

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
15. September 2005 (15.09.2005)

PCT

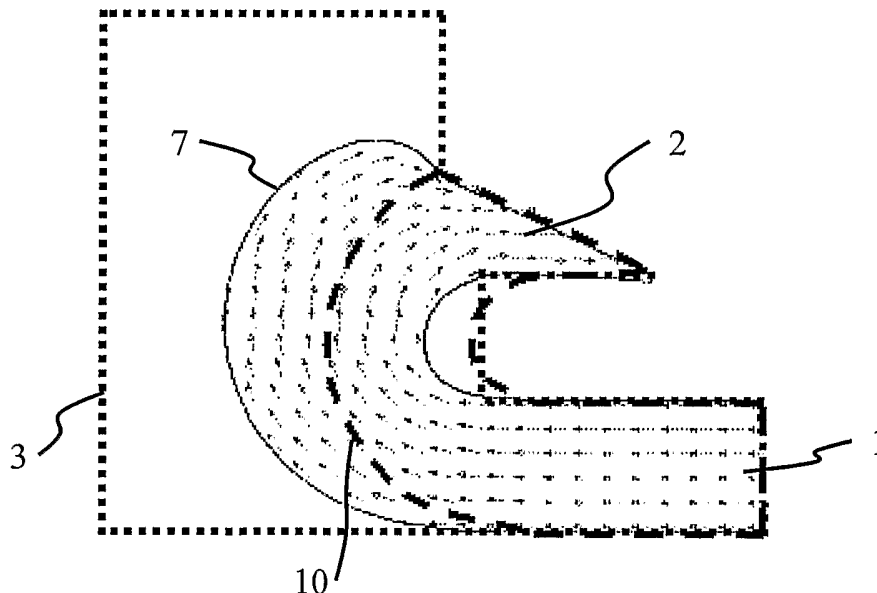
(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2005/086040 A2

- (51) Internationale Patentklassifikation⁷: **G06F 17/60**
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2005/002064
- (22) Internationales Anmeldedatum:
26. Februar 2005 (26.02.2005)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:
10 2004 011 350.5 5. März 2004 (05.03.2004) DE
- (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **DAIMLERCHRYSLER AG** [DE/DE]; Epplestrasse 225, 70567 Stuttgart (DE).
- (72) Erfinder; und
(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **KLIMETZEK, Franz** [DE/DE]; Machtofweg 56, 70567 Stuttgart (DE). **MAUE, Jürgen** [DE/DE]; Baintstrasse 28, 73235 Weilheim (DE). **MOOS, Oliver** [DE/DE]; Zellerstrasse 52, 70180 Stuttgart (DE). **ROSSMANN, Rainer** [DE/DE]; Flandernstrasse 79/2, 73732 Esslingen (DE). **RÖSSNER, Wolfgang** [DE/DE]; Hindenburgstrasse 14, 91578 Leutershausen (DE).
- (74) Anwälte: **BRÜCKNER, Ingo** usw.; DaimlerChrysler AG, Intellectual Property Management, IPM-C106, 70546 Stuttgart (DE).
- (81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR OPTIMISATION OF THE GEOMETRY OF FLOW CHANNELS

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR OPTIMIERUNG DER GEOMETRIE VON STRÖMUNGSKANÄLEN



(57) Abstract: The invention relates to a numerical simulation method for the automatic determination of a geometry optimised for flow losses, whereby the flow for the chamber is calculated iteratively from a flow mechanical equation system and virtual force inputs related to the chamber and, after each iteration, forward and reverse flows are calculated, a modification of the force inputs is carried out in which reverse flows are subjected to counter-forces and possible force inputs in forward flows are reduced. The next iteration is calculated using the modified force inputs if a criterion for interruption is not reached and, from the last iteration, a contiguous region between inlet and outlet with no force inputs is extracted as optimum geometry.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2005/086040 A2



KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

(84) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL,

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

(57) **Zusammenfassung:** Die Erfindung betrifft ein numerisches Simulationsverfahren zur automatischen Bestimmung einer hinsichtlich Strömungsverlusten optimierten Geometrie eines Strömungskanals, wobei die Strömung für den Bauraum iterativ aus einem strömungsmechanischen Gleichungssystem und virtuellen, auf den Bauraum bezogenen Kräfteinträgen errechnet wird, und nach jeder Iteration Vor- und Rückströmungen ermittelt werden, eine Modifikation der Kräfteinträge erfolgt, indem Rückströmungen mit Gegenkräften beaufschlagt werden und in Vorströmungen etwaig vorhandene Kräfteinträge reduziert werden, wonach die nächste Iteration unter Berücksichtigung der modifizierten Kräfteinträge berechnet wird, wenn nicht ein Abbruchkriterium erreicht ist, und aus der zuletzt berechneten Iteration ein zusammenhängender Bereich zwischen Ein- und Auslässen, keine Kräfteinträge aufweist, als optimierte Geometrie extrahiert wird.

Verfahren zur Optimierung der Geometrie von Strömungskanälen

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Optimierung der Geometrie von Strömungskanälen durch Simulationsrechnung.

Die Geometrie von Strömungskanälen, seien es luftführende Kanäle für die Klimatisierung von Räumen oder Kanäle, in denen Fluide von einem Einlass zu einem Auslass strömen, ist entscheidend durch einen stets nur begrenzt zur Verfügung stehenden Bauraum zur Verlegung der Kanäle bestimmt. Dies gilt in besonderem Maße für Klima- und Lüftungsanlagen in Transportmitteln, in anderem Maßstab aber auch für Klimaanlagen in Gebäuden. Um eine möglichst effiziente Strömungsführung sicherzustellen, muss der Konstrukteur beim Entwurf eines Strömungskanals eine möglichst verlustarme Geometrie in den Grenzen des vorgegebenen Bauraums finden.

Stand der Technik hierzu ist es, dass ein erfahrener Konstrukteur einen Strömungskanal entwirft, und die Strömungsverluste dieses Strömungskanals entweder am realen Modell durch experimentelle Untersuchungen oder anhand eines simulierten Modells durch CFD-Berechnungen (CFD: Computational Fluid Dynamics) festgestellt werden. Aufgrund der Ergebnisse dieser Untersuchungen korrigiert der Konstrukteur die Geometrie des entworfenen Kanals, und die korrigierte Version wird erneut bezüglich der Strömungsverluste untersucht. Dieses

Verfahren wird solange wiederholt, bis ein zufriedenstellendes Ergebnis vorliegt.

Die Optimierung der Kanal-Geometrie hinsichtlich der Strömung kann dabei auch durch numerische Form-Optimierungsverfahren unterstützt werden. Hierzu wird eine parametrisierte Geometrie des Kanals beispielsweise mit einem intelligenten "Trial-and-Error"-Verfahren innerhalb der gesetzten Parameter systematisch variiert, und die Strömungsverluste der einzelnen Geometrie-Varianten werden durch CFD-Berechnungen aufgezeigt, so dass aus den berechneten Varianten eine beste Lösung ausgewählt werden kann.

Der Vorteil des Einsatzes eines numerischen Form-Optimierungsverfahrens gegenüber sporadischen, erfahrungsbasierten Entwürfen und deren experimenteller Bewertung besteht darin, dass aus den innerhalb der parametrisierten Grenzen darstellbaren Kanal-Geometrien immer eine optimierte Lösung ausgewählt werden kann. Von Nachteil ist die aus Gründen der Rechenzeit-Ökonomie notwendige Beschränkung der Variationsvielfalt von darstellbaren Kanal-Geometrien durch eine Parametrisierung, wodurch unter Umständen gute Lösungen von vornherein von der Betrachtung ausgeschlossen werden, sowie die - trotz Beschränkung der Variationsbreite - große Anzahl zeitaufwändiger CFD-Berechnungen.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein numerisches Verfahren ohne Parametrisierung bereitzustellen, mit dessen Hilfe automatisch eine hinsichtlich Strömungsverlusten optimierte Kanal-Geometrie innerhalb eines vorgegebenen Bauraums gefunden wird.

Die Aufgabe wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen des unabhängigen Anspruchs 1 gelöst. Weitere Ausgestaltungsformen des Verfahrens finden sich in den Unteransprüchen.

Die grundlegende Idee zur erfindungsgemäßen Lösung der Aufgabe besteht darin, unerwünschte, verlustreiche Strömungsbereiche, die bei der Durchströmung eines vorgegebenen Bauraums von den Einlässen zu den Auslässen entstehen, gezielt zu behindern oder zu verlangsamen, um dadurch erwünschte verlustarme Strömungen zu forcieren.

Die Realisierung der Erfindung wird auf dem Wege einer einzigen Simulationsrechnung erreicht, bei der in Verzahnung mit der iterativen Berechnung eines strömungsmechanischen Gleichungssystems nach jeder Iteration verlustreiche Strömungen im Bauraum identifiziert werden, und durch Aufbringen von virtuellen Gegenkräften - in Form von Kräfteinträgen in den verlustbehafteten Bereichen - versucht wird, die unerwünschte Strömung zu unterdrücken, indem die Kräfteinträge bei der nächsten Iteration des Gleichungssystems berücksichtigt werden. Bildlich gesprochen wird mit dem erfindungsgemäßen Verfahren die sich bei einer iterativen Strömungsberechnung allmählich entwickelnde Strömung ständig dahingehend beeinflusst, sich möglichst direkt - also ohne Rückströmung - von den Ein- zu den Auslässen führende Wege durch den Bauraum zu suchen.

