

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 50519/2021 (51) Int. Cl.: **F02B 23/06** (2006.01)
(22) Anmeldetag: 24.06.2021 **F02B 23/10** (2006.01)
(43) Veröffentlicht am: 15.01.2023 **F02D 41/40** (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
WO 2017152203 A1
EP 3751124 A1
US 2011023811 A1
US 2015053172 A1
DE 10393905 B4
DE 102011055170 A1
WO 2005033496 A1
CN 201074556 Y
CN 202611915 U
DE 10392141 B4
EP 2708714 A2
DE 102006020642 A1
CN 103046997 A

(71) Patentanmelder:
AVL LIST GMBH
8020 GRAZ (AT)

(72) Erfinder:
Egarter Patrick
9863 Rennweg (AT)
Machold Alexander Dipl.Ing.
8501 Lieboch (AT)
Theissl Helmut Dipl.Ing.
8063 Eggersdorf (AT)
Egert Michael Dipl.Ing.
8573 Kainach (AT)

(74) Vertreter:
Babeluk Michael Dipl.-Ing. Mag.rer.soc.oec.
1080 Wien (AT)

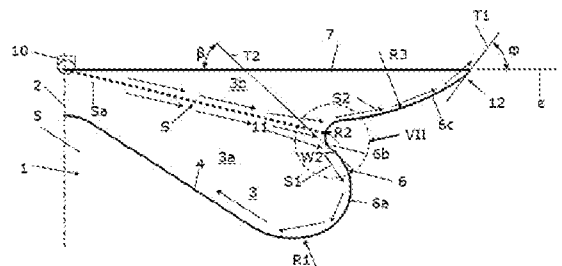
(54) **VERBRENNUNGSSYSTEM FÜR EINE LUFTVERDICHTENDE BRENNKRAFTMASCHINE**

(57) Die Erfindung betrifft Verbrennungssystem für eine luftverdichtende Brennkraftmaschine mit zumindest einem hin- und hergehenden Kolben (1) mit einer rotationssymmetrischen Brennraummulde (3), welche einen Muldenboden (4) mit einer konusartigen Erhebung (5) und eine umlaufende Muldenwand (6) aufweist. Die Muldenwand (6) schließt an den Muldenboden (4) an und bildet einen torusartigen ersten Abschnitt (6a) mit einem inneren ersten Muldendurchmesser (d1), daran anschließend einen zweiten Abschnitt (6b) mit einem inneren zweiten Muldendurchmesser (d2), und daran anschließend einen einen Muldenrandbereich (12) bildenden dritten Abschnitt (6c) mit einem dritten Muldendurchmesser (d3) aus. Der erste Abschnitt (6a) weist einen konkaven ersten Krümmungsradius (R1) und der zweite Abschnitt (6b) einen konvexen zweiten Krümmungsradius (R2) und der dritte Abschnitt (6c) eine an den zweiten Abschnitt (6b) anschließende und geneigt zu einer Normalebene (ϵ) auf die Kolbenachse (2) angeordnete konkave Ringfläche (8) auf.

Um einen hohen Wirkungsgrad zu erzielen, ist vorgesehen, dass

- die Brennkraftmaschine ein Kompressionsverhältnis (CR) von mindestens 17,5:1 und maximal 25:1 aufweist;
- der erste Muldendurchmesser (d1) 48% bis 62% eines maximalen Durchmessers (D) des Kolbens (1) beträgt;

- der zweite Muldendurchmesser (d2) 88% bis 100% des ersten Muldendurchmesser (d1) beträgt;
- der dritte Muldendurchmesser (d3) 120% bis 190% des ersten Muldendurchmesser (d1) beträgt;
- die maximale Muldentiefe (t1) 22% bis 35% des ersten Muldendurchmesser (d1) beträgt;
- der zweite Abschnitt (6b) in einem Abstand (t2) zwischen 7% und 16% des ersten Muldendurchmesser (d1) von der Kolbenstirnfläche (7) angeordnet ist;
- eine erste Tangente (T1) auf die konkave Ringfläche (8) mit der Kolbenstirnfläche (7) einen ersten Winkel (Φ) zwischen 25° und 90° einschließt.



ZUSAMMENFASSUNG

Die Erfindung betrifft Verbrennungssystem für eine luftverdichtende Brennkraftmaschine mit zumindest einem hin- und hergehenden Kolben (1) mit einer rotationssymmetrischen Brennraummulde (3), welche einen Muldenboden (4) mit einer konusartigen Erhebung (5) und eine umlaufende Muldenwand (6) aufweist. Die Muldenwand (6) schließt an den Muldenboden (4) an und bildet einen torusartigen ersten Abschnitt (6a) mit einem inneren ersten Muldendurchmesser (d1), daran anschließend einen zweiten Abschnitt (6b) mit einem inneren zweiten Muldendurchmesser (d2), und daran anschließend einen einen Muldenrandbereich (12) bildenden dritten Abschnitt (6c) mit einem dritten Muldendurchmesser (d3) aus. Der erste Abschnitt (6a) weist einen konkaven ersten Krümmungsradius (R1) und der zweite Abschnitt (6b) einen konvexen zweiten Krümmungsradius (R2) und der dritte Abschnitt (6c) eine an den zweiten Abschnitt (6b) anschließende und geneigt zu einer Normalebene (ϵ) auf die Kolbenachse (2) angeordnete konkave Ringfläche (8) auf.

Um einen hohen Wirkungsgrad zu erzielen, ist vorgesehen, dass

- a. die Brennkraftmaschine ein Kompressionsverhältnis (CR) von mindestens 17,5:1 und maximal 25:1 aufweist;
- b. der erste Muldendurchmesser (d1) 48% bis 62% eines maximalen Durchmessers (D) des Kolbens (1) beträgt;
- c. der zweite Muldendurchmesser (d2) 88% bis 100% des ersten Muldendurchmesser (d1) beträgt;
- d. der dritte Muldendurchmesser (d3) 120% bis 190% des ersten Muldendurchmesser (d1) beträgt;
- e. die maximale Muldentiefe (t1) 22% bis 35% des ersten Muldendurchmesser (d1) beträgt;
- f. der zweite Abschnitt (6b) in einem Abstand (t2) zwischen 7% und 16% des ersten Muldendurchmesser (d1) von der Kolbenstirnfläche (7) angeordnet ist;
- g. -eine erste Tangente (T1) auf die konkave Ringfläche (8) mit der Kolbenstirnfläche (7) einen ersten Winkel (Φ) zwischen 25° und 90° einschließt.

Fig. 2

Die Erfindung betrifft ein Verbrennungssystem für eine luftverdichtende Brennkraftmaschine mit zumindest einem hin- und hergehenden Kolben mit einer zu einer Kolbenachse im Wesentlichen rotationssymmetrischen Brennraummulde, welche einen Muldenboden, der eine maximale Muldentiefe aufweist, mit einer im Wesentlichen konusartigen oder kuppelartigen Erhebung und eine umlaufende Muldenwand aufweist, wobei die Muldenwand einen an den Muldenboden anschließenden, im Wesentlichen torusartigen ersten Abschnitt mit einem maximalen inneren ersten Muldendurchmesser, daran anschließend einen eine Einschnürung ausbildenden zweiten Abschnitt mit einem minimalen inneren zweiten Muldendurchmesser, welcher kleiner ist als der innere erste Muldendurchmesser, und daran anschließend einen einen Muldenrandbereich bildenden dritten Abschnitt mit einem maximalen dritten Muldendurchmesser ausbildet, wobei – in einem Meridianschnitt des Kolbens betrachtet – der erste Abschnitt einen konkaven ersten Krümmungsradius und der zweite Abschnitt einen konvexen zweiten Krümmungsradius aufweist, und wobei der dritte Abschnitt zumindest eine an den zweiten Abschnitt direkt oder indirekt anschließende und geneigt zu einer Normalebene auf die Kolbenachse angeordnete zumindest im Wesentlichen konkave Ringfläche ausbildet, wobei insbesondere die Ringfläche ab einem Wendepunkt in eine konvexe Ringfläche übergeht, die im Bereich einer Kolbenstirnfläche ausgebildet ist. Weiters betrifft die Erfindung eine Brennkraftmaschine mit einem Verbrennungssystem der genannten Art.

Aus der DE 10 2011 055 170 A1 ist ein Dieselmotorkolben mit einer Brennkammer bekannt, welcher eine Profilfläche aufweist, die von ihrer Innenwand zu einer Mittelachse der Brennkammer vorsteht und an der Innenwand einen Vorsprung aufweist, der sich mit einer vorbestimmten Länge von der Innenwand erstreckt. Der Vorsprung teilt einen Einspritzkraftstoff, der auf den Vorsprung gespritzt und atomisiert wird, in eine Kraftstoffströmung in einem oberen Abschnitt und eine Kraftstoffströmung in einen unteren Abschnitt der Brennkammer auf. Dabei weist die Brennraummulde einen durch eine zentrale Erhebung gebildeten Kern auf, welcher einen Drall, Wirbel oder Strudel aktiviert, der die Strömung in dem Brennraum bildet. Dadurch wird das Gemisch des Kraftstoffes und der Luft, die in den Brennraum strömen, verbessert und das Mischungsverhältnis kann erhöht werden.

Die DE 103 92 141 B4 beschreibt einen Kolben für einen Verbrennungsmotor, welcher eine Verbrennungsmulde mit einer Kraftstoffführungsstruktur zum Umleiten zumindest eines Teiles des die Verbrennungsmulde verlassenden

Kraftstoffes umfasst. Der Kolben umfasst eine scharfe Kante, die an der äußeren Fläche des Kolbens benachbart zu dem Zugang zu der Verbrennungsmulde angeordnet ist, und eine abgerundete Kraftstoffaufnahmelippe, die innerhalb der Verbrennungsmulde liegt.

