$  der Ausrundung besonders vorteilhaft für die Beeinflussung des Abströmwinkels ist.

**[0024]** In einem Ausführungsbeispiel der Erfindung kann vorgesehen sein, dass auf der Saugseite der den Übergang zwischen Schaufel und Ausrundung beschreibende Gradient  $\text{grad}_{SS}$  von der Anströmkante zur Schaufelmitte hin stromabwärts ansteigt und/oder von der Schaufelmitte aus zur Abströmkante hin stromabwärts abnimmt. Die Kontur der Ausrundung ist somit vom Übergang zur Schaufel im Bereich der Schaufelmitte dünner als in den Bereichen der Anströmkante und/oder der Abströmkante ausgebildet.

**[0025]** Die Erfindung kann ferner vorsehen, dass auf der Saugseite der den Übergang zwischen Endwand und Ausrundung beschreibende Gradient  $\text{grad}_{DS}$  von der Anströmkante aus zur Schaufelmitte hin stromabwärts ansteigt und/oder von der Schaufelmitte aus zur Abströmkante hin stromabwärts abnimmt. Die Kontur der Ausrundung kann somit auf der Saugseite bei dem Übergang der Endwand auf die Ausrundung im Bereich der Schaufelmitte dünn ausgebildet sein und verdickt sich zu der Anströmkante und/oder der Abströmkante hin.

**[0026]** Eine derartige Ausgestaltung der Ausrundung auf der Saugseite hat sich zur Homogenisierung der Abströmung und zur Verlustreduzierung als besonders vorteilhaft herausgestellt.

**[0027]** Die Erfindung sieht im Wesentlichen vor, die statische Druckverteilung an der Endwand im Eckenbereich zwischen Schaufel und Endwand innerhalb der Schaufelpassage und im Bereich der Schaufelhinterkante zu beeinflussen. Über die dreidimensionale Konturierung der Ausrundung wird der Druckgradient in Teilungsrichtung innerhalb der Schaufelpassage im Bereich der Schaufeldruckseite reduziert. Dadurch wird die Ablenkung der Querströmung an der Endwand von der Druckseite einer Schaufel zur Saugseite der benachbarten Schaufel verringert und die Rotation des Kanalwirbels ist reduziert. Dadurch wird eine Reduzierung der Minder- und Überumlenkung im Randzonenbereich der Schaufelpassage erreicht, wodurch eine homogene Abströmung möglich ist. Zusätzlich entsteht an der Abrundung im Bereich der Abströmkante aufgrund von Ablösungen ein Bereich niedrigen statischen Drucks, wodurch hier ein zusätzlicher Druckgradient existiert, der in Richtung Druckseite der Schaufel gerichtet ist und damit eine Geschwindigkeitskomponente an der Endwand erzeugt, die ebenfalls der Überumlenkung im Bereich der Endwand entgegenwirkt. Dadurch kann die Abströmwinkelverteilung hinter dem Schaufelkranz zusätzlich homogenisiert werden.

**[0028]** Im Folgenden wird unter Bezugnahme auf die nachfolgenden Figuren die Erfindung näher erläutert.

**[0029]** Es zeigen:

**[0030]** Fig. 1 eine schematische Darstellung zweier Schaufeln im Bereich der Endwand sowie des Kanalwirbels, der sich von der Druckseite auf die Saugseite der Schaufeln ausbildet,

**[0031]** Fig. 2a und Fig. 2b eine schematische Darstellung der Ausrundungen an der Druckseite und an der Saugseite einer Schaufel,