Bei der Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens entfallen die für parametrisierte Geometrien durchzuführenden aufwändigen Parametrisierungen und die langen Rechnungen für die Überprüfung aller innerhalb der zulässigen Parameter liegenden Varianten. Das erfindungsgemäße Verfahren ist damit um Größenordnungen schneller zu berechnen, als parametrisierte Geometrien. Für die Berechnung des Verfahrens spielt

es auch keine Rolle, ob der Bauraum groß, klein, einfach oder komplex gestaltet ist. Der Hauptvorteil des Verfahrens besteht gerade darin, dass es im Gegensatz zu den parametrisierten Verfahren eine optimierte Lösung in einem frei definierbaren räumlichen Bereich mit nur einem Simulationslauf findet. Natürlich kann dem Verfahren auch ein bereits ausgelegter Kanal als Bauraum zu Grunde gelegt werden, der durch die Simulation innerhalb seiner Grenzen optimiert werden soll.

Als verlustreiche und daher unerwünschte Strömungen werden aus Sicht des erfindungsgemäßen Verfahrens Rückströmungen angesehen, wobei der genaue Grad dafür, ab wann eine Strömung gegenüber einer von den Einlässen zielstrebig zu den Auslässen führenden Vorströmung als Rückströmung anzusehen ist, variabel gestaltet werden kann. Am Ende der Strömungsberechnung sind verlustarme Strömungswege oder Strömungsbereiche dadurch erkennbar, dass in diesen Bereichen keine Krafteinträge verzeichnet sind. Durch eine Extraktion des Bereiches ohne Krafteinträge zwischen den Ein- und Auslässen ist damit automatisch eine optimierte Geometrie für den Strömungskanal vorgegeben.

Nach jeder Iteration zur Berechnung der Strömung werden also in den Bereichen des Bauraums, in denen Rückströmungen auftreten, Krafteinträge vorgenommen, und zwar solange die Strömung eine Rückströmung bleibt. Sobald sich nach einer Iteration der Strömungsberechnung die Richtung einer Rückströmung in Richtung einer Vorströmung verändert hat, werden die bisher in den Krafteinträgen dieses Strömungsbereichs aufaddierten Kräfte reduziert, und zwar solange die Strömung eine Vorströmung bleibt, oder der betreffende Krafteintrag einen bestimmten Betrag unterschreitet und zu Null gesetzt wird.

Die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe wird also durch ein numerisches Simulationsverfahren gelöst, das automatisch eine hinsichtlich Strömungsverlusten optimierte Geometrie für einen Strömungskanal, der Ein- und Auslässe aufweist und durch einen vorgegebenen Bauraum führt, findet, indem die Strömung im Bauraum iterativ aus einem strömungsmechanischen Gleichungssystem und virtuellen, auf den Bauraum bezogenen Krafteinträgen, errechnet wird,

wobei nach jeder Iteration

- Vor- und Rückströmungen ermittelt werden,
- eine Modifikation der Krafteinträge erfolgt, indem
 - Rückströmungen mit Gegenkräften beaufschlagt werden und
 - in Vorströmungen etwaig vorhandene Krafteinträge reduziert werden,
- wonach die nächste Iteration unter Berücksichtigung der modifizierten Krafteinträge berechnet wird, wenn nicht ein Abbruchkriterium für die Iterationen erreicht ist,

und aus der zuletzt berechneten Iteration ein zusammenhängender Bereich zwischen Ein- und Auslässen, der keine Krafteinträge aufweist, extrahiert wird.

Das Simulationsverfahren wird vorteilhaft gemäß der Methodik finiter Volumenverfahren durchgeführt, wobei der vorgegebene Bauraum diskretisiert wird, indem er vollständig in Volumenelemente aufgeteilt wird, welche durch Rechenpunkte repräsentiert werden. Berechnete Strömungen werden dabei als Richtung und Betrag einer Geschwindigkeit für jeden Rechenpunkt angegeben.

Finite Elemente- und/oder Volumenverfahren haben sich auf allen Gebieten der Optimierung von Bauteilen durch Simula-

tionsrechnungen bewährt und sind mittlerweile auch für die Durchführung von Strömungssimulationen gang und gäbe. Auf dem Markt ist eine Vielzahl von Programmen basierend auf finiten Volumenverfahren für die Strömungssimulation erhältlich, die komfortabel für verschiedenste strömungstechnische Aufgaben konfigurierbar sind. Beispiele hierfür sind Programme für CFD-Berechnungen wie "Star-CD" von der CD-Adapco Group oder "Fluent" von der Firma Fluent. Mittels solcher Software ist es auch möglich, über entsprechende Unterprogramme die Berechnungen des strömungsmechanischen Gleichungssystems in jedem Rechenpunkt hinsichtlich der in Anspruch 1 erwähnten fiktiven Krafteinträge zu beeinflussen.

Neben finiten Volumenverfahren gibt es für numerische Strömungssimulationen auch finite Differenzenverfahren. Diese sind besonders vorteilhaft für die Untersuchung einfacher Bauräume, aber in der Handhabung nicht so flexibel wie die finiten Volumenverfahren.

Eine Strömung im Bauraum kann auf einfache Weise als Rückströmung klassifiziert werden, wenn die Abweichung ihrer Richtung mit einer Vorzugsrichtung verglichen, und die Abweichung größer als ein definierter Winkel ist. Durch einen einfachen Vergleich der Strömungsrichtung mit einer definierten Vorzugsrichtung ist schnell ermittelbar, ob eine Strömung als Rückströmung angesehen werden soll, oder nicht. Als einfaches Prüfkriterium für die Entscheidung, ob eine Strömung Vor- oder Rückströmung ist, kann beispielsweise ein Kegelwinkel um die bevorzugte Richtung herum dienen, wobei von der Vorzugsrichtung abweichende Strömungen, die innerhalb des Kegelwinkels verlaufen, als Vorströmung klassifiziert werden und außerhalb davon verlaufende Strömungen als Rückströmung klassifiziert werden. Es ist natürlich auch vorstellbar, dass für verschiedene Richtungen im Raum

unterschiedliche Winkel für die Abprüfung des Kriteriums "rückwärtsgerichtet" angelegt werden. Normalerweise dürfte jedoch die Verwendung eines Kegelwinkels zur Bestimmung der Rückströmungen ausreichen.

Eine Vorzugsrichtung für jeden Rechenpunkt des Bauraumes kann sehr einfach dadurch festgelegt werden, dass dem jeweiligen Rechenpunkt die Richtung eines zu ihm in kürzester Entfernung liegenden Rechenpunktes einer ebenfalls in kürzester Entfernung liegenden, zuvor festgelegten Hauptstromlinie vererbt wird. Diese Art der Vererbung der Richtung von einigen festgelegten Hauptstromlinien auf die übrigen Rechenpunkte im Bauraum durch das Fällen des Lots vom Rechenpunkt auf die nächstgelegene Hauptstromlinie, ist erstens einfach zu berechnen und liefert zweitens - ausgehend von den einmal festgelegten Hauptstromlinien - eindeutige und reproduzierbare Ergebnisse. Letzteres ist für den Test und Vergleich von Verfahrensvarianten von Bedeutung.

Die Hauptstromlinien werden vorteilhaft als Linien festgelegt, die beginnend von den Einlässen zu den Auslässen führen, wobei von jedem Einlass eine Linie zu jedem Auslass geführt wird. Da die Hauptstromlinie die Grundlage zur Bestimmung der Vorzugsrichtung für die Strömung im Bauraum bilden, und die Strömung möglichst verlustfrei verlaufen soll, ist es günstig, wenn für die durch die Hauptstromlinien repräsentierte Strömung ein möglichst direkter Weg von den Einlässen zu den Auslässen gewählt wird, da mit der Lauflänge der Strömung der Widerstand gegen sie wächst. Um bei der Berechnung der Strömung durch den Bauraum die resultierenden Strömungen nicht von vornherein einzuschränken, ist es von Vorteil bei einem Vorhandensein mehrerer Ein- und Auslässe auch einen Strömungsweg, und damit eine Hauptstromlinie, von jedem Einlass zu jedem Auslass vorzusehen.

Der Verlauf der Hauptstromlinien zwischen je einem Einlass und je einem Auslass kann dabei auf verschiedene Weisen festgelegt werden. Eine einfache Möglichkeit ist es, den Verlauf der Linien über ein paar wenige - vom Anwender vorgegebene - Stützstellen im Bauraum durch ein Polynom interpolieren zu lassen. Auf diese Weise erhält man für einfache Bauräume ohne weiteren Aufwand, eine gute Näherung für die Hauptstromrichtung.