Weiters offenbart die EP 2 708 714 A2 eine Brennkammer für einen Dieselmotor mit einer Brennraummulde, welche eine konkave Form aufweist, so dass ein eingespritzter Kraftstoffstrahl einen Drall oder eine Quetschströmung zur Vermischung mit Luft erzeugt.

Die DE 10 2006 020 642 A1 beschreibt ein Verfahren zum Betrieb einer direkteinspritzenden selbstzündenden Brennkraftmaschine, welche Kolben mit jeweils einer in eine Kolbenmulde eingeformten Kolbenmulde aufweist, die im Übergangsbereich zum Kolben in einen im wesentlichen ringförmigen Stufenraum übergeht. Einspritzstrahlen eines Injektors werden derart zum Stufenraum hingeführt und dort umgelenkt, dass eine erste Teilmenge von Kraftstoff in einer Axialrichtung und in einer Radialrichtung in die Kolbenmulde umgelenkt wird, dass eine zweite Teilmenge von Kraftstoff in der Axialrichtung und der Radialrichtung über den Kolbenboden in den Brennraum umgelenkt wird und dass eine dritte Teilmenge von Kraftstoff in einer Umfangsrichtung umgelenkt wird, wobei die jeweils dritten Teilmengen benachbarter Einspritzstrahlen in der Umfangsrichtung aufeinandertreffen und anschließend in der Radialrichtung nach innen gelenkt werden. Die Wand des Stufenraumes ist durch eine in Axialrichtung gerade, zylindrische Umfangswand, durch einen in der Radialrichtung geraden, ebenen Boden, sowie durch eine konkav gekrümmte Übergangswand gebildet. Dadurch soll ein Betrieb mit verringerter Ruß- und Rauchentwicklung möglich sein. Es wird zwar angedeutet, dass die Umfangswand gegenüber der Axialrichtung von $+10^\circ$ bis -30° und der Boden gegenüber der Radialrichtung in einem Bereich von $+30^\circ$ bis -40° geneigt sein kann, allerdings wird keinerlei Erklärung über den Zweck und die Wirkung dieser Maßnahme abgegeben.

Die CN 103 046 997 A zeigt einen ähnlichen Kolben für eine Diesel-Brennkraftmaschine mit einem Stufenraum mit einem geneigten Boden und einer Wand aufweist, wobei der Boden in Bezug auf eine Normalebene auf die Kolbenachse in einem Winkel zwischen 8° und 12° und die Wand in Bezug auf die Kolbenachse zwischen 80° und 100° geneigt ist. Dadurch entsteht im Bereich des Stufenraumes ein in Richtung der Brennraumdecke und danach zur Kolbenachse gerichteter Wirbel des eingespritzten Kraftstoffes.

Aus den Dokumenten CN 2010 74 556 Y, WO 2005/033496 A1 und CN 202 611 915 U sind weitere ähnliche Kolben mit Stufenräume für selbstzündende Brennkraftmaschinen bekannt, wobei die an die Kolbenstirnseite grenzende Muldenwand des Stufenraumes parallel zur Kolbenachse ausgebildet ist. Kraftstoffstrahlen des auf die Stufe des Kolbens treffenden eingespritzten Kraftstoffes werden auch hier in Richtung der Brennraumdecke und wieder zurück zur Kolbenachse bzw. Muldenachse umgelenkt.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verbrennungssystem für luftverdichtende Brennkraftmaschinen mit hohem Wirkungsgrad bereitzustellen.

Erfindungsgemäß erfolgt dies dadurch, dass

- a. die Brennkraftmaschine ein Kompressionsverhältnis von mindestens 17,5:1 und maximal 25:1, vorzugsweise mindestens 20,1:1 und maximal 23,1:1, aufweist;
- b. der erste Muldendurchmesser mindestens 48% und maximal 62%, vorzugsweise mindestens 50% und maximal 55% eines maximalen Durchmessers des Kolbens beträgt;
- c. der zweite Muldendurchmesser mindestens 88% und maximal 100%, vorzugsweise mindestens 90% und maximal 96%, des ersten Muldendurchmesser beträgt;
- d. der dritte Muldendurchmesser mindestens 120% und maximal 190%, vorzugsweise mindestens 125% und maximal 150%, des ersten Muldendurchmesser beträgt;
- e. die maximale Muldentiefe mindestens 22% und maximal 35%, vorzugsweise mindestens 25% und maximal 30%, des ersten Muldendurchmesser beträgt;
- f. in einem Meridianschnitt betrachtet – ein Punkt des zweite Abschnitt mit minimalem inneren zweiten Muldendurchmesser in einem Abstand von einer Kolbenstirnfläche entfernt angeordnet ist, welcher mindestens 7% und maximal 16%, vorzugsweise mindestens 10% und maximal 13%, des ersten Muldendurchmesser beträgt;
- g. im Meridianschnitt des Kolbens betrachtet – eine erste Tangente auf die konkave Ringfläche mit der Kolbenstirnfläche einen ersten Winkel von mindestens 25° und maximal 90°, vorzugsweise mindestens 40° und maximal 60°, einschließt, wobei

- i. im Falle einer sich mit der Kolbenstirnfläche schneidenden konkaven Ringfläche - die erste Tangente im Schnittpunkt der konkaven Ringfläche mit der Kolbenstirnfläche oder
- ii. - im Falle einer konkaven Ringfläche mit einer radial außerhalb anschließenden konvexen Ringfläche - in einem ersten Wendepunkt zwischen der konkaven Ringfläche und der konvexen Ringfläche

definiert ist.

Überraschender Weise hat sich herausgestellt, dass durch die Kombination der genannten Merkmale der effektive Wirkungsgrad der Brennkraftmaschine wesentlich gesteigert werden kann.

Unter Meridianschnitt des Kolbens wird ein Schnitt entlang der Kolbenachse des Kolbens verstanden, der normal zur Brennraummulde verläuft. Der Meridianschnitt ergibt damit eine Meridianebene, die normal zur Brennraummulde steht und parallel zur bzw. zusammenfallend mit der Kolbenachse ist.

In einer Ausführungsvariante der Erfindung ist vorgesehen, dass eine Einspritzeinrichtung im Bereich der Kolbenachse so angeordnet ist, dass zumindest ein Kraftstoffstrahl in zumindest einer Hubstellung des Kolbens auf den zweiten Abschnitt trifft und der Kraftstoffstrahl durch den zweiten Abschnitt in einen zum ersten Abschnitt gerichteten ersten Strahlteil und einen zum dritten Abschnitt gerichteten zweiten Strahlteil aufteilbar ist.

In aufwendigen Versuchen und Berechnungen hat sich gezeigt, dass in Kombination mit den eingangs genannten Merkmalen Stagnationszonen an den Muldenwänden im dritten Abschnitt vermieden werden können, wenn in einem Meridianschnitt des sich im oberen Totpunkt befindenden Kolbens betrachtet - zumindest eine Strahlachse der Einspritzeinrichtung die Kolbenmulde in einen an den Muldenboden des Kolbens grenzenden unteren Bereich und einen daran in Richtung der Brennraumdecke anschließenden oberen Bereich unterteilt, wobei der untere Bereich etwa 54 bis 62%, vorzugsweise 56% und der obere Bereich etwa 38 bis 46%, vorzugsweise 44%, der gesamten Brennraummulde beträgt.

Dadurch, dass der innere zweite Muldendurchmesser mindestens 88% und maximal 100% des ersten Muldendurchmesser beträgt, wird eine ausgeprägte Aufteilung in zwei Strahlteile erreicht. Für eine Aufteilung des Kraftstoffstrahles ist es günstig, wenn - bezogen auf einen größten Durchmesser des Kolbens - der zweite Krümmungsradius $0,02 \pm 50\%$ beträgt.

Der Kraftstoffstrahl wird entlang der zumindest einen Ringfläche in Richtung der Zylinderwand geleitet, wobei der direkte Kontakt mit der Zylinderwand vermieden werden kann. Dies unterstützt die maximale Erfassung von verfügbarer Frischgasladung für eine vollständige emissionsarme Verbrennung. Dabei erzeugt der Kraftstoffimpuls eine Ladungsbewegung, die sich in Form einer Rotation entgegen des Einspritzstrahles ausbildet. Dies erfolgt sowohl im Bereich zwischen dem Kolben und der durch das Feuerdeck des Zylinderkopfes gebildeten Brennraumdecke als auch zwischen Kolben und Muldenboden. Die somit entstehenden rotierenden Walzen werden durch die Kraftstoffstrahlen noch weiter angefacht und ermöglichen dadurch ein annähernd homogenes Kraftstoff/Luftgemisch. Dadurch kann eine gute und emissionsarme Verbrennung erzielt werden.

Vorzugsweise weist die Einspritzeinrichtung mindestens 7 und maximal 12, insbesondere 8, Einspritzöffnungen auf.

Dabei ist es besonders vorteilhaft, wenn - in einem Meridianschnitt des sich im oberen Totpunkt befindenden Kolbens betrachtet - zumindest eine Strahlachse der Einspritzeinrichtung mit der Kolbenachse einen Kraftstoffsprühkegelwinkel

$$\alpha = \tan^{-1}(d_2/(2 \cdot t_2)) \pm 3^\circ - \text{vorzugsweise } \pm 1,5^\circ -$$

einschließt, welcher insbesondere zwischen 70° und 80° beträgt. Dabei ist d_2 der zweite Muldendurchmesser und t_2 der Abstand des Punktes des zweiten Abschnittes mit dem zweiten Muldendurchmesser von der Kolbenstirnfläche.