**[0032]** Fig. 3 eine Definition der Parameter der Kontur der Ausrundung zwischen Schaufel und Endwand und

**[0033]** Fig. 4 eine Darstellung der Sekundärströmungen und Wirbel in einem Axialverdichtergitter nach Hübner (1996).

**[0034]** In Fig. 1 sind zwei Schaufeln **10** dargestellt, die zusammen mit weiteren Schaufeln einen Kranz bilden und von einer Nabe radial abstehen. Die radial inneren Enden der Schaufeln **10** sind mit einer von der Nabe gebildeten ringförmigen Endwand **16** verbunden. Nabe und Endwand **16** bilden zusammen mit den Schaufeln **10** das sogenannte Schaufelgitter. In alternativen, nicht dargestellten Ausführungsbeispielen wird die Endwand **16** von einer Gehäusewand gebildet, von der die Schaufeln **10** radial nach innen abstehen oder die Schaufeln **10** sind mit der Nabe und der Gehäusewand verbunden, so dass jede Schaufel **10** zwei Endwände besitzt.

**[0035]** Jede Schaufel **10** hat eine vordere Anströmkannte **12** und eine hintere Abströmkannte **13**. Die Unterseite bildet eine Druckseite **14** und die Oberseite bildet eine Saugseite **15**. Bei einem Rotor rotiert das gesamte Schaufelgitter. Bei einem Stator ist hingegen das gesamte Schaufelgitter ortsfest und es wird von einer Luftströmung angeströmt. In Fig. 1 ist die Anströmung mit einem Pfeil **17** bezeichnet. Der Winkel der Zuströmung kann das Leistungs- und Verlustverhalten der aus dem Schaufelkranz gebildeten Stufe des Axialverdichters beeinflussen. Daher ist das Ziel der Erfindung, eine homogene Abströmwinkelverteilung einer Verdichterstufe zu erreichen. Die Abströmung ist in Fig. 1 durch einen Pfeil **18** dargestellt. Die Schaufeln **10** weisen einen Abstand, der durch die Teilung  $t$  wiedergegeben ist, auf. Ferner besitzen die Schaufeln eine Höhe  $H$ . Die Teilung  $t$  und die Höhe  $H$  der Schaufeln sind bei der Auslegung von Schaufelkränzen gängige Größen, und werden somit nicht näher erläutert. Die Abströmung **18** erfolgt in einem Abströmwinkel  $\alpha$ , der zwischen der Abströmung **18** und einer durch die Abströmkannte **13** zweier benachbarter Schaufeln verlaufender Abströmebene **20** gebildet ist. Der Abströmwinkel  $\alpha$  wird ausgehend von der Abströmung **18** im mathematisch negativen Drehsinn bestimmt.

**[0036]** Der Übergang zwischen der Endwand **16** und den Schaufeln **10** wird durch Ausrundungen **19a**, **19b**

gebildet, wobei die druckseitigen Ausrundungen mit dem Bezugszeichen **19a** und die saugseitigen Ausrundungen mit dem Bezugszeichen **19b** bezeichnet sind.

**[0037]** Die druckseitigen Ausrundungen **19a** und die saugseitigen Ausrundungen **19b** weisen eine gleichgerichtete Krümmung auf, wodurch ein glatter kantenloser Übergang zwischen Schaufel **10** und Endwand **16** entsteht.

**[0038]** Wie am besten aus Fig. 2a und Fig. 2b hervorgeht, in denen die Ausrundungen auf der Druckseite **14** und auf der Saugseite **15** dargestellt sind, verändert sich die Kontur der Ausrundung in Stromabwärtsrichtung. Die Ausrundung **19a** auf der Druckseite **14** ist relativ groß ausgeführt und erstreckt sich insbesondere auf der stromabwärts gelegenen zweiten Schaufelhälfte relativ weit auf die Schaufel **10** und die Endwand **16**. Die Ausrundung **19a** nimmt von der Anströmkannte **12** aus stromabwärts kontinuierlich zu und erreicht ab der Schaufelmitte in etwa die maximale Größe. Ab der Schaufelmitte verändert sich die Größe der Ausrundung **19a** stromabwärts lediglich geringfügig und bleibt im Wesentlichen gleich groß.