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung des Verlaufs der Hauptstromlinien besteht darin, eine gesonderte und schnell konvergierende Strömungsberechnung - z.B. mit hoher Viskosität - für den Bauraum durchzuführen, und die Stromlinien zu berechnen. Aus der Gesamtheit der zwischen den Ein- und Auslässen durchgängigen Stromlinien wird sodann das arithmetische Mittel für jedes Ein- und Auslass-Paar berechnet, und die daraus resultierenden "Mittel-Stromlinien" werden als Hauptstromlinien definiert. Alternativ zur Bildung des arithmetischen Mittels können aus der Gesamtheit der berechneten Stromlinien beispielsweise auch die jeweils kürzesten Stromlinien von den Ein- zu den Auslässen als Hauptstromlinien bestimmt werden. Die Methode, Hauptstromlinien durch eine vorgeschaltete Strömungsberechnung zu ermitteln, ist zwar aufwendiger als die zuvor erwähnte quasi-zeichnerische Bestimmung von Hauptstromlinien, liefert aber bei komplexen Bauräumen qualitativ bessere Hauptstromlinien.

Wie bereits weiter oben erwähnt, ist es die zentrale Idee des erfindungsgemäßen Verfahrens, verlustbehaftete Strömungen - genauer Rückströmungen - bei der iterativen Strömungsberechnung durch eine Beaufschlagung mit Gegenkräften zu unterdrücken, um so erwünschte, verlustärmere Strömungen zu erreichen. Die Gegenkräfte, mit denen die Rückströmungen

beaufschlagt werden, werden dabei vorteilhaft in allen als Rückströmung klassifizierten Rechenpunkten als eine der Geschwindigkeit im Rechenpunkt entgegengesetzte Kraft bestimmt.

Da eine zufriedenstellende Vorhersage der Kräfte, die aufzubringen wären, um eine unerwünschte Strömung bei der folgenden Iteration des strömungsmechanischen Gleichungssystems vollständig zu unterdrücken, aufgrund der nichtlinearen Natur des Problems nicht mit vertretbarem Aufwand durchführbar ist, ist es vorteilhaft, die aufzubringenden Kräfte iterativ anzupassen.

Die einfachste Näherung hierfür besteht darin, die aufzubringende Kraft als eine Impulsänderung zu bestimmen, die den Impuls, der sich aus dem Produkt der Geschwindigkeit im Rechenpunkt mit einer Stoff-Dichte ergibt, zu Null werden lässt. Die Stoff-Dichte ist entsprechend der beabsichtigten Verwendung des zu optimierenden Kanals - beispielsweise als Gas- oder Flüssigkeitsdichte - zu wählen. Da eine Rückströmung nach einer Iteration des strömungsmechanischen Gleichungssystems unter Berücksichtigung der Krafteinträge normalerweise nicht beseitigt ist, müssen nach jeder Iteration erneut die Veränderungen in den Strömungen bestimmt werden, um daraufhin die Strömungen weiter durch die beschriebenen Näherungsmethode beeinflussen zu können. Ist ein Rechenpunkt aus vorausgegangenen Iterationen bereits mit einem Krafteintrag beaufschlagt, so wird die ermittelte Gegenkraft zum bereits vorhandenen Krafteintrag addiert.

Die Addition des vorhandenen Krafteintrags mit der ermittelten Gegenkraft erfolgt als Vektor-Addition. D.h. die Richtung der im Krafteintrag angesammelten Gesamtkraft ist nicht notwendigerweise der Richtung der Geschwindigkeit im Rechenpunkt

entgegengesetzt. Die wirksamste Richtung wird im Verlauf der Iterationen angenähert.

Um die Konvergenz des Verfahrens zu stabilisieren, ist es sinnvoll, den Wert der in den Krafteinträgen angesammelten Kräfte nach oben hin zu beschränken. Außerdem gibt es eine Grenze für Kräfte, oberhalb derer kein Einfluss mehr auf das Ergebnis möglich ist. Ebenfalls aus Gründen der besseren Konvergenz kann es angebracht sein, den Betrag der jeweils im Rechenpunkt aufzubringenden Gegenkraft auf einen bestimmten Wert zu begrenzen. Dieser Wert kann beispielsweise 5% des maximal zulässigen Betrags für die Krafteinträge betragen.

Der Übersichtlichkeit halber folgt die Beschreibung der differenzierten Behandlung der Krafteinträge im Weiteren gemäß der Fallunterscheidung hinsichtlich des Verhaltens der Strömung vor und nach einer Iteration:

Von einer Iteration zur nächsten können

- Rückströmungen Rückströmungen bleiben,
- aus Rückströmungen Vorströmungen werden,
- Vorströmungen Vorströmungen bleiben, und
- aus Vorströmungen Rückströmungen werden.

Im ersten Fall wird für die betreffenden Rechenpunkte die aufzubringende Gegenkraft ermittelt, ggf. auf einen bestimmten Betrag gekürzt, und zu dem bereits vorhandenen Krafteintrag im Rechenpunkt addiert, wenn nicht bereits zuvor die obere Schranke für Krafteinträge erreicht wurde.

Im zweiten Fall wurde aus einer unerwünschten Strömung eine erwünschte Strömung. Um nun zu überprüfen, ob die entstandene Vorströmung auch ohne die zuvor im entsprechenden Rechenpunkt zwangsweise eingebrachten befördernden Kräfte bestehen

bleibt, müssen die im Rechenpunkt angesammelten Krafteinträge vermindert werden. Dies geschieht vorteilhaft in der Weise, dass die in Vorströmungen etwaig vorhandenen Krafteinträge reduziert werden, indem in allen als Vorströmung klassifizierten Rechenpunkten, die einen Krafteintrag aufweisen, ein Teilbetrag des Krafteintrags subtrahiert wird. Die in den vorausgegangenen Iterationen angesammelten Krafteinträge werden so schrittweise abgebaut. Dadurch ist es vorteilhaft möglich, den Grad der Nachhaltigkeit der erzwungenen Vorströmung vorsichtig zu prüfen. Anders betrachtet wird dadurch die erzwungene Vorströmung noch für weitere Iterationen durch den nach der Subtraktion im Rechenpunkt verbleibenden Krafteintrag unterstützt. Setzt man dagegen den im Rechenpunkt angesammelten Krafteintrag bei Änderung der Strömungsrichtung in einem Schritt zu Null, kehrt sich die Richtung bei der nächsten Iteration mit hoher Wahrscheinlichkeit wieder um.

Die Subtraktion von Kräften aus dem Krafteintrag erfolgt - wie auch die Addition von Kräften - vektoriell. D.h. eine Kraft wird dadurch aus dem Krafteintrag subtrahiert, indem sie entgegengesetzt zur Richtung im Rechenpunkt, - der Rechenpunkt weist jetzt aber eine Vorströmung auf -, zum bisherigen Krafteintrag addiert wird. Die Subtraktion erfolgt also nach dem gleichen Prinzip wie die Addition: Ermittlung einer der Richtung im Rechenpunkt entgegenwirkenden Kraft und Addition zum bisherigen Krafteintrag. Die Umkehrung der Rechenoperation wird also automatisch durch die Änderung der Richtung der Geschwindigkeit von einer Rückströmung zu einer Vorströmung im Rechenpunkt veranlasst.

Betrag und Richtung der bei Vorströmungen aus dem Krafteintrag abzuziehenden Kräfte werden vorteilhaft ebenfalls nach dem gleichen Prinzip wie die bei Rückströmungen zu

addierenden Kräfte ermittelt, nämlich als der Impulsänderung, die notwendig ist, um die im Rechenpunkt vorhandenen Geschwindigkeit, multipliziert mit einer Stoff-Dichte, zu Null werden zu lassen. Auf diese Weise können Vor- und Rückströmungen rechentechnisch identisch behandelt werden. Aus Konvergenzgründen ist wiederum eine Beschränkung des Betrags dieser Kraft - beispielsweise auf 5% vom Wert der oberen Schranke für die Krafteinträge - sinnvoll.

Da die Werte für die Krafteinträge bei der Vektor-Addition bzw. Subtraktion nur unter sehr unwahrscheinlichen Umständen zu Null werden, werden Krafteinträge mit Beträgen unter einem bestimmten Schwellwert zu Null gesetzt, um am Ende der Strömungsberechnung die Rechenpunkte ohne Krafteintrag ausfiltern zu können. Das Auslesen der Rechenpunkte ohne Krafteintrag kann aber auch selbst durch einen Schwellwert, unter welchem der Betrag eines Krafteintrags als "kein Krafteintrag" angesehen wird, durchgeführt werden. Ein weiteres Abprüfkriterium für geringe Krafteinträge, die als "keine Krafteinträge" oder als Null betrachtet werden können, besteht darin, bei jeder Verringerung des Krafteintrags die Richtungsänderung zu überwachen. Schlägt die Richtung des Krafteintrags nach einer Subtraktion im Wesentlichen um, ist das ein Indiz dafür, dass die bei Rückströmung im Rechenpunkt aufgesammelten Kräfte, wieder abgebaut sind. Der Krafteintrag kann dann zu Null gesetzt werden.

Im dritten Fall wird wiederum ein Teilbetrag des im Rechenpunkt vorhandenen Krafteintrags vom Krafteintrag subtrahiert, wenn der Krafteintrag nicht zuvor schon zu Null gesetzt wurde. Der Wert Null im Krafteintrag signalisiert dann, dass in diesem Rechenpunkt ohne eine Manipulation durch virtuelle Kräfte eine erwünschte Strömung vorhanden ist.

Im vierten Fall wird wieder gemäß dem ersten Fall verfahren und eine Gegenkraft zum einem etwa noch bestehenden Krafteintrag im Rechenpunkt aufaddiert.