Im Rahmen der Erfindung ist weiters vorgesehen, dass die Einspritzdauer mindestens 12° und maximal 22° , vorzugsweise mindestens 14° und maximal 20° , Kurbelwinkel beträgt.

Um eine zum Muldenboden gerichtete ausgeprägte erste Wirbelwalze zu erzeugen, ist es vorteilhaft, wenn - bezogen auf einen größten Durchmesser des Kolbens - der erste Krümmungsradius $0,06 \pm 50\%$ (d.h., das 0,06-fache des größten Durchmessers des Kolbens) beträgt.

Der Kolben eignet sich für Brennkraftmaschinen mit einer drallbehafteten Einlasskanalstruktur, wobei eine Drallzahl der Strömung im Brennraum um die Kolbenachse mindestens 1, maximal 2 beträgt. Unter Einlassstruktur ist die Form und Anordnung der Einlasskanäle im Zylinderkopf gemeint, welche so ausgebildet sind, dass beim Einströmen der Luft in den Brennraum ein Drall mit einer Drallzahl zwischen 1 und 2 generiert wird.

Die Erfindung wird im Folgenden anhand eines in den Figuren gezeigten nicht einschränkenden Ausführungsbeispiels näher erläutert. Darin zeigen:

- Fig. 1 einen Kolben einer erfindungsgemäßen Brennkraftmaschine in einem Meridianschnitt in einer ersten Ausführungsvariante;
- Fig. 2 die Kolbenmulde dieses Kolbens in einem Meridianschnitt;
- Fig. 3 diesen Kolben in einer Draufsicht;
- Fig. 4 eine Einlasskanalstruktur in einer Draufsicht und
- Fig. 5 eine Kolbenmulde eines Kolbens einer erfindungsgemäßen Brennkraftmaschine in einem Meridianschnitt in einer zweiten Ausführungsvariante;
- Fig. 6 einen Kolben einer erfindungsgemäßen Brennkraftmaschine in einem Meridianschnitt in einer dritten Ausführungsvariante
- Fig. 7a das Detail VII aus Fig. 2;
- Fig. 7b das Detail VII aus Fig. 2 in einer Ausführungsvariante;
- Fig. 8a das Detail VIII aus Fig. 5;
- Fig. 8b das Detail VIII aus Fig. 5 in einer Ausführungsvariante;
- Fig. 8c das Detail VIII aus Fig. 5 in einer weiteren Ausführungsvariante;
- Fig. 9a das Detail IX aus Fig. 1;
- Fig. 9b das Detail IX aus Fig. 1 in einer Ausführungsvariante und
- Fig. 10 das Detail X aus Fig. 4.

Fig. 1 zeigt einen Kolben 1 einer nicht weiter dargestellten luftverdichtenden Brennkraftmaschine. Der Kolben 1 eignet sich besonders für Brennkraftmaschinen mit einer Drallzahl von mindestens 1 und maximal 2, bezogen auf die Kolbenachse 2, ausgelegten drallbildenden Einlasskanalstruktur 20. Ein Beispiel für eine solche Einlassstruktur 20 mit einem drallerzeugenden Einlasskanal 21 und einem Füllkanal 22 ist in Fig. 4 gezeigt.

In den Kolben 1 ist eine zur Kolbenachse 2 rotationssymmetrisch ausgebildete Brennraummulde 3 eingeformt. Die zumindest einen großen Teil des Brennraumes bildende Brennraummulde 3 des Kolbens 1 besteht aus einem Muldenboden 4 mit einer konusartigen zentralen Erhebung 5, und einer

umlaufenden Muldenwand 6. Beginnend vom Muldenboden 4 weist die Muldenwand 6 einen ersten Abschnitt 6a, einen daran anschließenden zweiten Abschnitt 6b, sowie einen an den zweiten Abschnitt 6b anschließenden dritten Abschnitt auf 6c, wobei der dritte Abschnitt 6c an die dem nicht weiter dargestellten Zylinderkopf zugewandte Kolbenstirnfläche 7 grenzt und einen Muldenrandbereich 12 bildet. Der zweite Abschnitt 6b hat die Funktion eines Sprühteilers für die Kraftstoffstrahlen S.

Im ersten Abschnitt 6a ist die Muldenwand 6 zumindest teilweise kreistorusförmig gestaltet, wobei – in einem Meridianschnitt des Kolbens 1 betrachtet - der konkave erste Krümmungsradius R_1 des ersten Abschnittes 6a etwa $0,06 \pm 50\%$ des größten Durchmesser D des Kolbens 1 beträgt. Im Bereich des ersten Abschnittes 6a weist die Brennraummulde 3 einen inneren ersten Durchmesser d_1 auf, welcher mindestens 48% und maximal 62 % des maximalen Durchmessers D des Kolbens 1 beträgt. Im Bereich des zweiten Abschnittes 6b ist die Muldenwand 6 eingezogen und überhängend ausgebildet, wobei der im Bereich des zweiten Abschnittes 6b gemessene innere zweite Muldendurchmesser d_2 mindestens 88% und maximal etwa 100% des inneren ersten Muldendurchmessers d_1 beträgt. Bezogen auf den maximalen Kolbendurchmesser D beträgt der innere erste Muldendurchmesser d_1 also etwa 0,42 bis 0,62.

Der dritte Abschnitt 6c der Muldenwand 6 weist zumindest eine konkave Ringfläche 8 mit einem dritten Krümmungsradius R_3 auf, welche bei der in Fig. 1 dargestellten Ausführungsvariante direkt, also verlaufend und übergangslos, an den zweiten Krümmungsradius R_2 des zweiten Abschnittes 6b anschließt und in der Kolbenstirnfläche 7 endet. Die Schnittlinie zwischen der konkaven Ringfläche 8 und der Kolbenstirnfläche 7 weist im in Fig. 1 und 2 dargestellten ersten Ausführungsbeispiel einen Durchmesser d_3 auf, welcher mindestens etwa 120% und maximal 190% des ersten Muldendurchmessers d_1 des Kolbens 1 beträgt. Im in den Fig. 1 dargestellten Meridianschnitt des Kolbens 1 betrachtet spannt eine erste Tangente T_1 auf die konkave Ringfläche 8 im Bereich der Kolbenstirnfläche 7 mit einer Normalebene ε auf die Kolbenachse 2 einen ersten Winkel Φ zwischen etwa 25° und 90° auf. Versuche haben gezeigt, dass die besten Ergebnisse erzielt werden können, wenn der dritte Krümmungsradius R_3 der konkaven Ringfläche 8 maximal etwa 50% des Durchmessers D des Kolbens 1 beträgt.

In den in den Fig. 1 und Fig. 2 gezeigten Meridianschnitten des Kolbens 1 betrachtet ist die Muldenwand 6 im zweiten Abschnitt 6b konvex gekrümmt und weist einen zweiten Krümmungsradius R_2 von etwa $0,02 \pm 50\%$ mal dem größten Durchmesser D des Kolbens 1 auf. Die Muldenwand 6 ist zwischen dem ersten

Abschnitt 6a und dem zweiten Abschnitt 6b verlaufend ausgeführt, wobei zwischen dem ersten Krümmungsradius R1 und dem zweiten Krümmungsradius R2 gegebenenfalls auch noch ein gerader Abschnitt ausgebildet sein kann. Alternativ dazu kann der erste Krümmungsradius R1 direkt über einen zweiten Wendepunkt W2 in den zweiten Krümmungsradius R2 übergehen. Eine zweite Tangente T2 durch den zweiten Wendepunkt W2 im Übergang zwischen dem ersten Abschnitt 6a und dem zweiten Abschnitt 6b spannt mit der Normalebene ϵ auf die Kolbenachse 2 einen zweiten Winkel β von etwa 35° bis 45° auf.

Im dargestellten Ausführungsbeispiel beträgt die maximale Muldentiefe 13 mindestens 22% und maximal 35% des ersten Muldendurchmessers d1.

Die im Bereich der zentralen Erhebung 5 gemessene minimale Muldentiefe t3 beträgt etwa 4% bis 8%, insbesondere 6%, des maximalen Durchmesser D des Kolbens 1. Ein von der Kolbenstirnfläche 7 in Richtung der Kolbenachse 2 weg gemessener Abstand t2 des zweiten Abschnittes 6b beträgt mindestens 7% und maximal 16% des ersten Muldendurchmessers d1. Die konische Erhebung 5 spannt mit der Kolbenachse 2 einen dritten Winkel δ von etwa 20° bis 40° - im Beispiel etwa 30° - auf. Die Erhebung 5 weist einen zentralen Krümmungsradius RZ auf, welcher beispielsweise etwa 6% des größten Durchmessers D des Kolbens 1 beträgt.

Wie in Fig. 1 und 2 angedeutet, wird Kraftstoff über eine zentral im Zylinder angeordnete Einspritzeinrichtung 10 eingespritzt, wobei der Kraftstoff in zumindest einer Hubstellung des Kolbens 1 auf den zweiten Abschnitt 6b der Muldenwand 6 auftrifft. Die Strahlachsen Sa des Kraftstoffstrahles spannen mit der Kolbenachse 2 einen Kraftstoffsprühkegelwinkel α von mindesten 70° und maximal 80° auf.

Die Geometrie des Kolbens 1 und die Einspritzrichtung der Einspritzeinrichtung 10 sind so aufeinander abgestimmt, dass - in einem Meridianschnitt des sich im oberen Totpunkt OT befindenden Kolbens 1 betrachtet - zumindest eine Strahlachse Sa eines Einspritzstrahles der Einspritzeinrichtung 10, die auf den Punkt P des zweiten Abschnittes 6b mit minimalem inneren zweiten Muldendurchmesser d2 trifft, die Brennraummulde 3 in einen unteren Bereich 3a und einen oberen Bereich 3b unterteilt, wobei der untere Bereich 3a etwa 54% bis 62%, vorzugsweise 56% und der obere Bereich 3b etwa 38% bis 46%, vorzugsweise 44%, des gesamten Bereichs der Brennraummulde 3 beträgt (Fig. 1, 2).