**[0039]** Die Ausrundung **19b** auf der Saugseite **15** vergrößert sich stromabwärts langsam und besitzt ihr Maximum an der Abströmkannte **13**.

**[0040]** Die Kontur der Ausrundung **19a** und **19b** kann durch verschiedene Parameter beschrieben werden, die in Fig. 3 schematisch dargestellt sind. Die Ausrundung **19a** besitzt eine Höhe an der Schaufel  $h_D$ . Die Ausrundung **19b** an der Saugseite **15** besitzt eine Höhe an der Schaufel  $h_S$ . Die Erstreckung der Ausrundungen **19a**, **19b** entlang der Endwand werden als Breite  $b_D$  bzw.  $b_S$  bezeichnet.

**[0041]** Der Übergang zwischen der Ausrundung zu der Schaufel kann durch einen Gradienten beschrieben werden, wobei der saugseitige Gradient als  $grad_{SS}$  und der druckseitige Gradient als  $grad_{DS}$  bezeichnet wird. Der Übergang von der Ausrundung zu der Endwand kann ebenfalls durch einen Gradienten beschrieben werden, wobei der druckseitige Gradient  $grad_{DE}$  und der saugseitige Gradient  $grad_{SE}$  ist. Die Länge des Gradienten bestimmt, ob die Ausrundung eine dickere oder dünnere Form aufweist. Ein Gradient mit einer kleinen Länge ergibt eine dicke Form der Ausrundung **19a**, **19b**, wohingegen ein Gradient mit einer großen Länge eine dünne Form der Ausrundung **19a**, **19b** beschreibt. Die Form der Ausrundung **19a**, **19b** muss an den Übergängen zu der Endwand **16** und der Schaufel **10** nicht gleichmäßig sein, sondern es kann ein Übergang von der Endwand **16** zu der Ausrundung **19a**, **19b** dick ausgestaltet sein, so dass der Gradient  $grad_{DE}$  bzw.  $grad_{SE}$  eine kleine Länge aufweist, wohingegen der Übergang der Ausrundung **19a**, **19b** zu der Schaufel **10** dünn ausgebil-

det ist, so dass der Gradient  $\text{grad}_{\text{SS}}$  bzw.  $\text{grad}_{\text{DS}}$  eine große Länge aufweist und sich somit die Form der Ausrundung **19a**, **19b** lang ausläuft und langsam der Schaufeloberfläche annähert.

**[0042]** Die in der **Fig. 2a** dargestellte Ausrundung **19a** auf der Druckseite kann mit diesen Parametern wie folgt beschrieben werden: Von der Anströmkante **12** aus nimmt die Breite  $b_D$  und die Höhe  $h_D$  bis zur Schaufelmitte kontinuierlich zu. Anschließend nimmt die Breite  $b_D$  stromabwärts in Richtung der Abströmkante etwas ab. Die Höhe  $h_D$  nimmt von der Schaufelmitte in Richtung der Abströmkante **13** geringfügig zu. Der Gradient  $\text{grad}_{\text{DE}}$  an der Endwand ist in der ersten Schaufelhälfte weitestgehend konstant und besitzt in diesem Bereich eine sehr kleine Länge. Ab der Schaufelmitte zu der Abströmkante **13** hin nimmt die Länge des Gradienten  $\text{grad}_{\text{DE}}$  zu. Der Gradient an der Schaufel  $\text{grad}_{\text{DS}}$  ist von der Anströmkante **12** bis zur Schaufelmitte auf der Druckseite relativ konstant und nimmt danach zu der Abströmkante **13** hin ab. In der ersten Schaufelhälfte weist der Gradient  $\text{grad}_{\text{DS}}$  eine relativ große Länge auf, an der Abströmkante **13** hingegen eine sehr kleine Länge.