Zur Terminierung der Iterationen des erfindungsgemäßen Simulationsverfahrens können verschieden geartete Abbruchkriterien eingesetzt werden. Eine weit verbreitete Methode, um ein iteratives Verfahren zu beenden, ist die Vorgabe einer festen Anzahl von durchzuführenden Iterationen. Die Verwendung einer fest vorgegebenen Anzahl von Iterationen als Abbruchkriterium ist vorteilhaft, wenn entweder bereits ausreichende Erfahrung mit üblichen Verlauf der Simulation vorhanden ist, oder keine Kriterien gefunden werden, die eine Konvergenz des Verfahrens anzeigen.

Ansonsten ist es inhaltlich angemessener, wenn Abbruchkriterien eingesetzt werden, die auf die Konvergenz des Verfahrens Bezug nehmen. Solche Abbruchkriterien sind dadurch charakterisiert, dass sie das Verhalten einer charakteristischen Größe des Verfahrens nach jeder Iteration daraufhin überwachen, ob die charakteristische Größe einen Schwellwert über- oder unterschreitet, oder ob die Änderung der charakteristischen Größe minimal wird.

Die charakteristische Größe kann für das erfindungsgemäße Verfahren vorteilhaft an der jeweils nach einer Iteration erfolgenden Modifikation der Krafteinträge festgemacht werden. Dadurch, dass viele Modifikationen vorgenommen werden müssen, wenn sich von Iteration zu Iteration die Strömung im Bauraum stark verändert, signalisiert ein abnehmender Modifikationsumfang, dass sich die durch das Verfahren berechneten Ergebnisse stabilisieren bzw., wenn keine nennenswerten Veränderungen der Krafteinträge mehr erfolgen, dass das Verfahren zu einem Ende gelangt ist. Dies wird

überprüft, indem der Modifikationsumfang für eine bestimmte Anzahl von Iterationen unter einem bestimmten Wert bleiben.

Der Umfang der Modifikation kann anhand verschiedener Größen gemessen werden: Eine einfache und abstrakte Messgröße ist die Anzahl der nach einer Iteration modifizierten Rechenpunkte. Wenn diese sich nicht mehr, oder nicht mehr stark verändert, kann das Verfahren als beendet betrachtet werden. Eine eher inhaltlich orientierte Messgröße für den Umfang einer Modifikation ist die Summe der Beträge aller nach einer Iteration durchgeführten Kraftänderungen.

Eine andere Möglichkeit zur Bestimmung der Konvergenz ist die Beobachtung der Änderungen in den aus den Iterationen resultierenden Geschwindigkeiten. Hierzu werden alle Geschwindigkeitsänderungen ermittelt und betragsmäßig addiert.

Sind die Iterationen zur Berechnung der Strömung im Bauraum gestoppt, wird nach dem erfindungsgemäßen Verfahren eine erste optimierte Geometrie des Strömungskanals dadurch erhalten, dass aus der zuletzt berechneten Iteration ein zusammenhängender Bereich zwischen Ein- und Auslässen, der keine Krafteinträge aufweist, extrahiert wird. Bereiche im Bauraum, die ohne Verbindung zu den Ein- und Auslässen stehen, aber auch ohne Krafteinträge sind, - somit also Inseln im Bauraum bilden, - können bei der Ermittlung der optimierten Kanal-Geometrie beispielsweise durch Verfahren der Mustererkennung zur Konturextraktion eliminiert werden.

Die Geometrie dieses Bereichs kann weiter verbessert werden, indem aus der errechneten Strömung im Bauraum Stromlinien ermittelt werden, und die Geometrie des Kanals auf die Volumenelemente beschränkt wird, die von Stromlinien, die direkt

von den Ein- zu den Auslässen führen, geschnitten werden. Mit "direkt" ist hierbei gemeint, dass die Stromlinien keine Rückströmung aufweisen dürfen. Mit der Extraktion der optimierten Kanalform anhand von Stromlinien, die von den Einlässen zu den Auslässen führen, erfolgt vorteilhaft eine automatische Beschränkung der Form auf einen zusammenhängenden Bereich zwischen Ein- und Auslässen. Etwaige separate Volumen im Bauraum, in denen keine Krafteinträge verzeichnet sind, und die ohne Verbindung zu den Ein- und Auslässen sind, werden auf diese Weise ohne Weiteres eliminiert. Durch die Verfolgung der Stromlinien, erübrigen sich damit anderweitige Verfahren zur Überprüfung des Zusammenhangs der Gebiete ohne Krafteintrag mit den Ein- und Auslässen. Durch die Begrenzung der Form auf Stromlinien werden weiterhin vorteilhaft Randbereiche, in denen nur geringe Geschwindigkeit auftreten, abgeschnitten.

Bei der soeben beschriebenen Beschränkung der Kanal-Geometrie durch vorwärtsgerichtete Stromlinien, kommt es - abhängig von der Form des Bauraums und der Lage der Ein- und Auslässe - vor, dass die an den Einlässen von homogen verteilten Startpunkten ausgehenden Stromlinien nicht ebenso homogen verteilt die Auslässe erreichen. Da die Kanal-Form durch die von Stromlinien durchschnittenen Volumenelemente definiert wird, kann bei sehr ungleichmäßig im Auslass verteilten Stromlinien-Endpunkten die Form der Auslässe verkleinert oder zerklüftet werden.

Ist die Form der Auslässe aber konstruktiv bedingt fest vorgegeben, weil z.B. Anschlussstücke angeflanscht werden müssen, kann die Geometrie der Auslässe vorteilhaft durch Berücksichtigung von rückwärtsgerichteten Stromlinien ergänzt werden. Dabei werden in Umkehrung zur Berechnung der vorwärtsgerichteten Stromlinien homogen verteilte Stromlinien-

Startpunkte in den Auslässen angenommen. Dadurch werden die zu den Auslässen gehörenden Volumenelemente zwangsweise von Stromlinien geschnitten, sodass die Auslässe bei einer Bestimmung der Kanal-Geometrie durch vorwärts- und rückwärtsgerichtete Stromlinien wieder in vollem Umfang in Erscheinung treten. Auch von den rückwärtsgerichteten Stromlinien werden nur die direkt von den Aus- zu den Einlässen führenden Stromlinien für die Formbestimmung in Betracht gezogen. Die Geometrie des optimierten Kanals ist damit aus allen Volumenelementen des Bauraums bestimmt, die von vor- und rückwärts berechneten und direkt zwischen den Ein- und Auslässen verlaufenden Stromlinien, geschnitten werden.

Die Erfindung wird nun anhand von Zeichnungen weiter erläutert.

In Fig.1 ist ein Ablaufdiagramm für eine bevorzugte Ausführungsform des Verfahrens dargestellt:

Das erfindungsgemäße Verfahren setzt auf der Geometrie eines vorgegebenen Bauraums auf. Die geometrischen Abmessungen des Bauraums und seiner Ein- und Auslässe werden für die Verarbeitung durch ein Programm für CFD-Berechnungen aufbereitet. Für die Simulationsrechnungen wird der Bauraum geeignet diskretisiert, indem er vollständig in Volumenelemente aufgeteilt wird, die jeweils durch einen Rechenpunkt repräsentiert werden. Für die Diskretisierung von räumlichen Gebilden gibt es bekanntermaßen verschiedene Möglichkeiten. Die Volumenelemente können aus regelmäßigen Formen, wie Tetraedern oder Hexaedern, oder auch aus unregelmäßigen Formen bestehen und auch untereinander gemischt sein, wobei auch die Volumen der einzelnen Elemente unterschiedlich groß sein können. Die gewählte Auflösung ist dabei vom untersuchten Problem abhängig, und für den Fachmann kein Problem.

Auch die Rechenpunkte können im Bezug auf die einzelnen Volumenelemente unterschiedlich festgelegt werden. So können sie beispielsweise auf den Schwerpunkt, oder den Mittelpunkt eines Volumenelements gelegt werden, oder auch auf eine Kante oder auf einen Eckpunkt des Volumenelements.

Ausgehend von der Bauraumgeometrie und den darin definierten Ein- und Auslässen werden mit Hilfe eines strömungsmechanischen Gleichungssystems, das eine schnelle Konvergenz gewährleistet, eine Strömung und Stromlinien für den Bauraum ermittelt. Eine schnell konvergierende Berechnung für eine Strömungssimulation wird bei der bevorzugten Ausführungsform dadurch erzwungen, dass das Vorhandensein einer sehr zähen Flüssigkeit im Bauraum angenommen wird, bzw. der konvektive Term des strömungsmechanischen Gleichungssystems bei der Berechnung außer Acht gelassen wird. Die Strömungen werden vom Simulationsprogramm als Betrag und Richtung einer Geschwindigkeit in den Rechenpunkten berechnet.

Kommen von den so ermittelten Stromlinien viele nicht von den Ein- bis zu den Auslässen, sondern enden an den Bauraumbegrenzungen, kann es angebracht sein, zusätzlich die Stromlinien von den Auslässen zu den Einlässen zu ermitteln. Aus der Gesamtheit der ermittelten Stromlinien wird für jedes Ein- und Auslasspaar das arithmetische Mittel der sie verbindenden Stromlinien berechnet und die so gewonnene "Mittel-Stromlinie" als Hauptstromlinie definiert.