Die in Fig. 5 dargestellte zweite Ausführungsvariante unterscheidet sich von der in Fig. 1 und 2 dargestellten ersten Ausführungsvariante dadurch, dass zwischen der konkaven Ringfläche 8 und der Kolbenstirnfläche 7 eine konvexe Ringfläche 9

mit einem vierten Krümmungsradius R_4 ausgebildet ist, welcher beispielsweise etwa $0,02 \pm 50\%$ mal dem größten Durchmesser D des Kolbens 1 beträgt, und insbesondere im Wesentlichen dem zweiten Krümmungsradius R_2 entspricht. Zwischen der konkaven Ringfläche 8 und der konvexen Ringfläche 9a ist ein zweiter Wendepunkt W_2 ausgebildet (Fig. 10). Die erste Tangente T_1 durch den ersten Wendepunkt W_1 zwischen der konkaven Ringfläche 8 und der konvexen Ringfläche 9 spannt mit der Normalebene ε auf die Kolbenachse 2 einen ersten Winkel Φ zwischen etwa 25° und 90° , insbesondere 60° , auf.

Bei der in Fig. 6 gezeigten dritten Ausführungsvariante weist der dritte Abschnitt 6c zwischen dem zweiten Abschnitt 6b und der konkaven Ringfläche 8 eine kegelige Ringfläche 9b auf, welche mit der Normalebene ε einen vierten Winkel φ zwischen etwa 10° und 40° , beispielsweise 20° aufspannt.

Das erfindungsgemäße drallgestützte Verbrennungssystem für kompressionsgezündete bzw. luftverdichtende Brennkraftmaschinen mit einem definierten Drallniveau mit einer Drallzahl zwischen 1 und 2 kombiniert ein hohes Verdichtungsverhältnis CR mit einer kurzen Einspritzdauer, was zu einem erhöhten thermodynamischen Wirkungsgrad und damit zu einer höheren effektiven Wirkungsgrad (BTE=Break Thermal Efficiency) führt. Das Verdichtungsverhältnis CR sollte zwischen 17,5:1 und 25:1, insbesondere zwischen 20:1 und 23:1, liegen, während die Einspritzdauer in einem Kurbelwinkelbereich CA von 12° bis 22° , insbesondere vorzugsweise 14° bis 20° liegen sollte.

Das Verbrennungssystem kann durch den Zylinderbohrungsdurchmesser bzw. den maximalen Kolbendurchmesser D , den ersten Muldendurchmesser d_1 , den zweiten Muldendurchmesser d_2 , den dritten Muldendurchmesser d_3 , die die Brennraumtiefe definierende maximale Muldentiefe t_1 , die durch den Abstand t_2 von der Kolbenstirnfläche 7 definierte Tiefe des Sprühteilers 11 am Punkt P des zweiten Abschnitts 6b mit minimalen inneren zweiten Muldendurchmesser d_2 , den ersten Winkel Φ zwischen dem Muldenrandbereich 12 und der Kolbenstirnfläche 7 und dem Kraftstoffsprühkegelwinkel α beschrieben werden, wie in den Fig. 1 bis 6 dargestellt ist.

Die Hauptmerkmale des Verbrennungssystems lassen sich durch den Sprühteiler 11, der die Kraftstoffstrahlen S jeweils in einen ersten Strahlteil S_1 und einen zweiten Strahlteil S_2 aufteilt, einen vergrößerten dritten Muldendurchmesser d_3 im Bereich des Muldenrandbereiches 12, der sich oberhalb des Sprühteilers 11 befindet, um den Kraftstoff in Richtung Zylinderkopf und Laubbuchse zu leiten, und den Bereich unterhalb des Sprühteilers 11, der den Kraftstoff zur Mitte der Brennraummulde 3 leitet, beschreiben (siehe Fig. 2 und 6).

Um ein hohes Verdichtungsverhältnis CR bei ausreichender Muldentiefe t_1 zu erreichen, ist eine schmale Kolbenmuldenkonstruktion erforderlich. Der erste Muldendurchmesser d_1 sollte in einem Bereich zwischen 48% bis 62%, insbesondere 50% bis 55%, bezogen auf den maximalen Kolbendurchmesser D liegen.

Bei der kurzen Einspritzdauer und dem kleinen Volumen des Brennraums aufgrund des hohen Verdichtungsverhältnisses CR verbessert diese Brennraummulde 3 die Vermischung des Kraftstoffs mit der Ladeluft für eine verbesserte Verbrennungseffizienz.

Der Sprühverteiler 11 teilt die eingespritzten Kraftstoffstrahlen S jeweils in zwei Strahlteile S_1 , S_2 auf und unterstützt die Kraftstoffausbreitung zu den gewünschten Stellen während der sehr kurzen Einspritzdauer. Er ist gekennzeichnet durch das die Strahlaufteilung und -umlenkung definierende Verhältnis des zweiten Muldendurchmessers d_2 zum ersten Muldendurchmesser d_1 , welches zwischen 88% und 100%, vorzugsweise 90% bis 96% beträgt sowie den Abstand t_2 Strahlteilers 11 von der Kolbenstirnfläche 7, welcher zwischen 7% und 16%, vorzugsweise zwischen 8% und 13% des ersten Muldendurchmessers d_1 beträgt, wie in den Fig. 7a und 7b für unterschiedlich überhängende Sprühverteiler 11 veranschaulicht ist.

Der vergrößerte dritte Muldendurchmesser d_3 gibt die Möglichkeit, den verdampften Kraftstoff in Richtung des Zylinderkopf-Feuerdecks und der Zylinderlaufbuchse zu leiten, um eine bessere Vermischung mit der Ladeluft aus diesem Bereich zu erreichen, was zu einem verbesserten Verbrennungswirkungsgrad führt, wie die Beispiele in Abbildung 8a, 8b und 8c zeigen. Dabei sollte der dritte Muldendurchmesser d_3 in einem Bereich von 120% bis 190%, vorzugsweise in einem Bereich von 125% bis 150% relativ zum ersten Muldendurchmesser d_1 liegen. Im Bereich der Kolbenstirnfläche 7 weist der Muldenrandbereich 12 einen ersten Winkel Φ zu einer Normalebene ϵ auf die Kolbenachse 2 auf, welcher die Ausbreitungsrichtung des Kraftstoffs beeinflusst. Dieser erste Winkel Φ liegt erfindungsgemäß in einem Bereich zwischen 25° und 90° , vorzugsweise 40° bis 60° .

Die Erhebung 5, die konusförmig oder leicht kuppelförmig sein kann, ermöglicht eine bessere Brennstoffausbreitung und Vermischung mit der Luftladung zur Mitte der Brennraummulden 3 hin. Fig. 9a zeigt eine Ausführung mit einer einfachen konusförmigen Erhebung 5 und Fig. 9b eine Ausführungsvariante mit einer kuppelförmigen Erhebung 5. Der Vermischungsprozess im unteren Bereich 3a der Kolbenmulde 3 wird hauptsächlich durch das die zuvor beschriebene

Strahlaufteilung und -umlenkung definierende Verhältnis des zweiten Muldendurchmessers d_2 zum ersten Muldendurchmesser d_1 beeinflusst.

Um einen hohen Verbrennungswirkungsgrad zu erreichen, sollte das Verhältnis der maximalen Muldentiefe t_1 zum ersten Muldendurchmesser d_1 zwischen 22% und 35%, vorzugsweise 24% bis 32% liegen.

Die Anpassung des Kraftstoffsprühkegelwinkels α an die Form der Kolbenmulde 3 ist für eine hohe Verbrennungseffizienz unerlässlich. Da das beschriebene Verbrennungssystem kurze Einspritzdauern in der Nähe des oberen Totpunkts mit fast keiner vertikalen Bewegung des Kolbens kombiniert, muss die Aufspaltungswirkung des Kraftstoffstrahls S durch den Sprühverteiler 11 gewährleistet sein. Um einen hohen effektiven Wirkungsgrad zu gewährleisten, ist der halbe Kraftstoffsprühkegelwinkel α mit der Muldengeometrie über die Formel

$$\alpha = \tan^{-1}(d_2/(2*t_2))$$

mit einem Einstellbereich von $\pm 3^\circ$ - vorzugsweise $\pm 1,5^\circ$ - zur Optimierung auf dem Prüfstand anhand anwendungsspezifischer Randbedingungen verknüpft.

Das erfindungsgemäße Verbrennungssystem beinhaltet eine Drallunterstützung in den Ansaugkanälen zur optimalen Nutzung der eingeschlossenen Luftladung und der Luft/Kraftstoff-Mischung. Die mit der hohen Kraftstoffeinspritzrate (kurze Einspritzdauer) zusammenhängende Sprühlochzahl ist optimal auf das induzierte Drallniveau abgestimmt und vervollständigt die Konfiguration des Verbrennungssystems für eine maximale Nutzung der eingeschlossenen Luftladung und Vermischung mit dem eingespritzten Kraftstoff.

