



(10) **DE 10 2018 108 729 A1** 2019.10.17

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2018 108 729.2**

(22) Anmeldetag: **12.04.2018**

(43) Offenlegungstag: **17.10.2019**

(51) Int Cl.: **F02C 7/12 (2006.01)**

(71) Anmelder:
**Karlsruher Institut für Technologie, 76131
Karlsruhe, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:
US 2016 / 0 177 737 A1

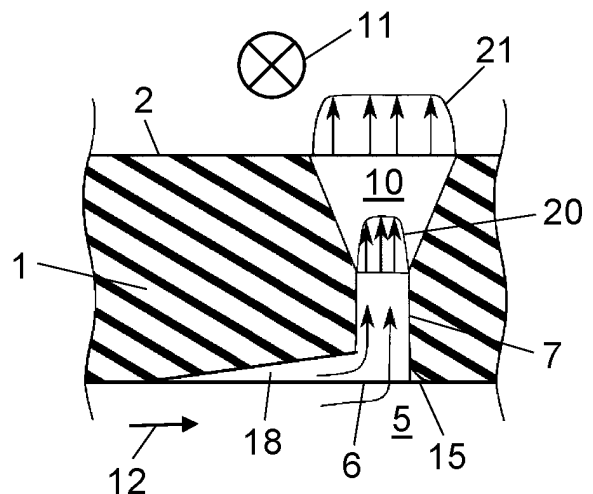
(72) Erfinder:
**Fraas, Marc, 75015 Bretten, DE; Glasenapp,
Tobias, 76131 Karlsruhe, DE; Schulz, Achmed,
Dr., 76139 Karlsruhe, DE; Bauer, Hans-Jörg, Prof.
Dr., 75177 Pforzheim, DE**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Strömungsleitfläche, strömungsführende Komponente einer Verbrennungskraftmaschine sowie eine Turbinenschaufel**

(57) Zusammenfassung: Strömungsleitfläche (2), die einem in einer festgelegten Strömungsrichtung tangential geführten Heissgasstrom (11) aussetzbar ist, einer stromführenden Komponente mit Filmkühlungsmitteln, wobei die Filmkühlungsmittel einen Kühlmittelverteilerkanal (5), mindestens eine über einen Eintritt aus diesen ausmündenden Filmkühlbohrung (7) zur Strömungsleitfläche (2) sowie aus der Strömungsleitfläche ausmündende Kühlmittelaustrittsöffnung umfassen, die mindestens eine Filmkühlbohrung im spitzen Winkel zur Strömungsrichtung des Heißgasstroms (11) ausgerichtet ist sowie im Kühlmittelverteilerkanal (5) eine festgelegte Kühlmittelströmungsrichtung vorgesehen ist. Wesentlich ist, dass der Eintritt einen entgegen der Kühlmittelströmungsrichtung orientierten rillenförmigen Einlauf (18) umfasst, der als Vertiefung in der Wandung des Kühlmittelverteilerkanals ausgestaltet ist und in die Filmkühlbohrung übergeht, der rillenförmige Einlauf einen Querschnitt aufweist, der zur Filmkühlbohrung hin stetig zunimmt sowie der Einlauf und der Eintritt mit der Wandung des Kühlmittelverteilerkanals eine umlaufende Kante bildet.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Strömungsleitfläche einer stromführenden Komponente mit Filmkühlungsmitteln, eine stromführenden Komponente sowie eine Turbinenschaufel mit Filmkühlungsmitteln.

[0002] Strömungsleitflächen mit Filmkühlungsmitteln sind im Verbrennungsmaschinenbau bekannt. Insbesondere bei Gasturbinen entstehen in einer Brennkammer Brenngase, die als sog. Heißgas mit einer sehr hohen Temperatur auf nachfolgende strömungsführende Komponenten in der Gasturbine, insbesondere den Turbinenlauf- und leitschaufeln auftreffen und diese entsprechend aufheizen. Um die Temperatur und damit die thermische Belastung der mit dem Heißgas thermisch wechselwirkenden nachfolgenden strömungsführenden Komponenten in der Gasturbine, insbesondere die Turbinenlauf- und leitschaufeln zu begrenzen und/oder abzusenken, ist es üblich, zumindest die besonders belasteten Bereiche wie z. B. die Turbinenschaufeln mittels einer Filmkühlung vor einer Überhitzung zu schützen.

[0003] Eine strömungsführende Komponente wie eine Turbinenschaufel besitzt hierzu sowohl interne Kühlluftverteilerkanäle als auch von diesen ausgehenden und an der thermisch belasteten Oberfläche der Komponente bzw. Turbinenschaufel austretenden Bohrungen, sogenannte Filmkühlbohrungen. Die internen Kühlluftverteilerkanäle dienen neben der internen Kühlung der Turbinenschaufeln insbesondere der Zuführung von Kühlluft zu den Filmkühlbohrungen. Das verwendete interne Kühlprinzip definiert dabei meist auch die Strömungsrichtung der Kühlluft. Da die Kanäle auch die Aufgabe der internen Kühlung haben, ist die Geschwindigkeit in diesen Kanälen oft hoch und nicht optimal für die Anströmung der Filmkühlbohrung.

[0004] Die an den Filmkühlbohrungen vorherrschenden Heißgasströmungen bewirken, dass die austretende Kühlluft strömungsabwärts einen schützenden Kühlluftfilm unmittelbar über der Oberfläche einer Strömungsleitfläche bildet und die Oberfläche von der direkten Einwirkung des Heißgases schützt.

[0005] Beispielsweise wird in der EP 0 945 593 B1 eine mittels Filmkühlung gekühlte Wand mit einer äußeren mit einem Heißgasstrom beaufschlagten Oberfläche beschrieben, bei der Filmkühlungsmittel zum Einsatz kommen, umfassend einen Kühlmittelverteilerkanal sowie mindestens eine aus diesem ausmündende und zur Strömungsleitfläche in spitzem Winkel zur Strömungsrichtung ausgerichtete Filmkühlbohrung, die wiederum aus der Strömungsleitfläche ausmündende Kühlmittelaustrittsöffnung aufweist. Der Querschnitt der Filmkühlbohrung erweitert sich zur Kühlmittelaustrittsöffnung hin.