Die Festlegung der Hauptstromlinien kann auch nach anderen Kriterien erfolgen. Anstatt der Mittenstromlinien können beispielsweise die jeweils kürzesten Stromlinien von jedem Einlass zu jedem Auslass gewählt werden. Die Festlegung muss auch nicht unbedingt durch eine Strömungsberechnung erfolgen. Die Hauptstromlinien können bei einfach strukturierten Bauräumen auch nach geometrischen Gesichtspunkten bestimmt

werden, indem sie mittels manuell vorgegebene Stützstellen approximiert werden.

Die Hauptstromlinien bilden die Grundlage für die anschließend erfolgende Festlegung einer Vorzugsrichtung für jeden Rechenpunkt des diskretisierten Bauraums. Die Vorzugsrichtung eines Rechenpunkts wird dabei folgendermaßen bestimmt: Vom Rechenpunkt ausgehend wird das Lot auf die nächstgelegene Hauptstromlinie berechnet. Die Richtung des Rechenpunktes der Hauptstromlinie auf den das Lot auftrifft, wird auf den zu bestimmenden Rechenpunkt übertragen. Die Vorzugsrichtung eines jeden Rechenpunkts ist somit - allein abhängig vom Verlauf der Hauptstromlinien - in eindeutiger Weise bestimmt.

Nach der Festlegung der Vorzugsrichtung beginnt das Verfahren mit der iterativen Berechnung des eigentlichen strömungsmechanischen Gleichungssystems zur Bestimmung der Strömung im Bauraum. Im Gegensatz zu dem strömungsmechanischen Gleichungssystem, welches eingangs zur Bestimmung von Hauptstromlinien berechnet wurde, werden für das eigentliche strömungsmechanische Gleichungssystem nun die dem realen Problem gemäßen Randbedingungen gesetzt. Soll der Kanal beispielsweise ein Lüftungskanal sein, so wird die Viskosität von Luft eingesetzt.

Nach jeder Iteration des strömungsmechanischen Gleichungssystems werden alle Rechenpunkte des Bauraums daraufhin geprüft, ob sie einer Rückströmung angehören oder einer Vorströmung. Dazu wird überprüft, ob die Richtung der ermittelten Geschwindigkeit innerhalb oder außerhalb eines bestimmten Kegelwinkels um die Vorzugsrichtung herum liegt. Als praktikabel haben sich Kegelwinkel zwischen 80 und 90 Grad erwiesen. Liegt die Richtung der im Rechenpunkt bestimmten Geschwindigkeit innerhalb oder auf dem Kegel-

winkel, wird der Rechenpunkt als Vorströmung klassifiziert. Liegt die Richtung außerhalb des Kegelwinkels, wird der Rechenpunkt als Rückströmung definiert.

Anschließend werden erfindungsgemäß virtuelle Krafteinträge für den Bauraum, d.h. für alle Rechenpunkte des Bauraums, berechnet oder modifiziert, um anschließend mit diesen Krafteinträgen die nächste Iteration des strömungsmechanischen Gleichungssystems zu beeinflussen .

Zu Beginn des Verfahrens sind die Krafteinträge aller Rechenpunkte gleich Null. Die Summe aller in einem Krafteintrag addierten Gegenkräfte ist dabei auf einen maximal zulässigen Wert beschränkt. Der Maximal-Wert für Krafteinträge kann beispielsweise wie folgt sinnvoll bestimmt werden:

$$\text{Maximale Kraft} = \frac{v^2}{L} \times \rho ,$$

wobei

v die charakteristische Geschwindigkeit,

$L = \sqrt[3]{MV}$, die charakteristische Länge,

MV das mittlere Volumen der Volumenelemente und

ρ die Stoff-Dichte

bedeuten.

Für alle Rechenpunkte, die als Rückströmung klassifiziert worden sind, wird eine der Strömung im Rechenpunkt genau entgegengesetzte Kraft berechnet und zu dem zum Rechenpunkt zugeordneten Krafteintrag addiert. Der Betrag der Gegenkraft wird dabei gleich dem Betrag des Impulses gesetzt, der aus dem Produkt der Geschwindigkeit im Rechenpunkt mit der Stoff-Dichte entsteht. Die Krafteinträge kann man sich als "numerischen Sand" vorstellen, durch den in der Simulation

auf virtuelle Weise versucht wird, unerwünschte Strömungen zu hindern. Das Auftreten und Verschwinden von "elektronischem Sand" im Verlauf einer Strömungsberechnung ist in den Fig. 2a, 3a, 4a und 5a dargestellt.

Für alle Rechenpunkte, die als Vorströmung klassifiziert worden sind, wird überprüft, ob der Krafteintrag größer Null ist, und wenn ja, eine Kraft, die ein Bruchteil der maximal zulässigen Kraft ist - beispielsweise 5% -, subtrahiert, bzw. entgegengesetzt zur Richtung der Geschwindigkeit im Rechenpunkt vektoriell addiert. Kehrt sich die Richtung des Krafteintrags nach der Subtraktion im Wesentlichen um, wird der Krafteintrag zu Null gesetzt.

Die Iterationen werden beendet, wenn eine feste Anzahl von Iterationen zur Strömungsberechnung durchgeführt wurde. Die Anzahl der zu durchlaufenden Iterationen ist problemabhängig festzulegen, was für den Fachmann auf strömungsmechanischem Gebiet aber kein Problem darstellt.

Eine andere Möglichkeit, das Ende der Iterationen festzulegen, besteht beispielsweise darin, nach jeder Iteration die Anzahl der modifizierten Krafteinträge zu ermitteln und diese mit der Anzahl der eine Iteration zuvor modifizierten Krafteinträge zu vergleichen. Bleibt die Anzahl der modifizierten Krafteinträge für eine Reihe von Iterationen unter einem bestimmten Wert, kann angenommen werden, dass das Verfahren zu einem Ende gekommen ist, und die Iterationen können beendet werden. Auch die Setzung dieser Werte ist jeweils problemabhängig vorzunehmen; dies ist dem Fachmann jedoch geläufig.

Aus der für den Bauraum berechneten Strömung resultiert eine erste optimierte Geometrie für den Strömungskanal, definiert

durch ein Volumen zwischen den Ein- und Auslässen in welchem die Rechenpunkte keine Krafteinträge aufweisen. Diese Geometrie wird optimiert, indem aus der für den Bauraum berechneten Strömung Stromlinien von den Ein- zu den Auslässen berechnet werden, und die Geometrie des Bauraums anhand der Volumenelemente die von diesen Stromlinien geschnitten werden, definiert wird.

Soll die Geometrie der Auslässe nicht von ihrer vordefinierten Form abweichen, ist es zweckmäßig, eine rückwärtsgerichtete Stromlinienberechnung, von den Auslässen zu den Einlässen, vorzunehmen, und die zuvor definierte Geometrie mit den Volumenelementen zu erweitern, die von den rückwärtsgerichteten, durchgängigen Stromlinien geschnitten werden.

Die optimierten Kanal-Geometrien, die zunächst in relativ kantiger Form vorliegen, da sie aus diskreten Volumenelementen zusammengesetzt sind, können für die Weiterverarbeitung durch verschiedene Verfahren geglättet werden. Eine Möglichkeit zur Generierung einer glatten Oberfläche besteht darin, die Stromlinien, welche die Form definieren, in Punktwolken umzuwandeln, und die außen liegenden Punkte zu einer Hüllfläche zu verbinden. Eine andere Möglichkeit ist es, über die außen liegenden Punkte der extrahierten Volumenelemente eine glatte Oberfläche zu interpolieren.

Die Figuren 2a und 2b bis 5a und 5b zeigen die Veränderungen in den Strömungen 5 und Krafteinträgen 4 im Verlauf einer Simulationsrechnung an einem Schnitt durch einen Bauraum 3 mit einem Einlass 1 und einem Auslass 2. Die geschwärzten Bereiche 6 sind die Bereiche ohne Krafteintrag, also Bereiche mit unmanipulierter Vorströmung. Die weißen Bereiche 4 im Bauraum 3 entsprechen Bereichen in denen Kräfte aufgebracht

werden, um Rückströmungen umzukehren; sie zeigen sozusagen die Anlagerung von "numerischem Sand" an.

Alle einmal festgelegten Bezugszeichen gelten in gleicher Weise auch für die nachfolgenden Figuren.

Fig.2a Krafteinträge 4 im Bauraum 3 am Beginn einer Simulationsrechnung

Fig.2b Strömungen 5 im Bauraum 3 am Beginn einer Simulationsrechnung

Fig.3a Krafteinträge 4 im Bauraum 3 nach einem Drittel der Simulationsrechnung

Fig.3b Strömungen 5 im Bauraum 3 nach einem Drittel der Simulationsrechnung

Fig.4a Krafteinträge 4 im Bauraum 3 nach zwei Dritteln der Simulationsrechnung

Fig.4b Strömungen 5 im Bauraum 3 nach zwei Dritteln der Simulationsrechnung

Fig.5a Krafteinträge 4 im Bauraum 3 am Ende der Simulationsrechnung

Fig.5b Strömungen 5 im Bauraum 3 am Ende der Simulationsrechnung

Fig.6a zeigt die aus dem Ergebnis der Strömungssimulation berechneten vorwärtsgerichteten Stromlinien 8. Fig.6b zeigt die aus dem Ergebnis der Strömungssimulation berechneten rückwärtsgerichteten Stromlinien 9. In beiden Figuren ist auch die verfahrensgemäß extrahierte Kanal-Geometrie 7 eingezeichnet.