Fig. 3 zeigt ein Beispiel für eine Einspritzeinrichtung 10 mit acht Einspritzöffnungen. Es ist dargestellt, dass sich der Kraftstoffstrahl S am Strahlteiler 11 in alle Richtungen aufteilt, so dass sich zwei Kraftstoffstrahlen S einander annähern. Um einen hohen Verbrennungswirkungsgrad zu erreichen, muss eine Interaktion von jeweils benachbarten Kraftstoffstrahlen S verhindert werden. Da die Drallbewegung DR diesen Effekt beeinflusst, muss die Anzahl der Einspritzöffnungen der Einspritzeinrichtung 10 in einem Bereich zwischen 7 und 12 entsprechend angepasst werden. Je höher die Drallbewegung der Ladeluft ist, desto geringer ist die Anzahl der angepassten Kraftstoffstrahlen S und der Einspritzöffnungen der Einspritzeinrichtung 10.

24.06.2021

Fu

PATENTANSPRÜCHE

1. Verbrennungssystem für eine luftverdichtende Brennkraftmaschine mit zumindest einem hin- und hergehenden Kolben (1) mit einer zu einer Kolbenachse (2) im Wesentlichen rotationssymmetrischen Brennraummulde (3), welche einen Muldenboden (4), der eine maximale Muldentiefe (t_1) aufweist, mit einer im Wesentlichen konusartigen oder kuppelartigen Erhebung (5) und eine umlaufende Muldenwand (6) aufweist, wobei die Muldenwand (6) einen an den Muldenboden (4) anschließenden, im Wesentlichen torusartigen ersten Abschnitt (6a) mit einem maximalen inneren ersten Muldendurchmesser (d_1), daran anschließend einen – vorzugsweise eine Einschnürung ausbildenden - zweiten Abschnitt (6b) mit einem minimalen inneren zweiten Muldendurchmesser (d_2), welcher kleiner oder gleich ist als der innere erste Muldendurchmesser (d_1), und daran anschließend einen einen Muldenrandbereich (12) bildenden dritten Abschnitt (6c) mit einem maximalen dritten Muldendurchmesser (d_3) ausbildet, wobei – in einem Meridianschnitt des Kolbens (1) betrachtet – der erste Abschnitt (6a) einen konkaven ersten Krümmungsradius (R_1) und der zweite Abschnitt (6b) einen konvexen zweiten Krümmungsradius (R_2) aufweist, und wobei der dritte Abschnitt (6c) zumindest eine an den zweiten Abschnitt (6b) direkt oder indirekt anschließende und geneigt zu einer Normalebene (ϵ) auf die Kolbenachse (2) angeordnete zumindest im Wesentlichen konkave Ringfläche (8) ausbildet, wobei insbesondere die konkave Ringfläche (8) ab einem ersten Wendepunkt (W_1) in eine konvexe Ringfläche (9a) übergeht, die im Bereich einer Kolbenstirnfläche (7) ausgebildet ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass
 - a. die Brennkraftmaschine ein Kompressionsverhältnis (CR) von mindestens 17,5:1 und maximal 25:1, vorzugsweise mindestens 20,1:1 und maximal 23,1:1, aufweist;
 - b. der erste Muldendurchmesser (d_1) mindestens 48% und maximal 62%, vorzugsweise mindestens 50% und maximal 55%, eines maximalen Durchmessers (D) des Kolbens (1) beträgt;
 - c. der zweite Muldendurchmesser (d_2) mindestens 88% und maximal 100%, vorzugsweise mindestens 90% und maximal 96%, des ersten Muldendurchmesser (d_1) beträgt;
 - d. der dritte Muldendurchmesser (d_3) mindestens 120% und maximal 190%, vorzugsweise mindestens 125% und maximal 150%, des ersten Muldendurchmesser (d_1) beträgt;

- e. die maximale Muldentiefe (t_1) mindestens 22% und maximal 35%, vorzugsweise mindestens 25% und maximal 30%, des ersten Muldendurchmesser (d_1) beträgt;
- f. in einem Meridianschnitt des Kolbens (1) betrachtet – ein Punkt (P) des zweiten Abschnittes (6b) mit dem minimalen inneren zweiten Muldendurchmesser (d_2) in einem Abstand (t_2) von einer Kolbenstirnfläche (7) entfernt angeordnet ist, welcher mindestens 7% und maximal 16%, vorzugsweise mindestens 10% und maximal 13%, des ersten Muldendurchmesser (d_1) beträgt;
- g. im Meridianschnitt des Kolbens (1) betrachtet – eine erste Tangente (T1) auf die konkave Ringfläche (8) mit der Kolbenstirnfläche (7) einen ersten Winkel (Φ) von mindestens 25° und maximal 90°, vorzugsweise mindestens 40° und maximal 60°, einschließt, wobei
 - i. – im Falle einer sich mit der Kolbenstirnfläche schneidenden konkaven Ringfläche (8) - die erste Tangente (T1) im Schnittpunkt der konkaven Ringfläche (8) mit der Kolbenstirnfläche (7) oder
 - ii. – im Falle einer konkaven Ringfläche (8) mit einer radial außerhalb anschließenden konvexen Ringfläche (9a) – in einem ersten Wendepunkt (W1) zwischen der konkaven Ringfläche (8) und der konvexen Ringfläche (9a)

definiert ist.

- 2. Verbrennungssystem nach Anspruche 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass im Bereich der Kolbenachse (2) eine Einspritzeinrichtung (10) so angeordnet ist, dass zumindest ein Kraftstoffstrahl (S) in zumindest einer Hubstellung des Kolbens (1) auf den zweiten Abschnitt (6b) trifft und der Kraftstoffstrahl (S) durch den zweiten Abschnitt (6b) in einen zum ersten Abschnitt (6a) gerichteten ersten Strahlteil (S1) und einen zum dritten Abschnitt (6c) gerichteten zweiten Strahlteil (S2) aufteilbar ist.
- 3. Verbrennungssystem nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass - in einem Meridianschnitt des sich im oberen Totpunkt befindenden Kolbens (1) betrachtet - zumindest eine Strahlachse (Sa) der Einspritzeinrichtung (10) die Kolbenmulde (3) in einen an den Muldenboden (4) des Kolbens (1) grenzenden unteren Bereich (3a) und einen daran in Richtung der Brennraumdecke anschließenden oberen Bereich (3b) unterteilt, wobei der untere Bereich (3a) etwa 54 bis 62%, vorzugsweise 56% und der obere

Bereich (3b) etwa 38 bis 46%, vorzugsweise 44%, der gesamten Brennraummulde (3) beträgt.

4. Verbrennungssystem nach Anspruch 2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Einspritzeinrichtung (10) mindestens 7 und maximal 12, vorzugsweise 8, Einspritzöffnungen aufweist.
5. Verbrennungssystem nach einem der Ansprüche 2 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass - in einem Meridianschnitt des sich im oberen Totpunkt befindenden Kolbens (1) betrachtet - zumindest eine Strahlachse (Sa) der Einspritzeinrichtung (10) mit der Kolbenachse (2) einen Kraftstoffsprühkegelwinkel

$$\alpha = \tan^{-1}(d2/(2*t2)) \pm 3^\circ - \text{vorzugsweise } \pm 1,5^\circ -$$

einschließt, wobei d2 der zweite Muldendurchmesser und t2 der Abstand des Punktes (P) des zweiten Abschnittes (6b) mit dem zweiten Muldendurchmesser (d2) von der Kolbenstirnfläche (7) ist.

6. Verbrennungssystem nach einem der Ansprüche 2 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Kraftstoffsprühkegelwinkel (α) zwischen 70° und 80° beträgt.
7. Verbrennungssystem nach einem der Ansprüche 2 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Einspritzdauer mindestens 12° und maximal 22° , vorzugsweise mindestens 14° und maximal 20° , Kurbelwinkel (CA) beträgt.
8. Verbrennungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Brennkraftmaschine eine Einlasskanalstruktur aufweist, welche ausgebildet ist, um eine Strömung im Brennraum mit einer Drallzahl um die Kolbenachse (2) von mindestens 1, vorzugsweise maximal 2, zu erzeugen.
9. Verbrennungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass - bezogen auf einen größten Durchmesser (D) des Kolbens (1) - der erste Krümmungsradius (R1) $0,06 \pm 50\%$ beträgt.
10. Verbrennungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass - bezogen auf einen größten Durchmesser (D) des Kolbens (1) - der zweite Krümmungsradius (R2) $0,02 \pm 50\%$ beträgt.
11. Brennkraftmaschine mit einem Verbrennungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 10.