[0006] Durch die Filmkühlbohrungen strömt Luft oder ein gasförmiges Kühlmittel aus dem Kühlluftverteilerkanal vom Innern der Komponente über die Kühlmittelaustrittsöffnungen auf die mit Heißgas umströmte Außenwand, der Strömungsleitfläche. Von da an bildet sich in Strömungsrichtung des Heißgases ein schützender Kühlfilm auf der Strömungsleitfläche aus. Da die Verwendung der Kühlluft zu Einbußen im thermischen Wirkungsgrad führt, muss die verwendete Kühlluft möglichst effizient eingesetzt werden. Ziel ist eine möglichst gleichmäßige Ausbreitung in lateraler Richtung. Nach aktuellem Stand der Technik werden Filmkühlbohrungen verwendet, die üblicherweise einen scharfkantigen, zylindrischen Einlauf auf der Kühlluftseite aufweisen, in die das Kühlmittel von dem Kühlluftverteilerkanal in die Filmkühlbohrungen umgelenkt wird. Auf der dem Heißgas zugewandten Seite wird häufig ein Diffusor eingesetzt, um eine möglichst breite Auffächerung des Strahls und ein geringes Eindringen in das Heißgas zu ermöglichen.

[0007] Eine bei der Einströmung in die Kühlluftbohrung stattfindende Umlenkung der Kühlluft einerseits und aus der Kühlmittelaustrittsöffnung heraus andererseits erzeugt nicht nur aerodynamische Verluste wie z. B. durch turbulente Kühlmitteströmung mit Drallbildung sowie Ablösungseffekte insbesondere an der zu kühlenden Strömungsleitfläche, sondern insbesondere auch die Ausbildung einer instationären, ungleichmäßigen oder unsymmetrischen Strömungsbildung über den Strömungsquerschnitt in den Kühlmittelbohrungen und damit auch eine Verschlechterung der Verteilung der Kühlmittel auf der Strömungsleitfläche.

[0008] Davon ausgehend liegt eine Aufgabe der Erfindung darin, eine Strömungsleitfläche der eingangs genannten Art mit Fluidfilmkühlung so zu gestalten, dass die vorgenannten Einschränkungen nicht oder nur in reduzierter Form auftreten.

[0009] Eine weitere Aufgabe liegt darin, eine strömungsführende Komponente einer Verbrennungskraftmaschine mit mindestens einer dieser Strömungsleitfläche vorzuschlagen.

[0010] Eine weitere Aufgabe liegt darin, eine Gasturbinenschaufel mit mindestens einer dieser Strömungsleitfläche vorzuschlagen.

[0011] Die Aufgaben werden durch eine Strömungsleitfläche, einer strömungsführende Komponente sowie einer Gasturbinenschaufel gemäß des ersten, siebenten und achten Patentanspruchs gelöst. Hierauf rückbezogene Unteransprüche geben vorteilhafte Ausgestaltungen wieder.

[0012] Zur Lösung der Aufgabe wird eine Strömungsleitfläche einer stromführenden Komponente mit Filmkühlungsmitteln vorgeschlagen. Die Strömungsleitfläche ist dafür ausgelegt, dass sie einem in einer festgelegten Strömungsrichtung tangential geführten Heissgasstrom aussetzbar ist, d. h. der Heissgasstrom wird vorzugsweise parallel zur und über die Strömungsleitfläche geleitet. Weiter bevorzugt liegt der Heissgasstrom hierzu in einem gerichteten Strömungszustand vor oder die Strömungsleitfläche ist für eine gerichtete Überströmung ausgelegt, womit auch vorgenannte Strömungsrichtung angebbbar ist.

[0013] Die genannten Filmkühlungsmittel umfassen einen Kühlmittelverteilerkanal in der stromführenden Komponente unterhalb der Strömungsleitfläche sowie mindestens eine über einen Eintritt aus diesem ausmündende Filmkühlbohrung, vorzugsweise mit rundem Strömungsquerschnitt, und aus der Strömungsleitfläche ausmündende Kühlmittelaustrittsöffnung. Die mindestens eine Filmkühlbohrung mündet im spitzen Winkel, vorzugsweise in einem Winkel zwischen 15° und 90° , weiter bevorzugt zwischen 25° und 45° zur Strömungsleitfläche, d.h. zu der tangential zu dieser ausgerichteten Strömungsrichtung aus. Wie bereits aus der eingangs genannten EP 0 945 593 B1 bekannt erweitert sich die Filmkühlbohrung zur Kühlmittelaustrittsöffnung hin.

[0014] Die Filmkühlungsmittel dienen der Hindurchleitung eines Kühlmittels, vorzugsweise eines Kühlgases, weiter bevorzugt einer Kühlluft, über den Kühlmittelverteilerkanal über einen Eintritt in jeweils einen der mindestens einen Filmkühlbohrung und über diese zur Kühlmittelaustrittsöffnung und von da aus auf die Strömungsleitfläche. In dem genannten Kühlmittelverteilerkanal und der mindestens einen Filmkühlbohrung ist jeweils eine Kühlmittelströmungsrichtung festgelegt.

[0015] Zur Lösung der Aufgabe werden an der mindestens einen Kühlmittelaustrittsöffnung zusätzliche Fluidführungsmittel für eine Homogenisierung der Kühlmittelströmung in der Filmkühlbohrung vorgeschlagen. Dies vergleichmäßigt auch das Strömungsprofil in der mindestens einen Filmkühlbohrung und führt zu einer optimierten Verteilung des Kühlmittels, vorzugsweise Kühlluft, am Austritt aus der mindestens einen Kühlmittelaustrittsöffnung auf die zu kühlenden Oberfläche der Strömungsleitfläche. Das Strömungsprofil gilt dann als homogen, wenn die Strömung stationär ist und bis auf den unmittelbaren Wandungsbereich in der Filmkühlbohrung eine gleiche Geschwindigkeit aufweist oder zumindest symmetrisch zu den Wandungsbereichen abfällt, d.h. keine Vorzugsrichtung aufweist.

[0016] Ein wesentliches Merkmal umfasst die Ausgestaltung der Filmkühlbohrung am Eintritt aus dem Kühlmittelverteilerkanal. Vorgeschlagen wird je ein rillenförmiger Einlauf an den Eintritten vom Kühlmittelverteilerkanal in die mindestens eine Filmkühlbohrung. Der jeweilige Eintritt umfasst damit einen parallel entgegen der Kühlmittelströmungsrichtung orientierten rillenförmigen Einlauf. Dieser ist als Vertiefung in der Wandung des Kühlmittelverteilerkanals ausgestaltet und mündet in die Filmkühlbohrung aus. Der rillenförmige Einlauf weist einen Querschnitt auf, der zur Filmkühlbohrung hin stetig zunimmt, d.h. vorzugsweise dessen Tiefe und/oder Breite zur Filmkühlbohrung zunimmt. Einlauf und der Eintritt bilden somit praktisch eine trichterförmige Abzweigung für das Kühlmittel aus dem Kühlmittelverteilerkanal jeweils in eine Filmkühlbohrung und bilden mit der Wandung des Kühlmittelverteilerkanals eine umlaufende Kante aus.