Die Figuren 7 und 8 zeigen Vergleiche von Kanal-Geometrien für verschiedene Bauräume 3, einmal nach herkömmlichen Methoden entworfen und einmal nach dem erfindungsgemäßen Verfahren berechnet.

Die in Fig.7 gezeigte, mit dem erfindungsgemäßen Verfahren optimierte Kanal-Geometrie 7 weist einen um 60% geringeren Druckverlust gegenüber dem ebenfalls in Fig.7 dargestellten herkömmlich entworfenen Kanal 10 auf.

Fig. 8a zeigt einen mit herkömmlichen Methoden entworfenen Mitteldüsenkanal. Fig.8b zeigt einen mit dem erfindungsgemäßen Verfahren für den gleichen Bauraum entworfenen Mitteldüsenkanal. Dabei wird mit der in Fig.8b dargestellten optimierten Kanalgeometrie gegenüber der in Fig.8a gezeigten Geometrie eine Druckverlustreduktion von 50% erreicht.

Figur 9 zeigt eine Skizze eines 3-dimensionalen Bauraums 3 und darin die mit dem Verfahren gefundene Kanal-Geometrie 7 für einen Kanal mit einem Einlass 1 und drei Auslässen 2.

Patentansprüche

1. Verfahren zur automatischen Bestimmung einer hinsichtlich Strömungsverlusten optimierten Geometrie eines Strömungskanals, der Ein- und Auslässe aufweist und durch einen vorgegebenen Bauraum führt, wobei die Strömung für den Bauraum iterativ aus einem strömungsmechanischen Gleichungssystem und virtuellen, auf den Bauraum bezogenen Krafteinträgen errechnet wird, wobei nach jeder Iteration
 - Vor- und Rückströmungen ermittelt werden,
 - eine Modifikation der Krafteinträge erfolgt, indem
 - Rückströmungen mit Gegenkräften beaufschlagt werden und
 - in Vorströmungen etwaig vorhandene Krafteinträge reduziert werden,
 - wonach die nächste Iteration unter Berücksichtigung der modifizierten Krafteinträge berechnet wird, wenn nicht ein Abbruchkriterium für die Iterationen erreicht ist,und aus der zuletzt berechneten Iteration ein zusammenhängender Bereich zwischen Ein- und Auslässen, der keine Krafteinträge aufweist, als optimierte Geometrie extrahiert wird.
2. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der vorgegebene Bauraum diskretisiert wird, indem er vollständig in Volumenelemente aufgeteilt wird, welche durch Rechenpunkte repräsentiert werden, und Strömungen

als Richtung und Betrag einer Geschwindigkeit für jeden Rechenpunkt berechnet werden.

3. Verfahren gemäß Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet,
dass eine Strömung als Rückströmung klassifiziert wird, wenn ihre Richtung von einer Vorzugsrichtung um mehr als einen definierten Winkel abweicht.
4. Verfahren gemäß Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorzugsrichtung für jeden Rechenpunkt bestimmt wird, indem auf ihn die Richtung eines in kürzester Entfernung liegenden Rechenpunktes einer in kürzester Entfernung liegenden, festgelegten Hauptstromlinie vererbt wird.
5. Verfahren gemäß Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Hauptstromlinien als Linien festgelegt werden, die beginnend von den Einlässen zu den Auslässen verlaufen, wobei von jedem Einlass eine Hauptstromlinie zu jedem Auslass geführt wird.
6. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Hauptstromlinien anhand von frei gewählten Stützstellen im Bauraum interpoliert werden.
7. Verfahren gemäß Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Hauptstromlinien als arithmetisches Mittel einer Menge von Stromlinien ermittelt werden, die aus der mit einer gesonderten und schnell konvergierenden Strömungsberechnung bestimmten Strömung resultieren und von den Einlässen zu den Auslässen - und/oder umgekehrt - führen.

8. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 2 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Gegenkräfte, mit denen Rückströmungen beaufschlagt werden, für alle als Rückströmung klassifizierten Rechenpunkte aus einer der Geschwindigkeit im Rechenpunkt entgegengesetzten Kraft mit dem Betrag des aus einer Stoff-Dichte und der Geschwindigkeit im Rechenpunkt resultierenden Impulses bestimmt werden und zu einem etwaigen, aus vorausgegangenen Iterationen für den jeweiligen Rechenpunkt vorhandenen Krafteintrag addiert werden, bis eine obere Schranke für den Betrag des Krafteintrags erreicht ist.
9. Verfahren gemäß Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass in Vorströmungen etwaig vorhandene Krafteinträge reduziert werden, indem für alle als Vorströmung klassifizierten Rechenpunkte, die einen Krafteintrag aufweisen, eine der Geschwindigkeit im Rechenpunkt entgegengesetzte Kraft mit dem Betrag des aus einer Stoff-Dichte und der Geschwindigkeit im Rechenpunkt resultierenden Impulses bestimmt wird und vom Krafteintrag subtrahiert wird, bis eine untere Schranke für den Betrag des Krafteintrags erreicht ist, bei deren Erreichen der Betrag des Krafteintrags zu Null gesetzt wird.
10. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass als Abbruchkriterium überprüft wird, ob eine fest vorgegebene Anzahl von Iterationen durchgeführt wurde.
11. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass als Abbruchkriterium überprüft wird, ob für eine

bestimmte Anzahl von Iterationen eine Maßzahl für die jeweils nach einer Iteration erfolgende Modifikation der Krafteinträge unterschritten wird.

12. Verfahren gemäß Anspruch 11,
dadurch gekennzeichnet,
dass als Maßzahl die Anzahl der nach einer Iteration modifizierten Rechenpunkte dient.
13. Verfahren gemäß Anspruch 11,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Maßzahl die Summe aller nach einer Iteration in den Krafteinträgen veränderten Kraftbeträge ist.
14. Verfahren gemäß Anspruch 11,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Maßzahl die Summe aller nach einer Iteration veränderten Geschwindigkeitsbeträge ist.
15. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 2 bis 14,
dadurch gekennzeichnet,
dass die optimierte Geometrie weiter verbessert wird, indem aus der errechneten Strömung Stromlinien ermittelt werden, und die Geometrie durch die Volumenelemente des Bauraums begrenzt wird, die von den zwischen den Ein- und Auslässen durchgängigen Stromlinien, die keine Rückströmungen aufweisen, geschnitten werden.
16. Verfahren gemäß Anspruch 15,
dadurch gekennzeichnet,
dass zusätzlich die Stromlinien von den Auslässen zu den Einlässen ermittelt werden, und die Geometrie um die Volumenelemente des Bauraums erweitert wird, die von den zwischen den Aus- und Einlässen durchgängigen

Stromlinien, die keine auf diese Richtung bezogenen Rückströmungen aufweisen, geschnitten werden.

17. Computerprogramm-Produkt, das direkt in den internen Speicher eines Computers geladen werden kann und Softwareabschnitte umfasst, mit denen ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 16 ausführbar ist, wenn das Produkt auf einem Computer läuft.
18. Computerprogramm-Produkt, das auf einem von einem Computer lesbaren Medium gespeichert ist, und das von einem Computer lesbare Programm-Mittel aufweist, die den Computer veranlassen, ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 16 auszuführen.