**[0043]** Die Form und Größe der Kontur der Ausrundung **19a** an der Druckseite **14** kann somit folgendermaßen beschrieben werden: An der Anströmkante **12** sehr flach und sehr schmal mit einem dünnen Übergang zur Schaufel **10** und einem dicken Übergang zur Endwand **16**; in der Schaufelmitte sehr hoch und sehr breit mit einem dünnen Übergang zur Schaufel **10** und einem dicken Übergang zur Endwand **16**; an der Schaufelhinterkante hoch und breit mit einem dicken Übergang zur Schaufel **10** und einem dünnen Übergang zur Endwand **16**.

**[0044]** An der Saugseite **15** kann die Kontur der Ausrundung **19b** mit den zuvor definierten Parametern wie folgt beschrieben werden: Von der Anströmkante **12** nehmen die Breite  $b_S$  und die Höhe  $h_S$  der Ausrundung **19a** stromabwärts zu der Abströmkante **13** hin kontinuierlich zu. Der den Übergang zu der Endwand **16** beschreibende Gradient  $\text{grad}_{\text{SE}}$  ist im Bereich der Anströmkante **12** relativ kurz, steigt zu der Schaufelmitte hin an und nimmt zum Bereich der Abströmkante **13** hin wiederum ab. Dabei ist die Länge des Gradienten  $\text{grad}_{\text{SE}}$  im Bereich der Abströmkante **13** und dem Bereich der Anströmkante **12** in etwa auf einem gleichen Niveau.

**[0045]** Der den Übergang zu der Endwand **16** beschreibende Gradient  $\text{grad}_{\text{SE}}$  nimmt von der Anströmkante **12** zu der Schaufelmitte hin zu und zum Bereich der Abströmkante **13** hin wiederum geringfügig ab. Dabei ist der Gradient  $\text{grad}_{\text{SE}}$  im Bereich der Anströmkante **12** sehr kurz, in der Schaufelmitte relativ lang ausgebildet. Im Bereich der Hinterkante weist der Gradient  $\text{grad}_{\text{SE}}$  eine durchschnittliche Länge auf, d. h. der die Länge des Gradienten  $\text{grad}_{\text{SE}}$  im Bereich

der Abströmkante **13** ist etwa mittig zwischen den Längen des Gradienten  $\text{grad}_{\text{SE}}$  an der Anströmkante **12** und in der Mitte der Schaufelkante einzuordnen. Der Verlauf der Kontur der Ausrundung **19b** an der Saugseite **15** kann wie folgt beschrieben werden: Im Bereich der Anströmkante **12** flach, sehr schmal mit einem dick ausgebildeten Übergang zu Schaufel **10** und Endwand **16**; im Bereich der Schaufelmitte hoch und schmal mit einem dünnen Übergang zu Schaufel **10** und Endwand **16**; im Bereich der Abströmkante **13** hoch und breit mit einem dicken Übergang zur Schaufel **10** und einem dünnen Übergang zur Endwand **16**.

**[0046]** Eine derartige Ausbildung der Ausrundungen **19a** und **19b** haben sich als besonders vorteilhaft für die Beeinflussung der Sekundärströmung herausgestellt. Der Druckgradient in Teilungsrichtung innerhalb der Schaufelpassage wird im Bereich der Druckseite **14** reduziert. Dadurch wird die Ablenkung der Querströmung an der Endwand **16** von der Druckseite **14** einer Schaufel **10** zur Saugseite **15** der benachbarten Schaufel **10** verringert und die Rotation des Kanalwirbels reduziert. Dadurch kann die Minderumlenkung und die Überumlenkung im Randzonenbereich der Schaufelpassage reduziert werden, wodurch eine homogenere Abströmung erreicht wird. An der Ausrundung **19a**, **19b** im Bereich der Abströmkante **13** entsteht aufgrund von Ablösungen ein Bereich niedrigeren statischen Drucks, wodurch hier ein zusätzlicher Druckgradient existiert, der in Richtung der Druckseite **14** gerichtet ist und damit eine Geschwindigkeitskomponente an der Endwand **16** erzeugt, die ebenfalls der Überumlenkung im Bereich der Endwand **16** entgegenwirkt. Insgesamt kann somit eine sehr homogene Abströmwinkelverteilung erreicht werden.