[0017] Die umlaufende Kante ist vorzugsweise als Abrisskante konzipiert, d.h. sie ist vorzugsweise scharfkantig. Ob eine Abrisskante scharfkantig ist oder nicht ist im Rahmen der vorgeschlagenen Strömungsleitfläche in Abhängigkeit des Durchmessers des zylindrischen Teils der Kühlmittelbohrung zu sehen. Der Bohrungsdurchmesser liegt typischerweise zwischen 0,3mm und 1mm. Der Verrundungsradius einer scharfkantigen Abrisskante liegt unterhalb von 5-10 % des Bohrungsdurchmessers.

[0018] Ziel der Ausgestaltung des Eintritts in die Filmkühlbohrung mit dem vorgeschlagenen rillenförmigen Einlauf ist eine verbesserte Kühlmittelverteilung auf der zu kühlenden Strömungsleitfläche bei gleicher genutzter Kühlmittelmenge. In dem rillenförmigen Einlauf wird die Kühlmittelströmung zusätzlich geführt und in die Kühlmittelbohrung umgeleitet. Der rillenförmige Einlauf bewirkt damit eine Veränderung des Strömungsbildes innerhalb der Kühlmittelbohrung. Die Strömung wird von dem rillenförmigen Einlauf aufgenommen und von diesem in die Filmkühlbohrung geleitet und homogenisiert, d.h. er vergleichmäßigt das Strömungsprofil in der Filmkühlbohrung.

[0019] Jedoch kommt es auch zu einem Abreißen von Kühlmittelströmungsanteilen am Eintritt in die Filmkühlbohrung abseits des rillenförmigen Einlaufs. Die dabei entstehenden Wirbel wirken ebenso auf die Kühlmittel-

strömung. In der Folge ist das Strömungsprofil im zylindrischen Teil der Filmkühlbohrung nicht homogen. Dies birgt die Gefahr einer inhomogenen Strömungsablösung im aufweitenden Teil der Filmkühlbohrung und läuft damit dem Ziel einer verbesserten Kühlmittelverteilung auf der zu kühlenden Strömungsleitfläche zuwider.

[0020] Eine bevorzugte Ausgestaltung sieht daher vor, die umlaufende Kante abseits des rillenförmigen Einlaufs verrundet auszugestalten. Die Kante erhält zusätzlich eine Verrundung im Übergangsbereich zwischen Kühlluftverteilerkanal und der mindestens einen Kühlmittelaustrittsöffnung, d.h. am Eintritt in eine Kühlmittelaustrittsöffnung abseits des rillenförmigen Einlaufs. Verrundet bedeutet im Rahmen dieser Anmeldung eine Ausgestaltung einer Kante mit einem größeren Verrundungsradius (vorzugsweise um mindestens das Doppelte oder Dreifache) als dem der vorgenannten Abrisskante, beispielsweise, d.h. mit einem Verrundungsradius oberhalb einer zuvor definierten scharfkantigen Kante, vorzugsweise mit einem Verrundungsradius oberhalb von 10% des Bohrungsdurchmessers. Weiter bevorzugt liegt der Verrundungsradius zwischen 30 und 70% des Durchmessers der Kühlmittelbohrung.

[0021] Die Verrundung reduziert dabei die Gefahr von Strömungsablösungen am Eintritt und stabilisiert so in vorteilhafter Weise eine Ausbildung einer homogenen Kühlmittelströmung in der Kühlmittelbohrung bis hin zur Kühlmittelaustrittsöffnung.

[0022] Damit unterscheidet sich die vorgenannte Ausgestaltung von einer als sog. NACA-Öffnung (NACA = National Advisory Committee for Aeronautics, im Folgenden NACA-Öffnung genannt, vgl. [1]) bekannten Gestaltung eines Lufteinlasses in einer Oberfläche. [1] offenbart einen in eine Oberfläche versenkten und im spitzen Winkel mit dieser auslaufenden Öffnung mit einem flachen, vorzugsweise rechteckigen Strömungsquerschnitt parallel zur Oberfläche, wobei sich der Querschnitt mit zunehmendem Auslauf verjüngt mit der Oberfläche eine Kante bildet. Durch diese Kanten in der Einlassöffnung werden Luftwirbel erzeugt, die eine sich an der Oberfläche bildende Grenzschichtströmung in der Einlassöffnung verdrängt und so den effektiven Querschnitt für einen Luftstrom in vorteilhafter Weise vergrößert. Dies ist insbesondere für Lufteintrittsöffnungen bei Jet-Flugzeugen oder schnellen Landfahrzeugen mit hohem Luftansaugbedarf von Vorteil und üblich.

[0023] Eine weitere Ausgestaltung des vorgenannten rillenförmigen Einlaufs sieht vor, diesen versetzt zu der Filmkühlbohrung anzuordnen, d.h. die Ausrichtung von Einlauf und Filmkühlbohrung windschief zueinander vorzusehen. Weiter bevorzugt mündet der rillenförmige Einlauf dabei tangential zur Wandung der Filmkühlbohrung in diesen aus. Auf diese Weise findet ein stetiger Übergang zwischen rillenförmigen Einlauf und Filmkühlbohrung statt. Ohne einen solchen Übergang würden Ablösungen auftreten, die das Ziel einer homogenen Strömung in der Bohrung konterkarieren würden.

[0024] Der Querschnitt der Filmkühlbohrung ist abseits des rillenförmigen Einlaufs, vorzugsweise zumindest abseits der Kühlmittelaustrittsöffnung vorzugsweise eckenlos, vorzugsweise rund, insbesondere bei vorgenannter Ausgestaltung unter Ausbildung einer bevorzugt homogenen Kühlmittelströmung. Die Filmkühlbohrungsquerschnitt läuft weiter bevorzugt im Bereich der Kühlmittelaustrittsöffnung kontinuierlich in einen flachen Querschnitt über, der die Ausbildung eines breiten Kühlmittelfilms auf der Strömungsleitfläche in vorteilhafter Weise begünstigt.

[0025] Besonders vorteilhaft ist die vorgenannte Ausbildung einer Kühlmittelströmung mit vorgenannten homogenen Strömungsprofil in der Filmkühlbohrung dann, wenn die festgelegte Strömungsrichtung des Heißgasstroms und die festgelegte Kühlmittelströmungsrichtung im Kühlmittelverteilerkanal windschief zueinander ausgerichtet sind.

[0026] Die Lösung umfasst auch eine strömungsführende Komponente einer Verbrennungskraftmaschine mit mindestens einer Strömungsleitfläche. Solche Komponenten umfassen weiter bevorzugt von Heißgasen angeströmte oder sonstige thermisch beaufschlagte Oberflächen, deren Temperaturen mit vorgenannten Filmkühlmitteln begrenzt oder reduziert werden. Die genannten strömungsführenden Komponenten sind vorzugsweise Turbinenschaufeln, insbesondere Leit- und/oder Laufschaufeln einer Gasturbine.