1/5

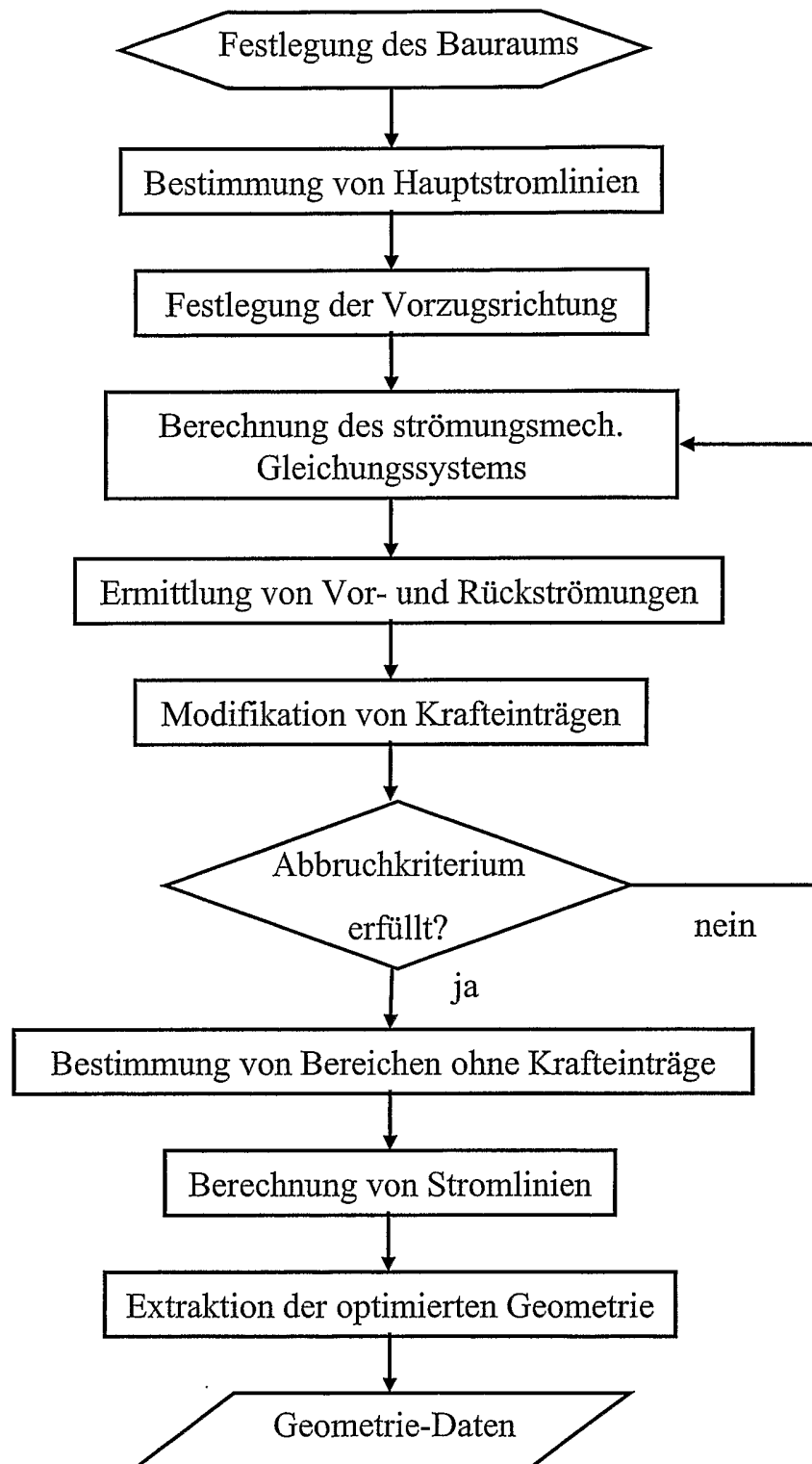


Fig.1

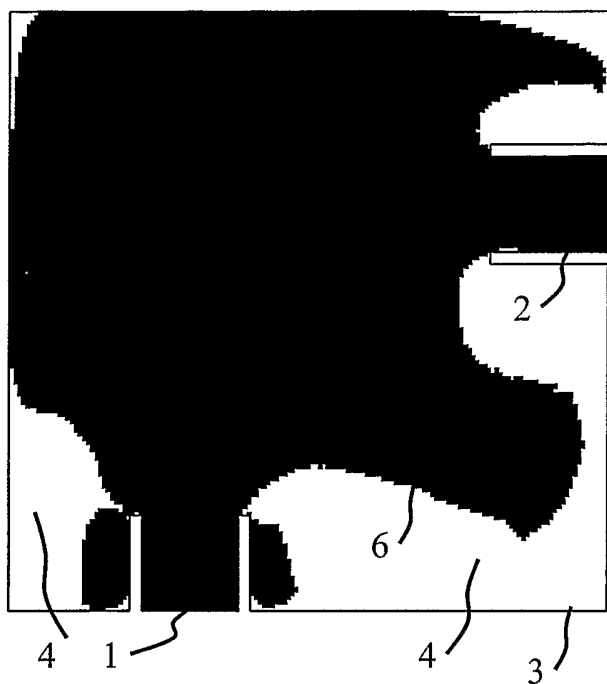


Fig.2a

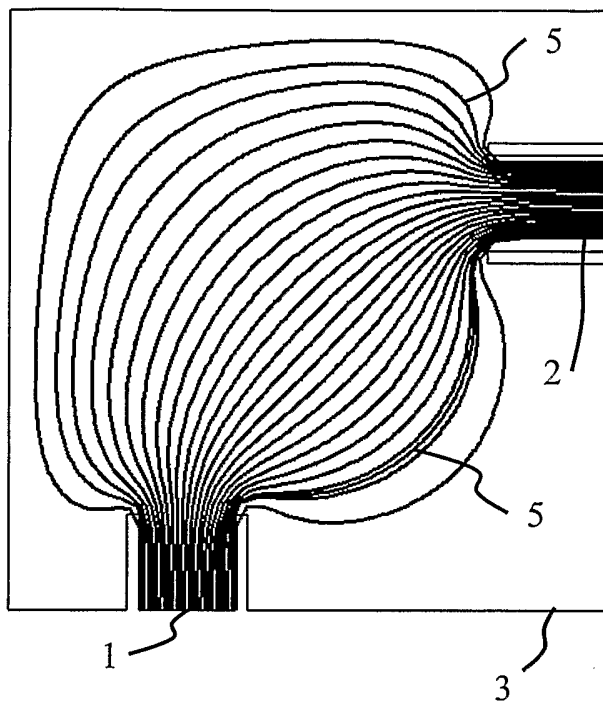


Fig.2b



Fig.3a

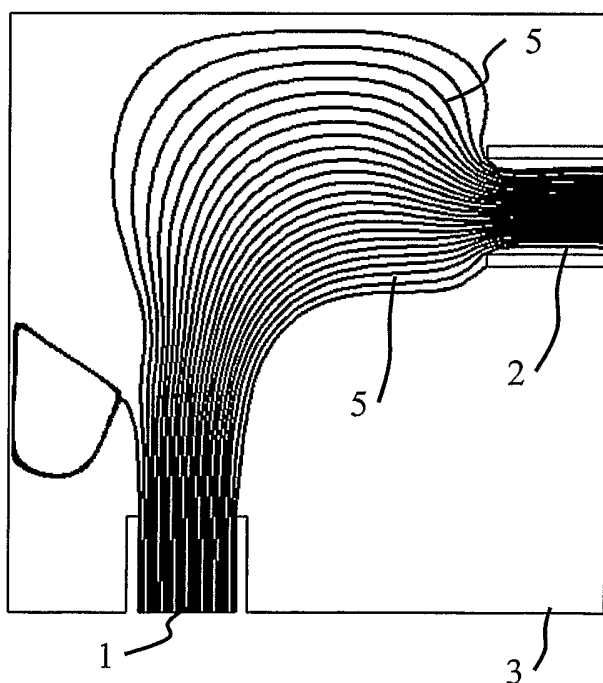


Fig.3b

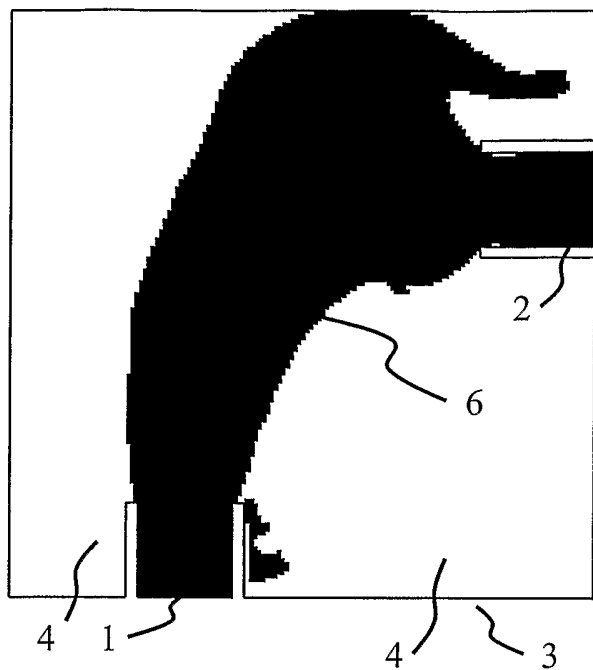


Fig.4a

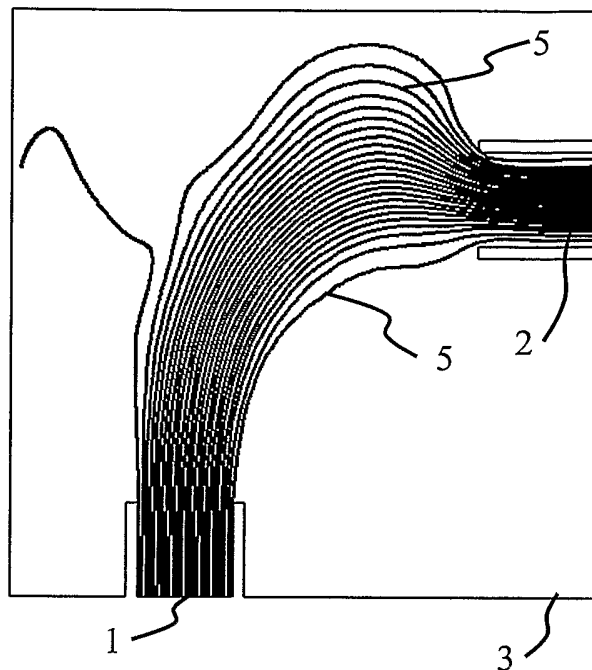


Fig.4b