**[0047]** Die Kontur der Ausrundungen **19a**, **19b** sind aufgrund moderner Fertigungstechniken beispielsweise mittels eines Kugelkopffräasers oder in einem 3D-Druckverfahren auf einfache Art und Weise herstellbar.

## Patentansprüche

1. Axialverdichter mit einem Verdichtungsgitter mit einem Kranz von Schaufeln (**10**), deren radial innere und/oder äußere Enden mit einer ringförmigen Endwand (**16**) verbunden sind und die jeweils eine Anströmkante (**12**), eine Abströmkante (**13**), eine Druckseite (**14**), eine Saugseite (**15**) und eine Höhe  $H$  aufweisen, wobei der Kranz von Schaufeln (**10**) eine Teilung  $t$  besitzt, und mit jeweils einer den Übergang zwischen einer Schaufel (**10**) und der Endwand (**16**) bildenden Ausrundung (**19a**, **19b**), **dadurch gekennzeichnet**, dass die Ausrundung (**19a**) auf der Druckseite (**14**) eine sich entlang der Endwand (**16**) erstreckende Brei-

te  $b_D$  und eine entlang der Schaufel (10) erstreckende Höhe  $h_D$  besitzt, und dass die Höhe  $h_D$  der Ausrundung (19a) auf der Druckseite (14) von der Anströmkannte (12) aus stromabwärts zunimmt.

2. Axialverdichter nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass auf der Druckseite (14) im Bereich der ersten Schaufelhälfte die Breite  $b_D$  der Ausrundung (19a) von der Anströmkannte (12) aus stromabwärts zunimmt, wobei vorzugsweise die Breite  $b_D$  in der Schaufelmitte maximal ist.

3. Axialverdichter nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass auf der Druckseite (14) gilt:  $b_D/t \geq h_D/H$ .

4. Axialverdichter nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Ausrundung (19a) auf der Druckseite (14) eine gleichgerichtete Krümmung aufweist.

5. Axialverdichter nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass auf der Druckseite (14) der den Übergang zwischen Schaufel (10) und Ausrundung (19a) beschreibende Gradient  $grad_{DS}$  zumindest in der zweiten Schaufelhälfte stromabwärts abnimmt.

6. Axialverdichter nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass auf der Druckseite (14) der den Übergang zwischen Endwand (16) und Ausrundung (19a) beschreibende Gradient  $grad_{DE}$  zumindest in der zweiten Schaufelhälfte stromabwärts zunimmt.

7. Axialverdichter nach einem der Ansprüche 1–6 oder nach dem Oberbegriff von Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Ausrundung (19b) auf der Saugseite (15) eine sich entlang der Endwand (16) erstreckende Breite  $b_S$  und eine entlang der Schaufel (10) erstreckende Höhe  $h_S$  besitzt, und dass die Höhe  $h_S$  der Ausrundung (19b) auf der Saugseite (15) von der Anströmkannte (12) aus stromabwärts zunimmt, wobei vorzugsweise die Höhe  $h_S$  an der Abströmkannte (13) maximal ist.

8. Axialverdichter nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Breite  $b_S$  der Ausrundung (19b) auf der Saugseite (15) von der Anströmkannte (12) aus stromabwärts zunimmt, wobei vorzugsweise die Breite  $b_S$  an der Abströmkannte (13) maximal ist.

9. Axialverdichter nach Anspruch 7 oder 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass auf der Saugseite (14) gilt:  $b_S/t \geq h_S/H$ .