[0027] Die Erfindung wird anhand von weiteren Ausführungsbeispielen, den folgenden Figuren und Beschreibungen näher erläutert. Alle dargestellten Merkmale und deren Kombinationen sind nicht nur auf diese Ausführungsbeispiele und deren Ausgestaltungen begrenzt. Vielmehr sollen diese stellvertretend für weitere mögliche, aber nicht explizit als Ausführungsbeispiele dargestellte weitere Ausgestaltungen kombinierbar angesehen werden. Es zeigen

Fig. 1 einen prinzipiellen Querschnittsausschnitt unterhalb einer Strömungsleitfläche mit Filmkühlbohrung und Kühlmittelverteilerkanal und sich ausbildendem Kühlmittelfilm gemäß des Stands der Technik (Ansicht in Richtung der Kühlmittelströmung),

Fig. 2a und **Fig. 2b** weitere prinzipielle Querschnittsansichten des Bereichs einer Kühlmittelbohrung gemäß des Stands der Technik (a) und mit dem vorgeschlagenen rillenförmigen Einlauf (b), mit schematischer Angabe der jeweiligen Strömungsprofile in der Filmkühlbohrung im Übergang zum Diffusorbereich und an der Kühlmittelaustrittsöffnung (Ansicht jeweils in Richtung des Heißgasstroms),

Fig. 3a bis **Fig. 3c** prinzipielle Detailansichten eines rillenförmigen Einlaufs an der Wandung des Kühlmittelverteilerkanals in die Filmkühlbohrung hinein sowie

Fig. 4a und **Fig. 4b** je eine Verteilung der adiabaten Filmkühlungseffektivität auf einer Strömungsleitfläche für eine Ausblaserate $M = 2,0$; Vergleich einer Referenzausgestaltung gemäß eines in **Fig. 1** dargestellten Stands der Technik (a) und einer Ausgestaltung mit rillenförmigen Einlauf (b).

[0028] Den Stand der Technik für eine Komponente **1**, Strömungsleitfläche **2** sowie Filmkühlungsmitteln **3** zur Erzeugung eines Kühlmittelfilms **4** repräsentiert **Fig. 1**. Die Filmkühlungsmittel **3** umfassen einen Kühlmittelverteilerkanal **5**, mit einem Eintritt **6** in eine Filmkühlbohrung **7** und die Kühlmittelaustrittsöffnung **8**. Der Kühlmittelverteilerkanal und damit die dort durchgeleitete Kühlmittelströmung **12** kreuzt die Schnittebene. Die Filmkühlbohrung **7** liegt in der Schnittebene und weist einen ersten Bereich mit gleichbleibendem Querschnitt **9** und einem Diffusorbereich **10** zur Kühlmittelaustrittsöffnung **8** hin gerichtet auf. Die Strömungsleitfläche wird von einem Heißgasstrom **11** überströmt und erwärmt, wobei der Bereich der Strömungsleitfläche, der durch den Kühlmittelfilm überdeckt ist, von einer direkten Einwirkung des Heißgasstroms abgeschirmt ist.

[0029] Die Kühlmittelströmung **12**, vorzugsweise aus einem Kühlgas oder Kühlluft, strömt vorzugsweise kontinuierlich von dem Kühlmittelverteilerkanal **5** über den Eintritt **6** durch die Filmkühlbohrung **7** zur Kühlmittelaustrittsöffnung **8** und bildet von da an den Kühlmittelfilm **4**, der von der sowohl vom Heißgasstrom **11** als auch von dem nachfolgenden Kühlmittelströmung von der Kühlmittelaustrittsöffnung weiterbewegt wird.

[0030] **Fig. 2a** und **Fig. 2b** zeigen weitere prinzipielle Querschnittsansichten des Bereichs einer Kühlmittelbohrung **7** mit schematischer Wiedergabe der jeweiligen Strömungsprofile **20**, **21** in der Filmkühlbohrung im Übergang zum Diffusorbereich **10** bzw. an der Kühlmittelaustrittsöffnung **8**. Die Ansichten erfolgen jeweils in Richtung des Heißgasstroms **11**, die Schnittebenen sind zum Heißgasstrom angeordnet und verlaufen durch die jeweilige Filmkühlbohrung über deren gesamten Erstreckung zwischen Eintritt **6** und Kühlmittelaustrittsöffnung **8**, d.h. mit einer der Filmkühlbohrung folgenden Neigung.

[0031] **Fig. 2a** zeigt eine Ausgestaltung im Bereich des Eintritts **6** gemäß des Stands der Technik. Der Eintritt der Kühlmittelbohrung weist eine umlaufende Kante **13** ohne Verrundung auf. Dadurch kommt es bei einer Umlenkung **14** eines Teils der Kühlmittelströmung **12** in die Kühlmittelbohrung **7** zu einer Strömungsablösung an der Kante. Dies erzeugt einen Impuls in der Strömung in der Kühlmittelbohrung. Aufgrund der Anordnung von Kühlmittelbohrung zum Kühlmittelverteilerkanal entsteht bei der Umlenkung der Kühlmittelströmung in die Kühlmittelbohrung in der Regel zusätzlich eine überlagerte Drallströmung, die am Diffusoreintritt und auch noch an der Kühlmittelaustrittsöffnung ein ungleichförmiges Geschwindigkeitsprofil der teilweise noch drallbehafteten Kühlmittelströmung bewirkt. In der Folge löst die Strömung im Diffusor ab und die Kühlluftverteilung erfolgt nicht über die gesamte Breite der Kühlmittelaustrittsöffnung gleichmäßig (vgl. auch **Fig. 4a**). Die jeweiligen Strömungsprofile **20**, **21** in der Filmkühlbohrung im Übergang zum Diffusorbereich **10** bzw. an der Kühlmittelaustrittsöffnung **8** und damit auch des sich auf der Strömungsleitfläche bildende Kühlmittelfilm bilden sich wie dargestellt unsymmetrisch aus.

[0032] **Fig. 2b** zeigt eine modifizierte Ausgestaltung im Bereich des Eintritts **6** wie vorgeschlagen mit einem rillenförmigen Einlauf **18** sowie einer optionalen Verrundung **15** der umlaufenden Kante **13** abseits des rillenförmigen Einlaufs. Der rillenförmige Einlauf ist entgegen der Kühlmittelströmungsrichtung orientiert.