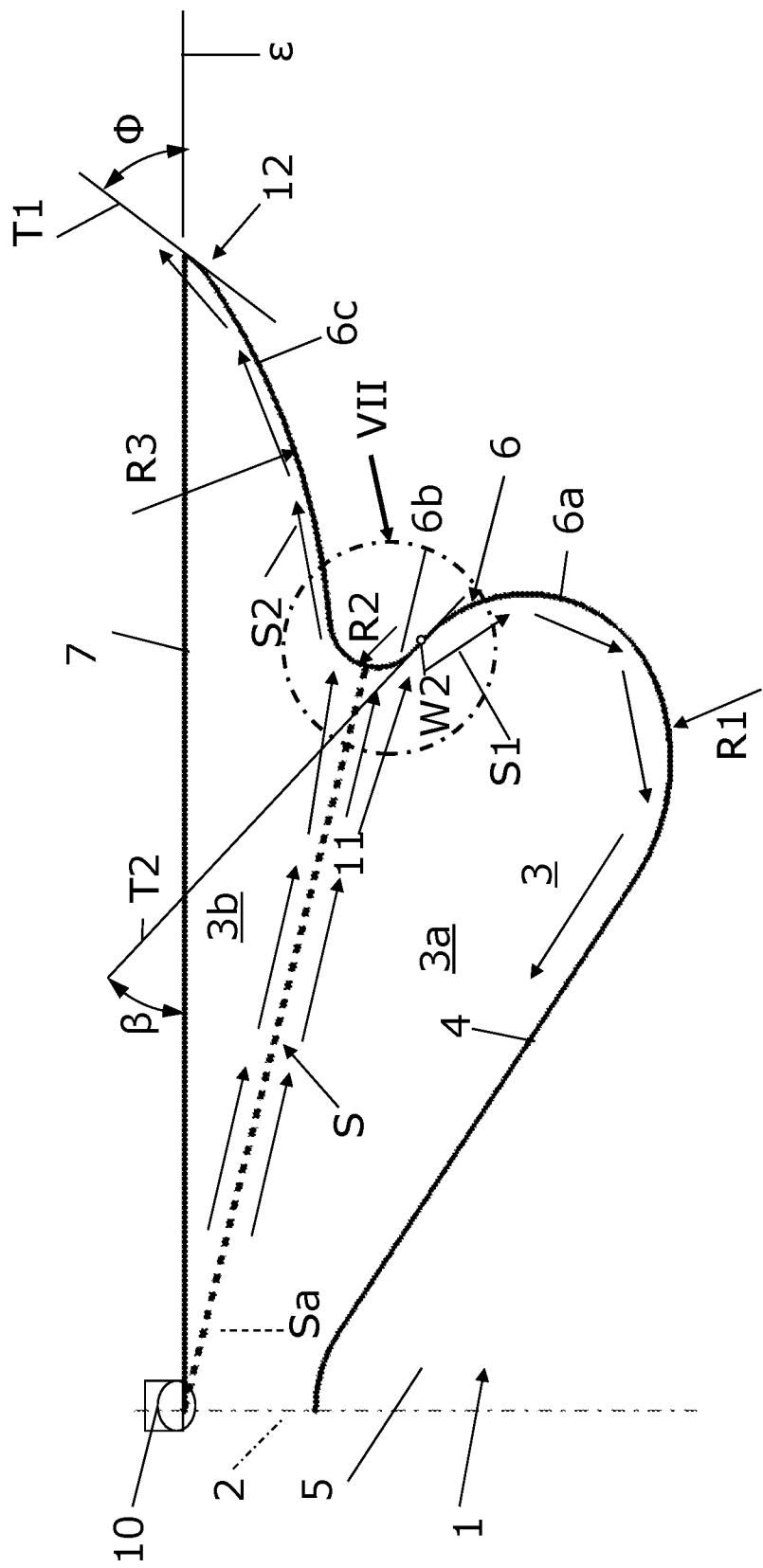


Fig. 2

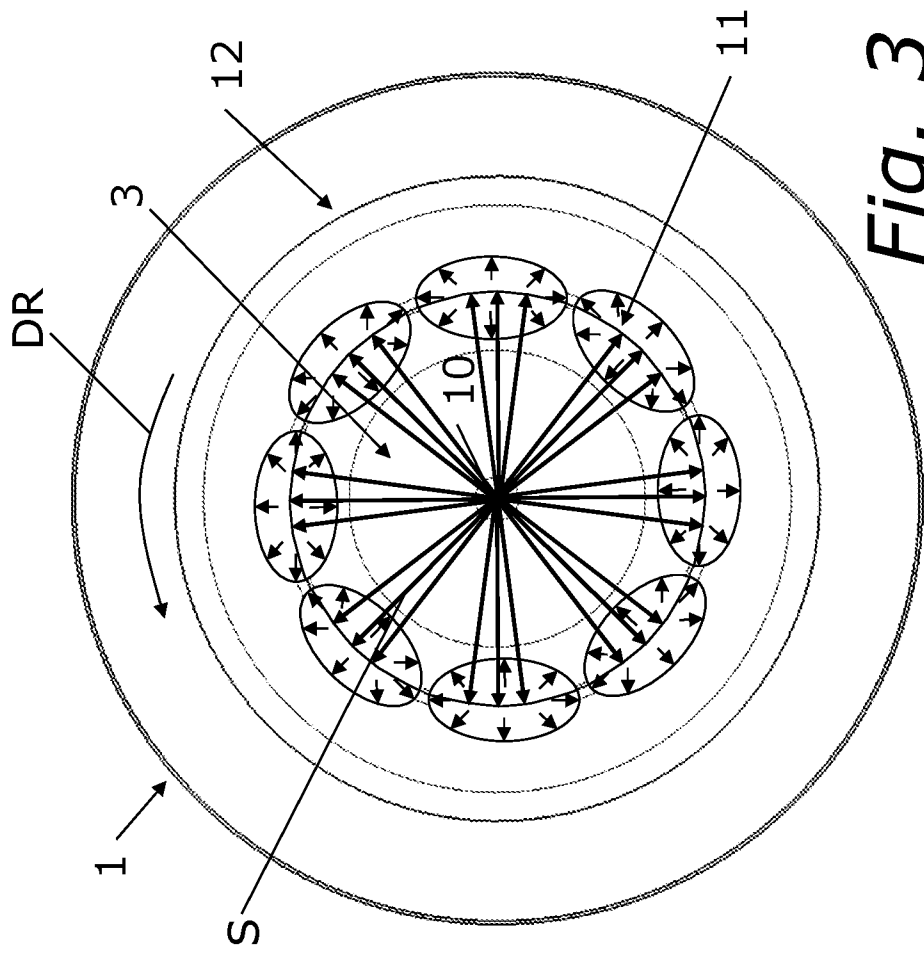


Fig. 3

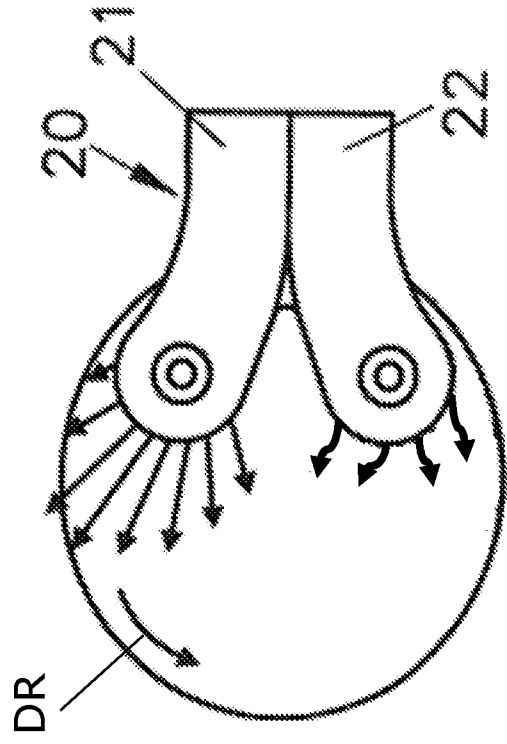


Fig. 4

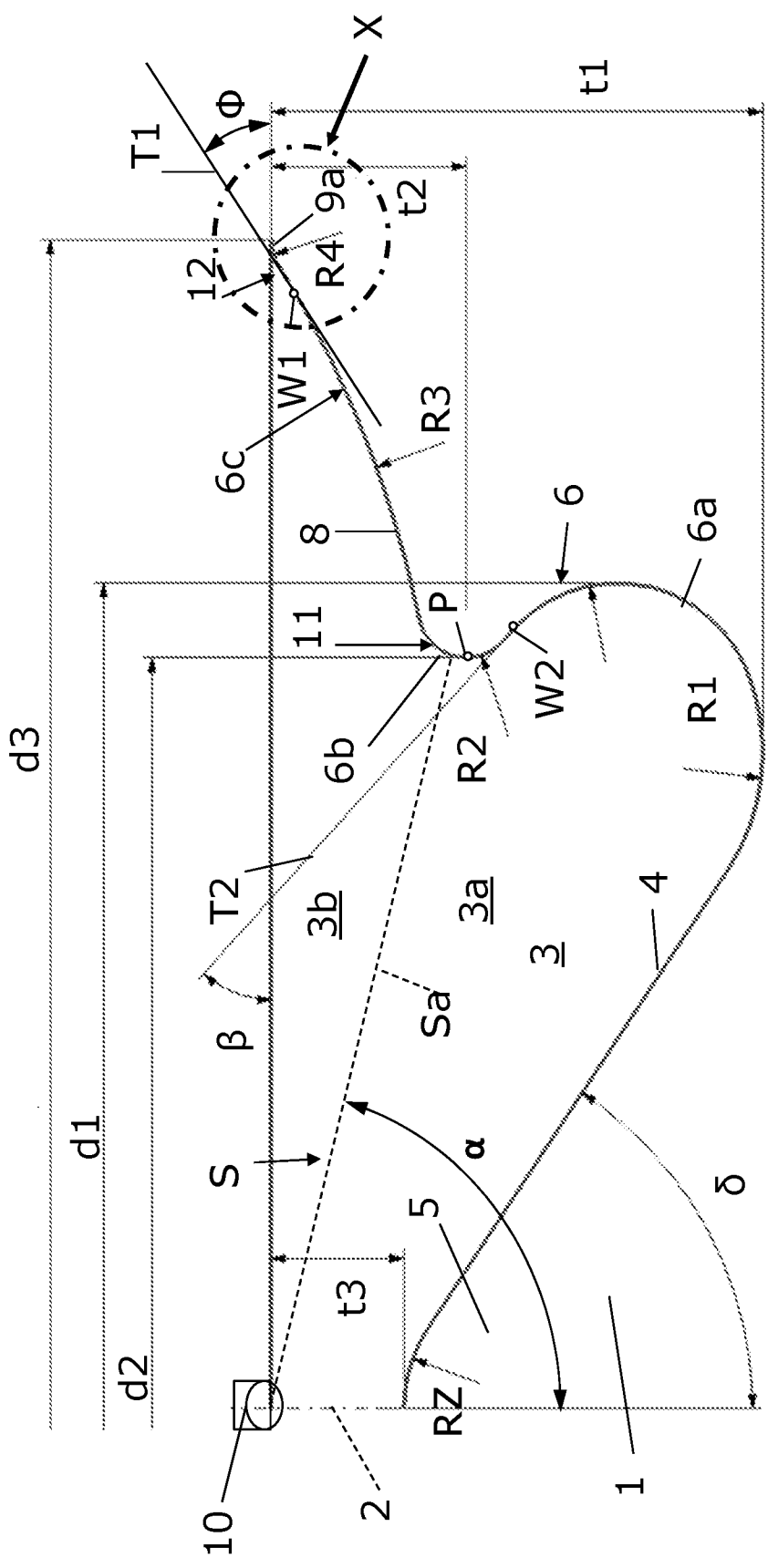


Fig. 5

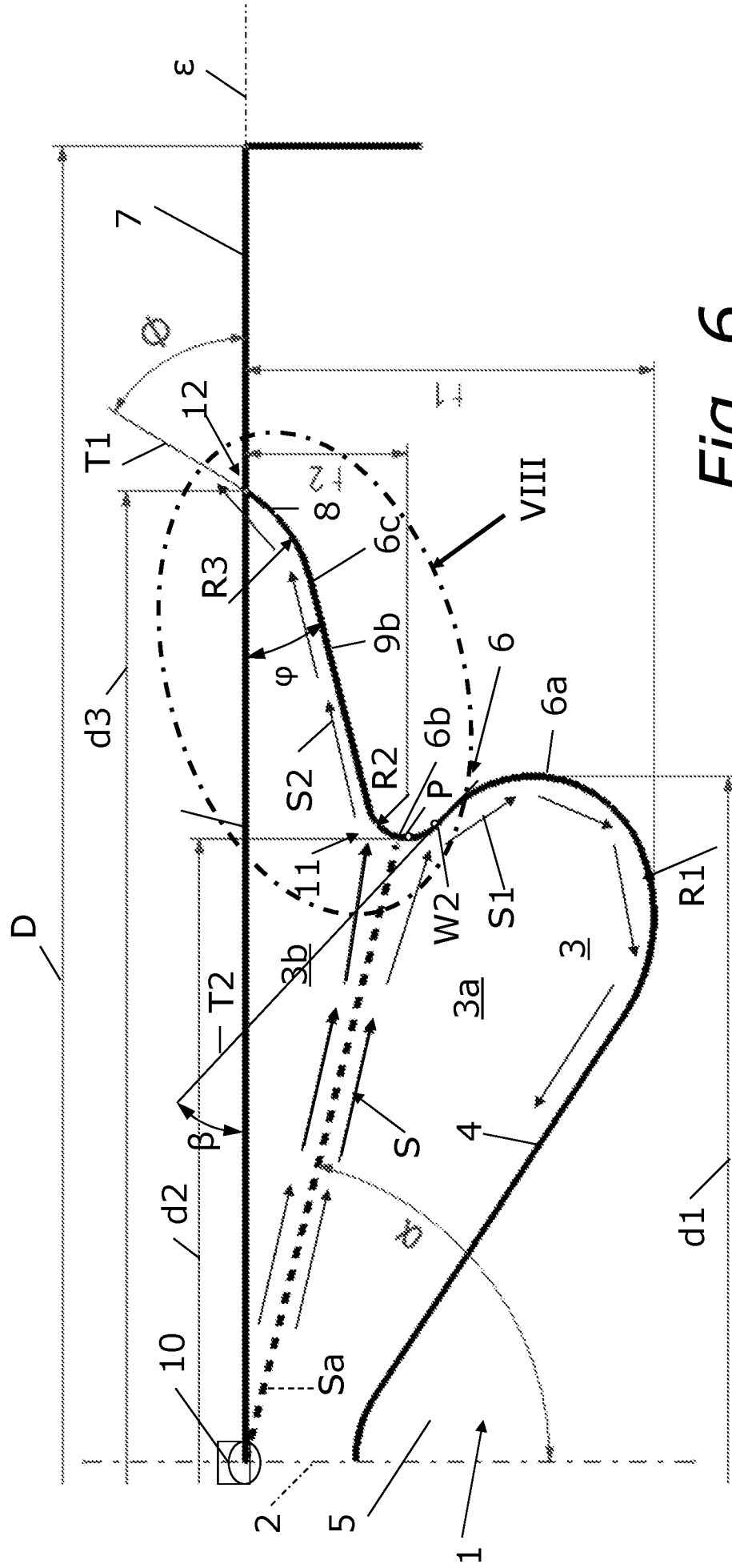


Fig. 6

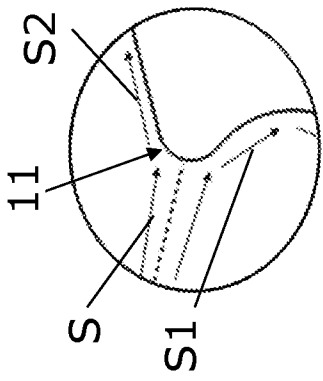


Fig. 7a

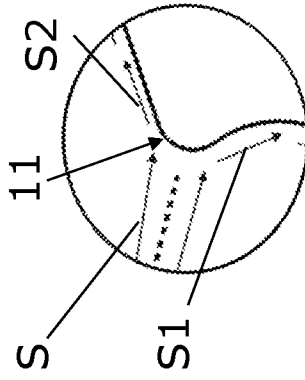


Fig. 7b

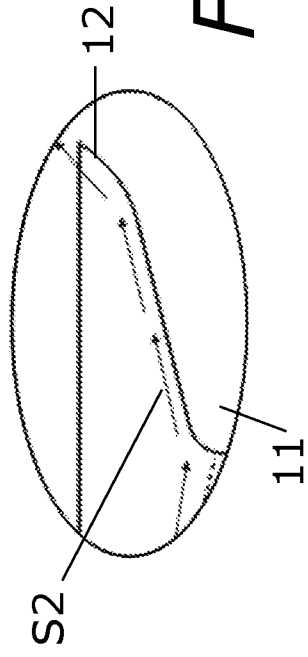


Fig. 8a

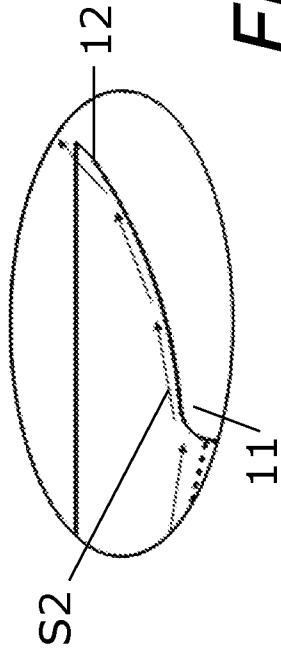


Fig. 8b

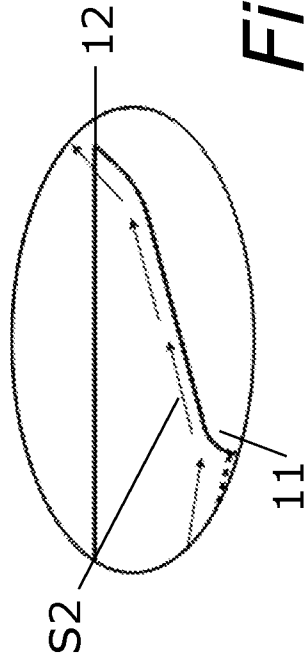


Fig. 8c

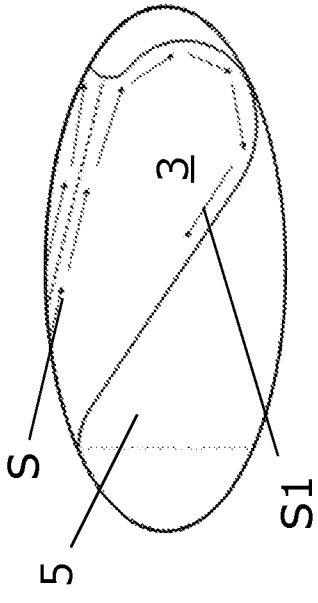


Fig. 9a

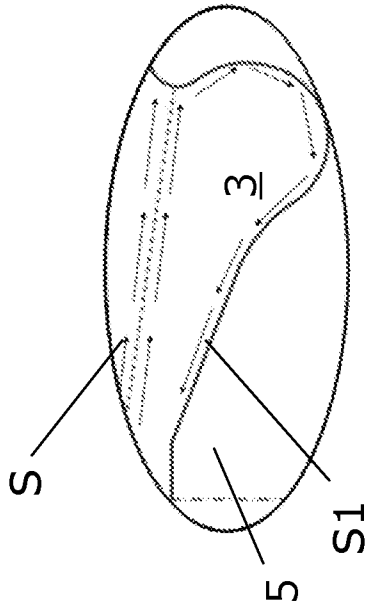


Fig. 9b

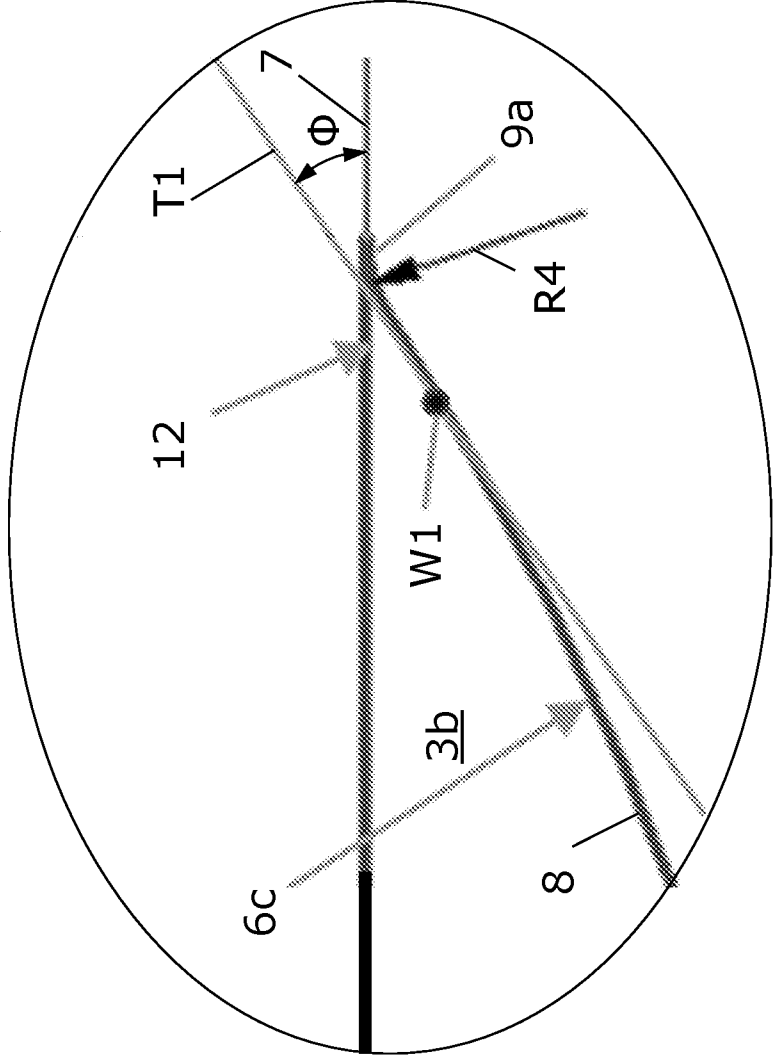


Fig. 10

(neue) PATENTANSPRÜCHE

1. Verbrennungssystem für eine luftverdichtende Brennkraftmaschine mit zumindest einem hin- und hergehenden Kolben (1) mit einer zu einer Kolbenachse (2) im Wesentlichen rotationssymmetrischen Brennraummulde (3), welche einen Muldenboden (4), der eine maximale Muldentiefe (t_1) aufweist, mit einer im Wesentlichen konusartigen oder kuppelartigen Erhebung (5) und eine umlaufende Muldenwand (6) aufweist, wobei die Muldenwand (6) einen an den Muldenboden (4) anschließenden, im Wesentlichen torusartigen ersten Abschnitt (6a) mit einem maximalen inneren ersten Muldendurchmesser (d_1), daran anschließend einen – vorzugsweise eine Einschnürung ausbildenden - zweiten Abschnitt (6b) mit einem minimalen inneren zweiten Muldendurchmesser (d_2), welcher kleiner oder gleich ist als der innere erste Muldendurchmesser (d_1), und daran anschließend einen einen Muldenrandbereich (12) bildenden dritten Abschnitt (6c) mit einem maximalen dritten Muldendurchmesser (d_3) ausbildet, wobei – in einem Meridianschnitt des Kolbens (1) betrachtet – der erste Abschnitt (6a) einen konkaven ersten Krümmungsradius (R_1) und der zweite Abschnitt (6b) einen konvexen zweiten Krümmungsradius (R_2) aufweist, und wobei der dritte Abschnitt (6c) zumindest eine an den zweiten Abschnitt (6b) direkt oder indirekt anschließende und geneigt zu einer Normalebene (ϵ) auf die Kolbenachse (2) angeordnete zumindest im Wesentlichen konkave Ringfläche (8) ausbildet, wobei insbesondere die konkave Ringfläche (8) ab einem ersten Wendepunkt (W_1) in eine konvexe Ringfläche (9a) übergeht, die im Bereich einer Kolbenstirnfläche (7) ausgebildet ist, wobei
 - der zweite Muldendurchmesser (d_2) mindestens 88% und maximal 100%, vorzugsweise mindestens 90% und maximal 96%, des ersten Muldendurchmesser (d_1) beträgt,