10. Axialverdichter nach einem der Ansprüche 7 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Ausrun-

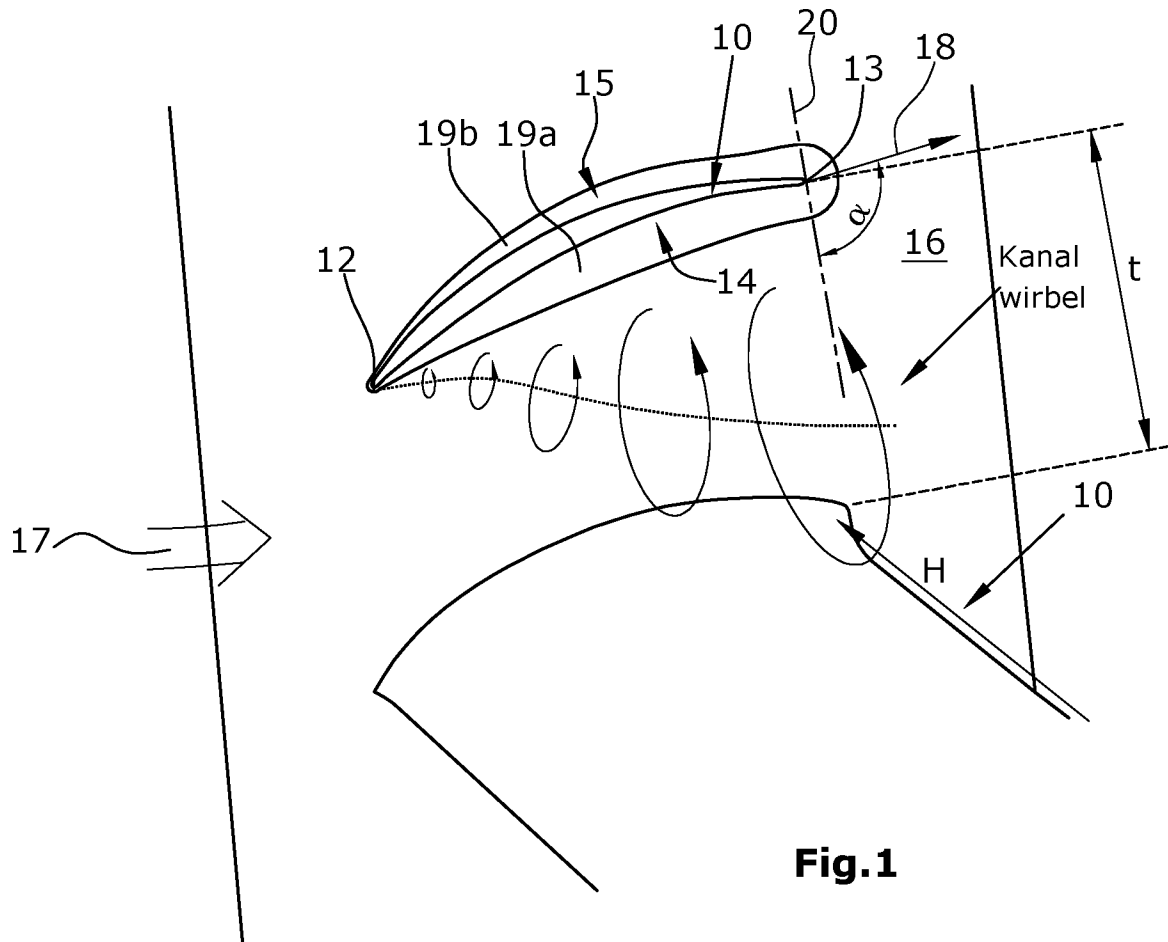
dung (19a) auf der Saugseite (15) eine gleichgerichtete Krümmung aufweist.

11. Axialverdichter nach einem der Ansprüche 7 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass auf der Saugseite (15) der den Übergang zwischen Schaufel (10) und Ausrundung (19b) beschreibende Gradient  $grad_{SS}$  von der Anströmkannte (12) aus zur Schaufelmitte hin stromabwärts ansteigt und/oder von der Schaufelmitte aus zur Abströmkannte (13) hin stromabwärts abnimmt.