[0033] Meist erfolgt eine Umlenkung von Kühlmittel in die Fluidkühlbohrung **7** nur zum überwiegenden Teil über den rillenförmigen Einlauf **18**, während der verbleibende Anteil des umgelenkten Kühlmittels über die Eintrittskanten **13** am Eintritt in die Fluidkühlbohrung geleitet wird. Insbesondere reduziert der rillenförmige Einlauf den Impuls der Strömung am Bohrungseintritt, wodurch der Drall in der Kühlmittelbohrung reduziert oder unterbunden wird. Zur Vermeidung von Strömungsabrissen und Verwirbelung sowie zur Verbesserung der Einströmung wird eine Verrundung dieser Eintrittskanten abseits des rillenförmigen Einlaufs vorgeschlagen. Damit soll eine homogenere Kühlmittelströmung in der Kühlmittelbohrung und eine Reduzierung der Verluste erreicht werden. Beide Effekte zusammen resultieren in einer homogenen Strömung am Eintritt des Dif-

fusors. In der Folge wird die Kühlluft im Diffusor besser verteilt und es entsteht ein breiterer Kühlluftfilm auf der Oberfläche. Ziel ist die Veränderung des Strömungsbildes innerhalb der Kühlmittelbohrung, die sich wie dargestellt in einer symmetrischen Ausbildung der jeweiligen Strömungsprofile **20**, **21** in der Filmkühlbohrung im Übergang zum Diffusorbereich **10** bzw. an der Kühlmittelaustrittsöffnung **8** widerspiegelt. Der verwendete rillenförmige Einlauf wird folglich nicht genutzt, um die Verluste zu minimieren, sondern, um eine verbesserte Kühlluftverteilung auf der Oberfläche bei gleicher genutzter Kühlluftmenge zu erhalten. Damit weicht der verwendete rillenförmige Einlauf von der bestimmungsmäßigen Nutzung einer NACA Öffnung ab.

[0034] Fig. 3a bis Fig. c zeigen aus verschiedenen Perspektiven eine Ausgestaltung der vorgeschlagenen Modifikationen gemäß Fig. 2 am Eintritt **6** vom Kühlmittelverteilerkanal **5** in eine Filmkühlbohrung **7**. Im Kühlmittelverteilerkanal liegt eine Kühlmittelströmung **12** vor, die im einem Winkel zwischen 60 und 120°, vorzugsweise wie in der Draufsicht Fig. 3a dargestellt rechten Winkel zur in den Figuren nur schematisch angedeuteten Filmkühlbohrung **7** bzw. des Heißgasstroms **11** über der Strömungsleitfläche **2** ausgerichtet ist und in diese zumindest teilweise umgelenkt wird. In diese Anströmungsrichtung ist ein rillenförmiger Einlauf **18** mit Kante sowie eine verrundete Kante (Verrundung **19**) abseits des Einlaufs vorgesehen, die kontinuierlich an der Wandung des Kühlmittelverteilerkanals eingearbeitet den Eintritt überbrückend in die Filmkühlbohrung übergeht (vgl. Schnitte **A-A** und **B-B** in Fig. 3c bzw. Fig. 3b).

[0035] Insbesondere zeigen Fig. 3a bis Fig. c eine übliche Ausgestaltung, bei der die Kühlmittelströmung **12** im Kühlmittelverteilerkanal **5** orthogonal zu der Ausrichtung der Filmkühlbohrung **7** orientiert ist, jene aber nicht orthogonal zu der Wandung des Kühlmittelverteilerkanals **5** ausmündet. In derart gelagerten Fällen wird vorgeschlagen, den rillenförmigen Einlauf wie dargestellt versetzt zu der Filmkühlbohrung anzuordnen, sodass dieser exzentrisch in die Filmkühlbohrung übergeht, wobei der rillenförmige Einlauf nicht zwingend einen rechteckigen, quadratischen oder rautenförmigen Querschnitt aufweist, sondern der Querschnitt optional auch keilförmig ausgestaltbar ist.

[0036] Ein Vorteil der vorliegenden Lösung der Aufgabe liegt in einer symmetrischeren Ausblasung von Kühlmittel aus den Kühlmittelaustrittsöffnungen mit höherer Kühlwirkung insbesondere beim Einsatz einer Diffusorbohrung mit einer Orientierung der Kühlluftverteilerkanalströmung orthogonal zur Bohrungsachse. Des Weiteren werden durch die Ausgestaltung der vorgenannten Verrundung oder des rillenförmigen Einlaufs auch die aerodynamischen Verluste am Eintritt in die Kühlmittelbohrung reduziert. Die Vorteile sind auf die Kombination von reduziertem Drall im zylindrischen Teil der Bohrung und reduziertem Ablöseverhalten am Bohrungseintritt zurückzuführen, die insbesondere aus der Kombination des rillenförmigen Einlaufes mit der Verrundung der umlaufenden Kante entstehen. Folglich ist das Kühlmittel effizienter nutzbar, was wiederum eine Steigerung des thermischen Wirkungsgrads der zugrunde liegenden Strömungsmaschine bewirkt.

Experimentelle Ergebnisse:

[0037] Experimentelle Untersuchungen wurden an einem generischen Versuchstand durchgeführt. Der Aufbau des Versuchstands ist in [2] beschrieben. Bei der Versuchsanordnung wurde ein großer Wert auf die Übertragbarkeit der Ergebnisse gelegt. Eine ausführliche Ähnlichkeitsanalyse für den vorliegenden Versuchstand wurde von [2] durchgeführt und veröffentlicht. Aufbauend auf dieser Ähnlichkeitsanalyse wurden die Parameter Dichteverhältnis ($DR = pK/ph$) zwischen Heißgas und Kühlluft, Reynoldszahl im Heißgas- und Kühlluftkanal ($Re = u \cdot D/v$), Verdrängungsdicke der Grenzschicht und der Turbulenzgrad im Heißgaskanal eingehalten. Da die Reynoldszahl im Kühlluftkanal in unterschiedlichen Anwendungen stark variiert, wurden für die Untersuchungen eine moderate und eine hohe Kühlluftkanalreynoldszahl gewählt. Die gewählten Testparameter sind in Tab. 1 zusammengefasst. Die geometrischen Verhältnisse der Filmkühlungsmittel wurden ebenfalls eingehalten. Der Einfluss von Parametern wie der Schaufelkrümmung etc. wirkt sich bei unterschiedlichen Bohrungen ähnlich aus, so dass dieser in den Untersuchungen vernachlässigt wurde.

[0038] Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Maschinenbedingungen ist somit gewährleistet. Als Kühlmittel wurde Luft eingesetzt.

Tab. 1: Testparameter

Parameter	Variable	Wert
Totaltemperatur Heißgas	$T_{t,h}$	510 K
Totaltemperatur Kühlluft	$T_{t,k}$	300 K
Dichteverhältnis	DR	1,7

Parameter	Variable	Wert
Reynoldszahl Heißgas	$Re_{D,h}$	13000
Reynoldszahl Kühlluftkanal	$Re_{D,KK}$	5000; 30000
Turbulenzgrad	Tu_h	8,2 %
Turbulentes Längenmaß	l_s	0,73 D
Abstand zwischen den Bohrungen	s	8 D
Verdrängungsdicke	δ_1	0,05 D
Bohrungsdurchmesser	D	10 mm

[0039] Um hochaufgelöste Messungen durchzuführen, wurde die Bohrung auf einen Durchmesser von 10 mm hochskaliert. Für die Messungen wurde das etablierte Superpositionsprinzip der Filmkühlung (vgl. [3]) genutzt. Die Messung der Oberflächentemperatur erfolgte mit einer in-situ kalibrierten Infrarotkamera. Das verwendete Kalibrierprinzip ermöglicht hochgenaue Temperaturmessungen mit Abweichungen von maximal 1 K. Der verwendete Datenauswerteprozess ist detailliert in [2] beschrieben.