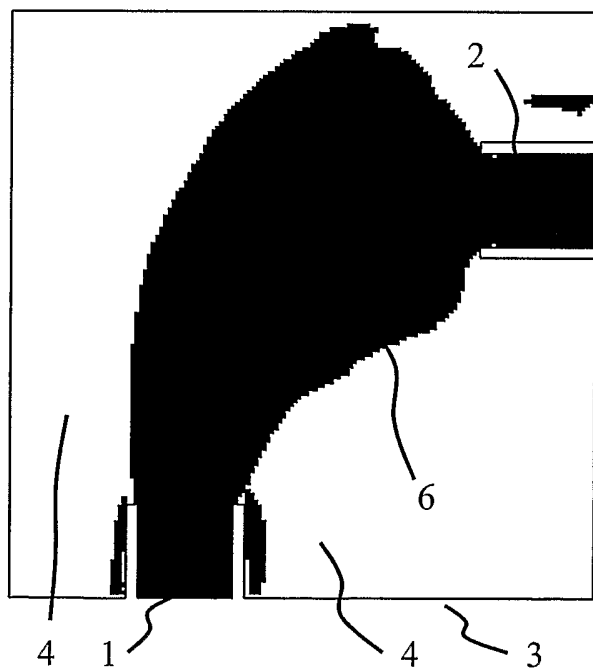


Fig.5a

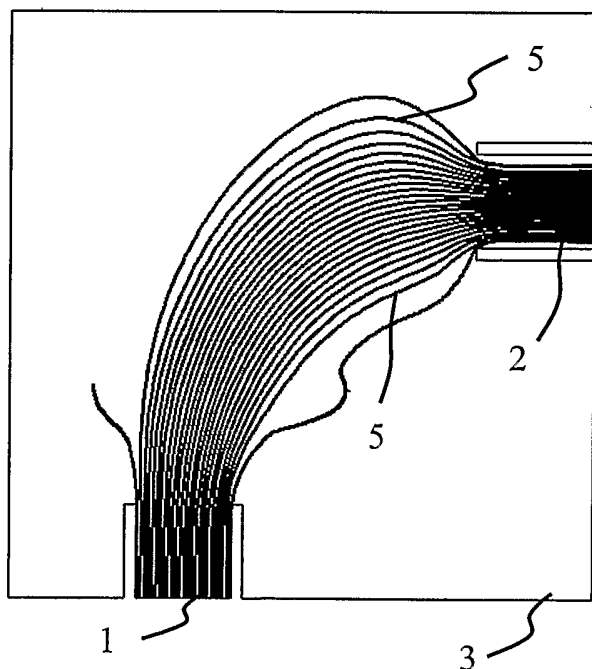


Fig.5b

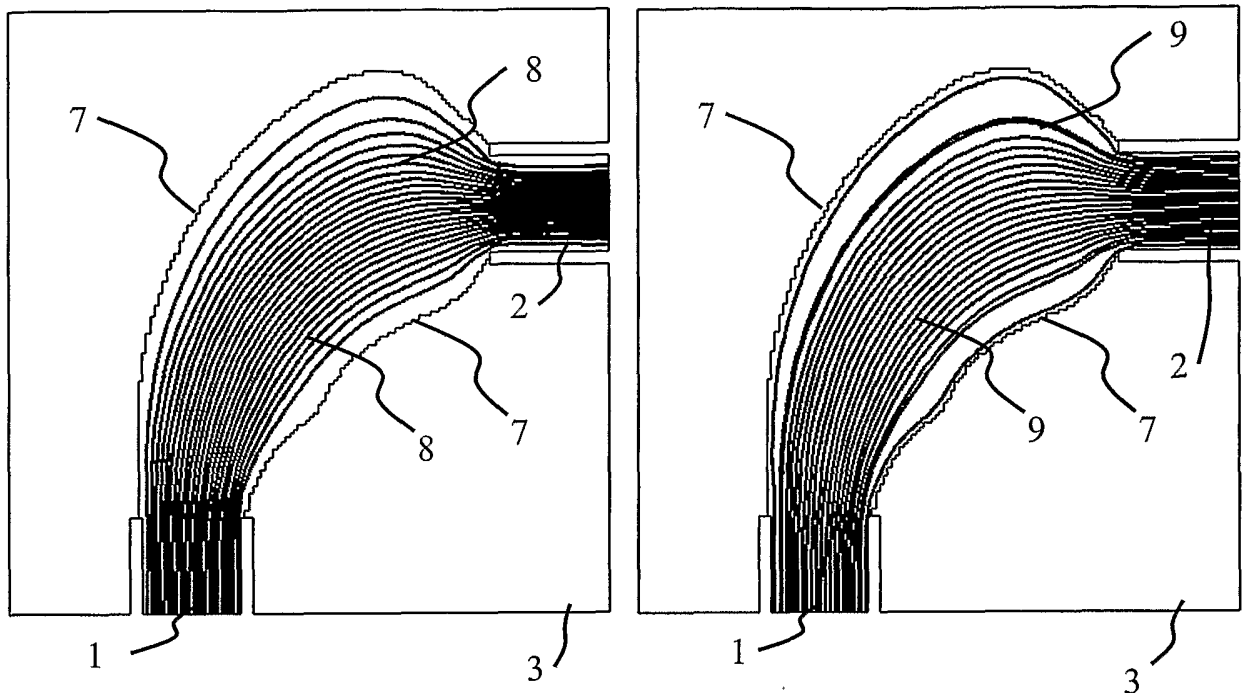


Fig.6a

Fig.6b

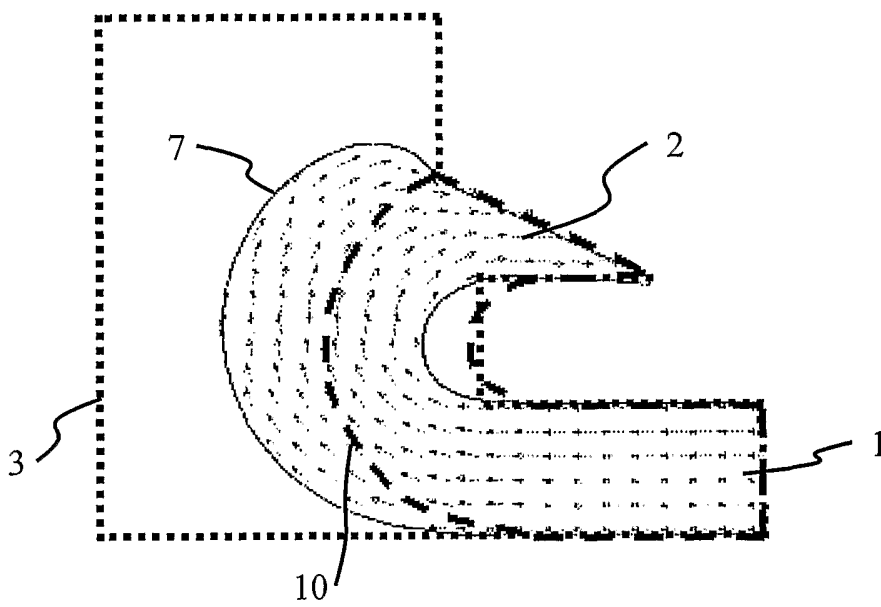


Fig.7

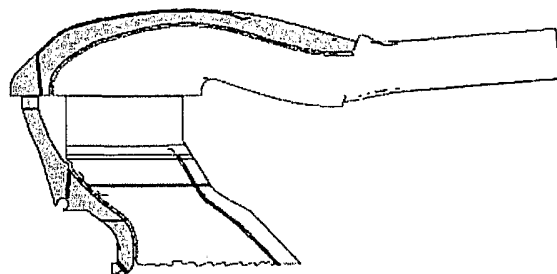


Fig.8a

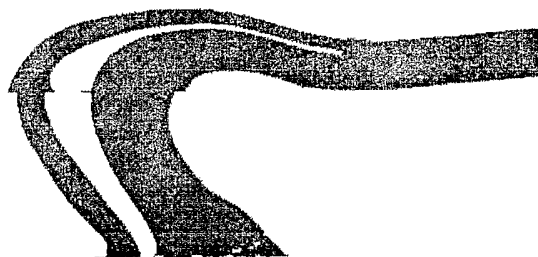


Fig.8b

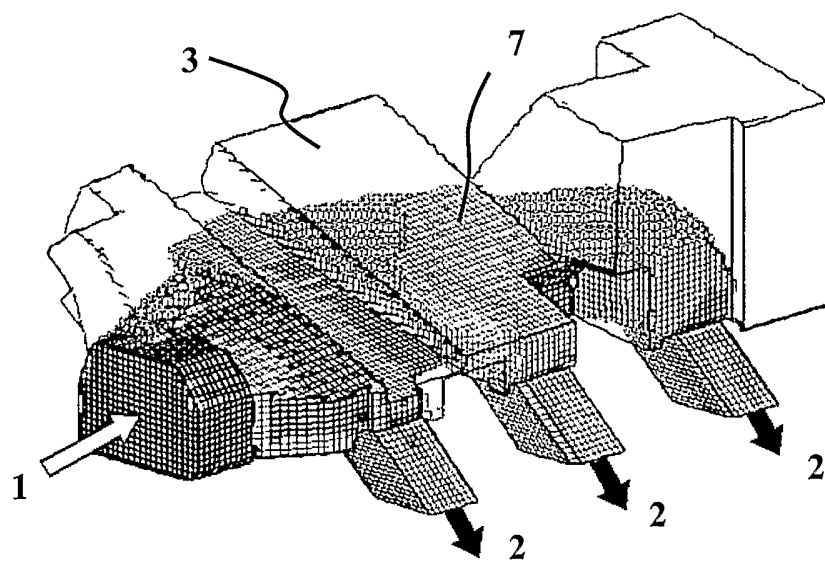


Fig.9