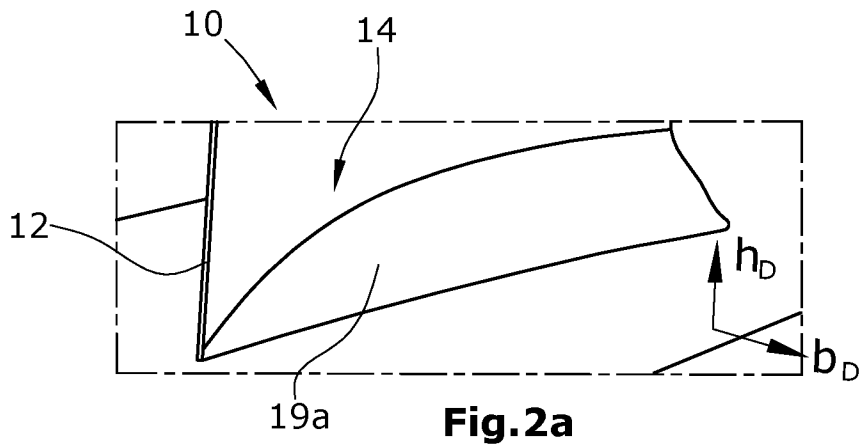
12. Axialverdichter nach einem der Ansprüche 7 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass auf der Saugseite (14) der den Übergang zwischen Endwand (16) und Ausrundung (19b) beschreibende Gradient  $grad_{DS}$  von der Anströmkannte (12) aus zur Schaufelmitte hin stromabwärts ansteigt und/oder von der Schaufelmitte aus zur Abströmkannte (13) hin stromabwärts abnimmt.