[0040] Für Vergleichsmessungen liegen hochaufgelöste Daten für eine Referenzgeometrie mit scharfkantiger Eintrittsgeometrie und für die Geometrie mit den vorgenannten Modifikationen, insbesondere Verrundungen und/oder rillenförmigen Einläufe am Eintritt in die Kühlmittelbohrungen vor. Zur Bewertung der Bohrungen wird die adiabate Filmkühleffektivität verwendet. Diese ist definiert als

$$\eta = (T_{rec,h} - T_{aw}) / (T_{rec,h} - T_{t,k}) \quad (1),$$

mit der recovery Temperatur des Heißgases $T_{rec,h}$, der adiabaten Wandtemperatur an der gekühlten Oberfläche T_{aw} und der Totaltemperatur der verwendeten Kühlluft $T_{t,k}$. Die recovery Temperatur ist definiert als

$$T_{rec,h} = T_h + \sqrt[3]{Pr} \frac{u_h^2}{2 c_p} \quad (2)$$

mit der statischen Temperatur des Heißgases T_h , der Prandtl Zahl Pr , der Geschwindigkeit des Heißgases u_h und der isobaren Wärmekapazität c_p . Sie beschreibt die Temperatur an der Wand, die sich im adiabaten Fall ohne Filmkühlung einstellt. Als Referenzgeometrie wird eine Bohrung mit der gleichen Diffusorgeometrie und einem scharfkantigen, zylindrischen Einlass verwendet. Die Ergebnisse für die Referenzgeometrie wurden von [4] veröffentlicht. Für die Untersuchungen wird neben der Kühlluftkanalreynoldszahl auch die Ausblaserate variiert. Die Ausblaserate ist definiert als

$$M = \frac{\rho_K u_K}{\rho_h u_h} \quad (3)$$

mit den Dichten ρ von Heißgas (ρ_h) und Kühlluft (ρ_K) und den Geschwindigkeiten u von Heißgas (u_h) und Kühlluft (u_K). Die Werte für die Kühlluft sind für die Position am Austritt der Bohrung definiert. Die Ausblaserate M nimmt im Anwendungsfall ungefähr Werte zwischen 1,0 und 3,0 an und wird daher auch im Versuch in diesem Wertebereich variiert.

[0041] Die adiabate Filmkühleffektivität gemäß Formel (1) dient als Maß für die Effizienz einer Temperaturabsenkung beim Passieren des Eintritts im Falle einer Referenzgeometrie mit scharfkantigem Eintritt in die Kühlmittelbohrung (vgl. **Fig. 4a**) und einer wie zuvor beschriebenen modifizierten Geometrie mit Verrundung und rillenförmigem Einlauf am Eintritt in die Kühlmittelbohrung (vgl. **Fig. 4b**). Die in **Fig. 4a** und **Fig. 4b** gezeigten Ergebnisse sind beispielhaft für eine mittlere Ausblaserate von $M = 2,0$ dargestellt.

[0042] Um die Kühlfilmverteilung auf der Oberfläche darzustellen, ist in **Fig. 4a** und **Fig. 4b** die adiabate Wandtemperatur als Höhenlinie auf der Messoberfläche für die Kühlluftkanalreynoldszahl $Re_{D,KK} = 5000$ dargestellt. Die Achsen sind jeweils auf den Bohrungsdurchmesser D bezogen. Der Ursprung des Koordinatensystems entspricht dem Schnittpunkt der Bohrungsachse mit der Oberfläche. y entspricht der lateralen Koordinate und x der Lauflänge. Die Ergebnisse verdeutlichen die Verzerrung des Filmkühlstrahles bei einem scharfkantigen

Eintritt in die Kühlmittelbohrung (**Fig. 4a**). Das Maximum ist in positive y-Richtung, d.h. in **Fig. 4a** nach oben verschoben. Dies ist auf eine einseitige Strömungsablösung im Diffusor der Bohrung zurückzuführen, diese tritt im Bereich $y/D < 0$ auf. Daher wird in diesem Gebiet weniger Kühlluft ausgeblasen.

[0043] Deutlich ist in **Fig. 4b** für die modifizierte Ausgestaltung mit rillenförmigen Einlauf eine ausgeprägte Symmetrie um die Achse um $y/D = 0$ zu erkennen, die bei der herkömmlichen Ausgestaltung des Eintritt wie oben in **Fig. 4a** dargestellt nicht zu erkennen ist. Dies bedeutet, dass eine deutliche Verbesserung hinsichtlich der Asymmetrie des Strahls und der Filmkühlwirkung erreicht wird. Die Randbedingungen im Experiment sind unverändert zu dem in **Fig. 4a** dargestellten Fall. Das Maximum der Filmkühleffektivität liegt auf der Mittellinie $y/D=0$, es tritt keine asymmetrische Strahlverteilung und folglich auch keine asymmetrische Strömungsablösung im Diffusor auf. Diese deutlich verbesserte Verteilung auf der Oberfläche ist auf die modifizierte Eintrittsgeometrie zurückzuführen. Diese bewirkt eine homogenere Strömung im zylindrischen Teil der Bohrung und in der Konsequenz auch eine bessere Durchströmung des Diffusors. Dadurch kann eine größere Fläche mit der gleichen Menge an Kühlluft gekühlt werden, die Kühlluft wird folglich effizienter eingesetzt.

[0044] In Tab. 2 sind die flächig gemittelten Werte für die Ausblaserate $M = 2,0$ bei geringer und hoher Kühlluftkanalreynoldszahl im Kühlmittelverteilerkanal angegeben. Für die geringe Kühlluftkanalreynoldszahl im Kühlmittelverteilerkanal ist eine Verbesserung von 7 % und für die hohe Kühlluftkanalreynoldszahl eine Verbesserung von 27 % ermittelt worden. Dies entspricht ungefähr der Menge an Kühlluft, die durch die vorgeschlagenen Modifikationen insbesondere im Eintritt in die Kühlmittelbohrungen einsparbar sind. Auch für andere, hier nicht diskutierte Ausblaseraten ergibt sich durch die genannten Modifikationen eine verbesserte Filmkühlwirkung. Zudem zeigen die Messungen, dass die aerodynamischen Verluste abnehmen.