 - der dritte Muldendurchmesser (d_3) mindestens 120% und maximal 190%, vorzugsweise mindestens 125% und maximal 150%, des ersten Muldendurchmesser (d_1) beträgt,
 - die maximale Muldentiefe (t_1) mindestens 22% und maximal 35%, vorzugsweise mindestens 25% und maximal 30%, des ersten Muldendurchmesser (d_1) beträgt,
 - in einem Meridianschnitt des Kolbens (1) betrachtet – ein Punkt (P) des zweiten Abschnittes (6b) mit dem minimalen inneren zweiten Muldendurchmesser (d_2) in einem Abstand (t_2) von einer

Kolbenstirnfläche (7) entfernt angeordnet ist, welcher mindestens 7% und maximal 16%, vorzugsweise mindestens 10% und maximal 13%, des ersten Muldendurchmesser (d1) beträgt,

dadurch gekennzeichnet, dass

- die Brennkraftmaschine ein Kompressionsverhältnis (CR) von mindestens 17,5:1 und maximal 25:1, vorzugsweise mindestens 20,1:1 und maximal 23,1:1, aufweist;
 - der erste Muldendurchmesser (d1) mindestens 48% und maximal 62%, vorzugsweise mindestens 50% und maximal 55%, eines maximalen Durchmessers (D) des Kolbens (1) beträgt;
 - im Meridianschnitt des Kolbens (1) betrachtet – eine erste Tangente (T1) auf die konkave Ringfläche (8) mit der Kolbenstirnfläche (7) einen ersten Winkel (Φ) von mindestens 40° und maximal 60°, einschließt, wobei
 - i. – im Falle einer sich mit der Kolbenstirnfläche schneidenden konkaven Ringfläche (8) - die erste Tangente (T1) im Schnittpunkt der konkaven Ringfläche (8) mit der Kolbenstirnfläche (7) oder
 - im Falle einer konkaven Ringfläche (8) mit einer radial außerhalb anschließenden konvexen Ringfläche (9a) – die erste Tangente (T1) in einem ersten Wendepunkt (W1) zwischen der konkaven Ringfläche (8) und der konvexen Ringfläche (9a) definiert ist, und dass
 - die Brennkraftmaschine eine drallbildende Einlassstruktur aufweist, welche ausgebildet ist, um im Brennraum eine Strömung mit einer Drallzahl um die Kolbenachse von mindestens 1 zu erzeugen.
2. Verbrennungssystem nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass im Bereich der Kolbenachse (2) eine Einspritzeinrichtung (10) so angeordnet ist, dass zumindest ein Kraftstoffstrahl (S) in zumindest einer Hubstellung des Kolbens (1) auf den zweiten Abschnitt (6b) trifft und der Kraftstoffstrahl (S) durch den zweiten Abschnitt (6b) in einen zum ersten Abschnitt (6a) gerichteten ersten Strahlteil (S1) und einen zum dritten Abschnitt (6c) gerichteten zweiten Strahlteil (S2) aufteilbar ist.