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

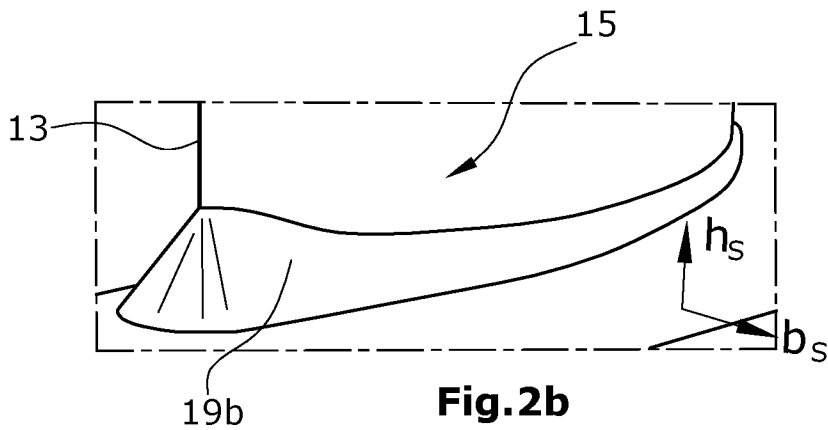
Anhängende Zeichnungen



**Fig.1**

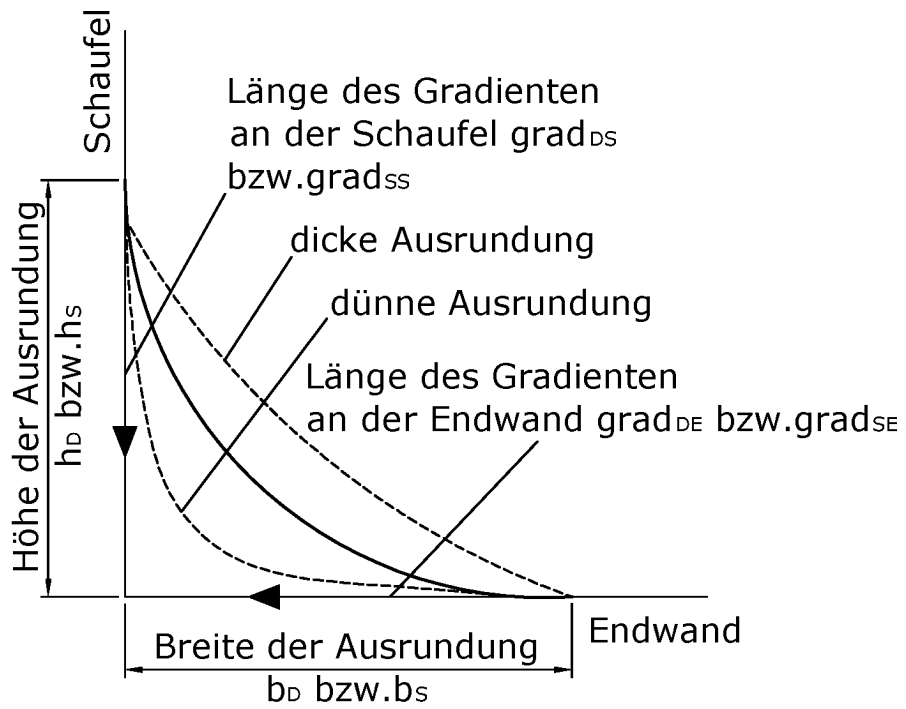


**Fig.2a**

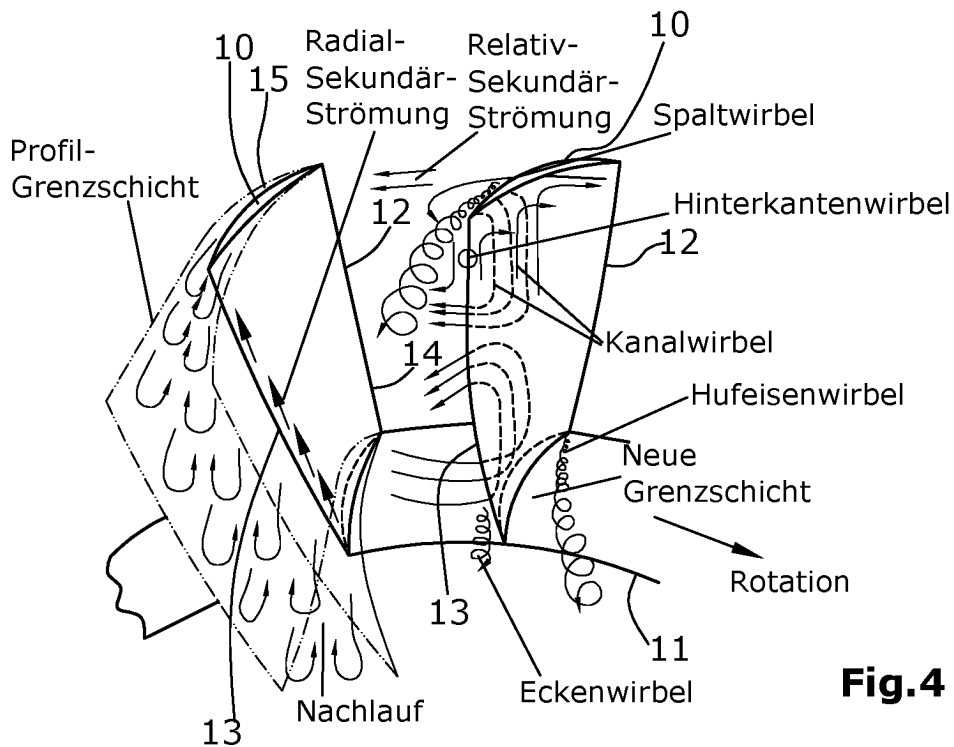


**Fig.2b**





**Fig.3**



**Fig.4**