Tab. 2: Flächig gemittelte, adiabate Filmkühleffektivität η zwischen $5 \leq D \leq 50$ für eine Ausblaserate $M = 2,0$ bei geringer und hoher Kühlluftkanalreynoldszahl im Kühlmittelverteilerkanal

	Referenzgeometrie	Modifizierte Geometrie	Verbesserung
$Re_{D,KK}=5000$	0,166	0,178	7 %
$Re_{D,KK}=30000$	0,121	0,154	27 %

Literatur:

- [1] C. W. Frick, F. D. Wallace, L. M. Randall und E. A. Mossman: An Experimental Investigation of NACA Submerged-Duct Entrances, National Advisory Committee for Aeronautics; Hrsg., 1945
- [2] M. Fraas, T. Glasenapp, A. Schulz und H.-J. Bauer, „Introducing a New Test Rig for Film Cooling Measurements with Realistic Hole Inflow Conditions,“ in Proceedings of ASME Turbo Expo 2017, 2017
- [3] H. Choe, W. M. Kays und R. J. Moffat, „The Superposition Approach to Film-Cooling,“ in Proceedings of ASME Winter Annual Meeting 1974, 1974
- [4] M. Fraas, T. Glasenapp, A. Schulz und H.-J. Bauer, „Film Cooling Measurements for a Laidback Fan-Shaped Hole - Effect of Coolant Crossflow on Cooling Effectiveness and Heat Transfer,“ in Proceedings of ASME Turbo Expo 2018, 2018.

Bezugszeichenliste

- 1 Komponente
- 2 Strömungsleitfläche
- 3 Filmkühlungsmittel
- 4 Kühlmittelfilm
- 5 Kühlmittelverteilerkanal
- 6 Eintritt
- 7 Filmkühlbohrung
- 8 Kühlmittelaustrittsöffnung
- 9 Querschnitt

- 10 Diffusorbereich
- 11 Heißgasstrom
- 12 Kühlmittelströmung
- 13 Umlaufende Kante
- 14 Umlenkung
- 15 Verrundung
- 18 rillenförmiger Einlauf
- 19 Verrundung
- 20 Strömungsprofil in der Filmkühlbohrung
- 21 Strömungsprofil an der Kühlmittelaustrittsöffnung

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- EP 0945593 B1 [0005, 0013]

Patentansprüche

1. Strömungsleitfläche (2), die einem in einer festgelegten Strömungsrichtung tangential geführten Heißgasstrom (11) aussetzbar ist, einer stromführenden Komponente (1) mit Filmkühlungsmitteln (3), wobei
 - a) die Filmkühlungsmittel einen Kühlmittelverteilerkanal (5), mindestens eine über einen Eintritt (6) aus diesen ausmündenden Filmkühlbohrung (7) zur Strömungsleitfläche (2) sowie aus der Strömungsleitfläche ausmündende Kühlmittelaustrittsöffnung (8) umfassen,
 - b) die mindestens eine Filmkühlbohrung im spitzen Winkel zur Strömungsrichtung des Heißgasstroms (11) ausgerichtet ist sowie
 - c) im Kühlmittelverteilerkanal (5) eine festgelegte Kühlmittelströmungsrichtung vorgesehen ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass
 - d) der Eintritt (6) einen entgegen der Kühlmittelströmungsrichtung orientierten rillenförmigen Einlauf (18) umfasst, der als Vertiefung in der Wandung des Kühlmittelverteilerkanals ausgestaltet ist und in die Filmkühlbohrung übergeht,
 - e) der rillenförmige Einlauf (18) einen Querschnitt aufweist, der zur Filmkühlbohrung hin stetig zunimmt sowie
 - f) der Einlauf (18) und der Eintritt (6) mit der Wandung des Kühlmittelverteilerkanals eine umlaufende Kante bildet.
2. Strömungsleitfläche nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die umlaufende Kante abseits des rillenförmigen Einlaufs verrundet ist.
3. Strömungsleitfläche nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass der rillenförmige Einlauf (18) versetzt zu der Filmkühlbohrung (6) angeordnet ist und exzentrisch in diese übergeht.
4. Strömungsleitfläche nach einem der vorgenannten Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die festgelegte Strömungsrichtung des Heißgasstroms (11) und die festgelegte Kühlmittelströmungsrichtung im Kühlmittelverteilerkanal (5) windschief zueinander ausgerichtet sind.
5. Strömungsleitfläche nach einem der vorgenannten Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass sich die Filmkühlbohrung (7) zur Kühlmittelaustrittsöffnung (8) hin erweitert.
6. Strömungsleitfläche nach einem der vorgenannten Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass sich die Filmkühlbohrung (7) einen runden Strömungsquerschnitt aufweist.
7. Strömungsführende Komponente einer Verbrennungskraftmaschine mit mindestens einer Strömungsleitfläche nach einem der vorgenannten Ansprüche 1 bis 6.
8. Gasturbinenschaufel mit mindestens einer Strömungsleitfläche nach einem der vorgenannten Ansprüche 1 bis 6.