3. Verbrennungssystem nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass - in einem Meridianschnitt des sich im oberen Totpunkt befindenden Kolbens (1) betrachtet - zumindest eine Strahlachse (Sa) der Einspritzeinrichtung

(10) die Kolbenmulde (3) in einen an den Muldenboden (4) des Kolbens (1) grenzenden unteren Bereich (3a) und einen daran in Richtung der Brennraumdecke anschließenden oberen Bereich (3b) unterteilt, wobei der untere Bereich (3a) etwa 54 bis 62%, vorzugsweise 56% und der obere Bereich (3b) etwa 38 bis 46%, vorzugsweise 44%, der gesamten Brennraummulde (3) beträgt.

4. Verbrennungssystem nach Anspruch 2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Einspritzeinrichtung (10) mindestens 7 und maximal 12, vorzugsweise 8, Einspritzöffnungen aufweist.
5. Verbrennungssystem nach einem der Ansprüche 2 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass - in einem Meridianschnitt des sich im oberen Totpunkt befindenden Kolbens (1) betrachtet - zumindest eine Strahlachse (Sa) der Einspritzeinrichtung (10) mit der Kolbenachse (2) einen Kraftstoffsprühkegelwinkel

$$\alpha = \tan^{-1}(d_2/(2 \cdot t_2)) \pm 3^\circ - \text{vorzugsweise } \pm 1,5^\circ -$$

einschließt, wobei d_2 der zweite Muldendurchmesser und t_2 der Abstand des Punktes (P) des zweiten Abschnittes (6b) mit dem zweiten Muldendurchmesser (d_2) von der Kolbenstirnfläche (7) ist.

6. Verbrennungssystem nach einem der Ansprüche 2 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Kraftstoffsprühkegelwinkel (α) zwischen 70° und 80° beträgt.
7. Verbrennungssystem nach einem der Ansprüche 2 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Einspritzdauer mindestens 12° und maximal 22° , vorzugsweise mindestens 14° und maximal 20° , Kurbelwinkel (CA) beträgt.
8. Verbrennungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Brennkraftmaschine eine Einlasskanalstruktur aufweist, welche ausgebildet ist, um eine Strömung im Brennraum mit einer Drallzahl um die Kolbenachse (2) von maximal 2 zu erzeugen.
9. Verbrennungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass - bezogen auf einen größten Durchmesser (D) des Kolbens (1) - der erste Krümmungsradius (R1) $0,06 \pm 50\%$ beträgt.
10. Verbrennungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass - bezogen auf einen größten Durchmesser (D) des Kolbens (1) - der zweite Krümmungsradius (R2) $0,02 \pm 50\%$ beträgt.

11. Brennkraftmaschine mit einem Verbrennungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 10.

14.07.2022

Fu/iv