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1

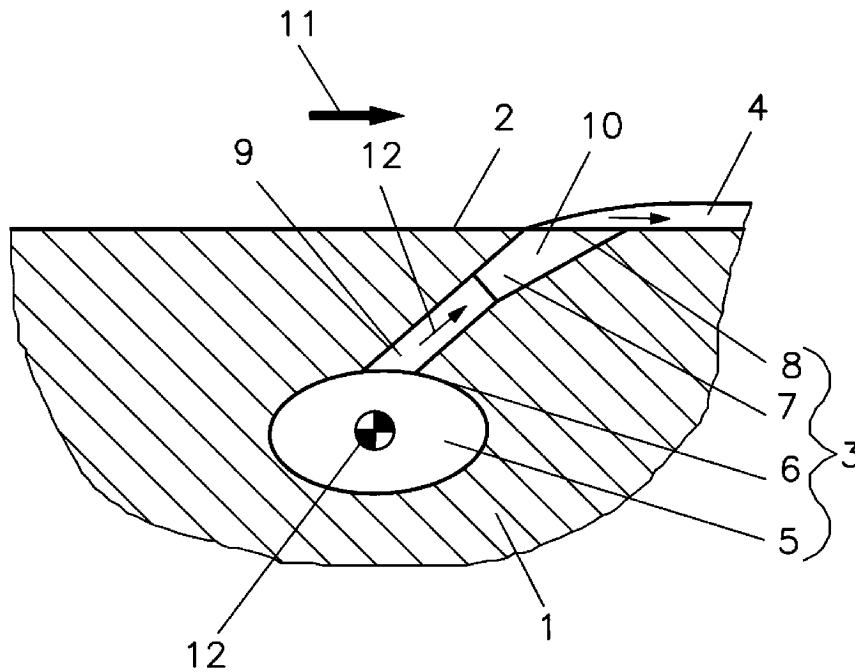


Fig. 2a

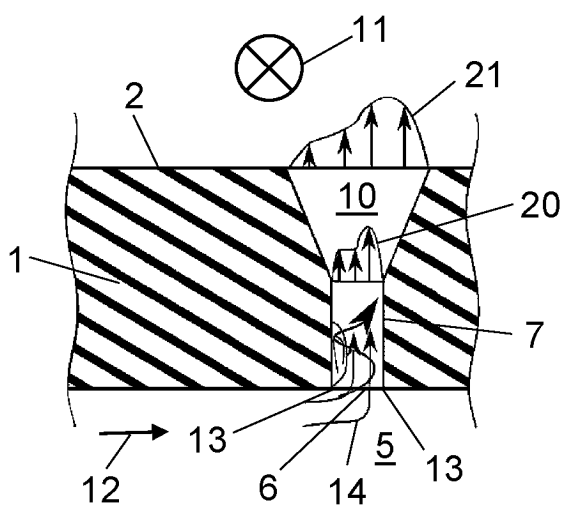


Fig. 2b

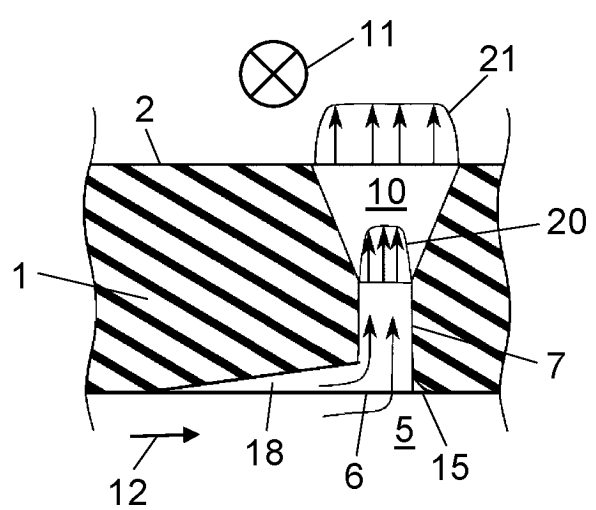


Fig. 3a

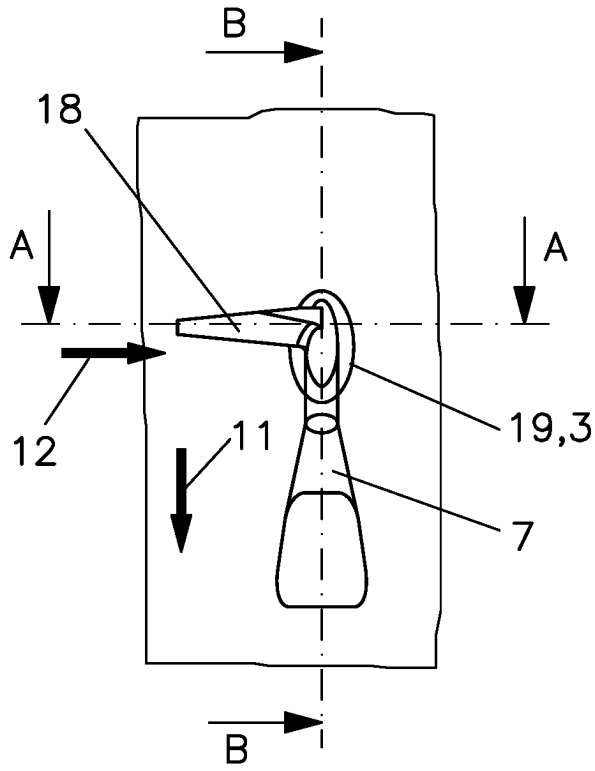


Fig. 3b

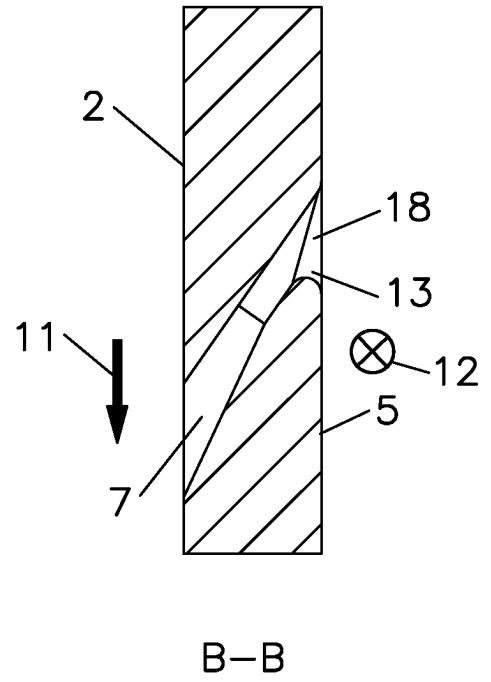


Fig. 3c

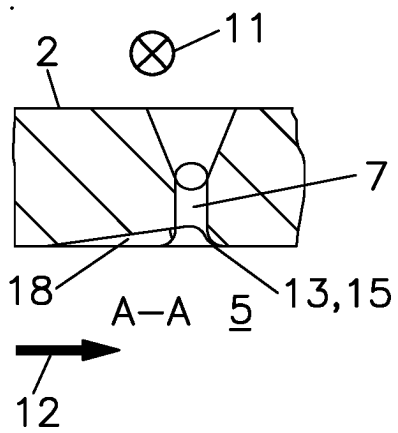


Fig. 4a

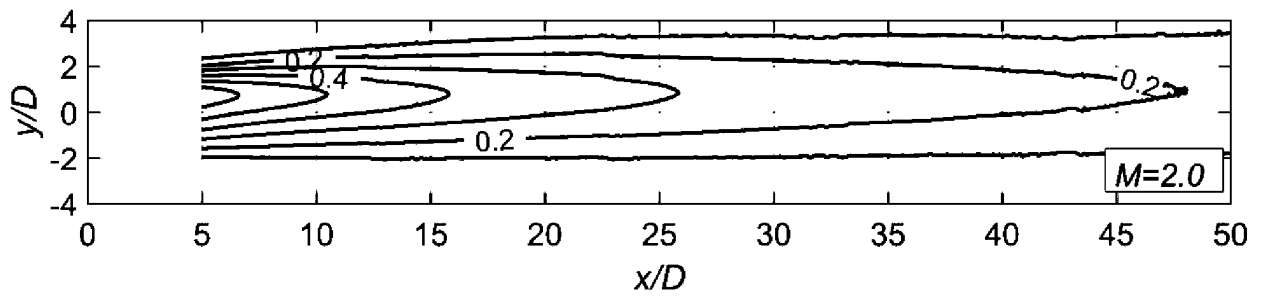


Fig. 4b

