

Patentschrift

(21)

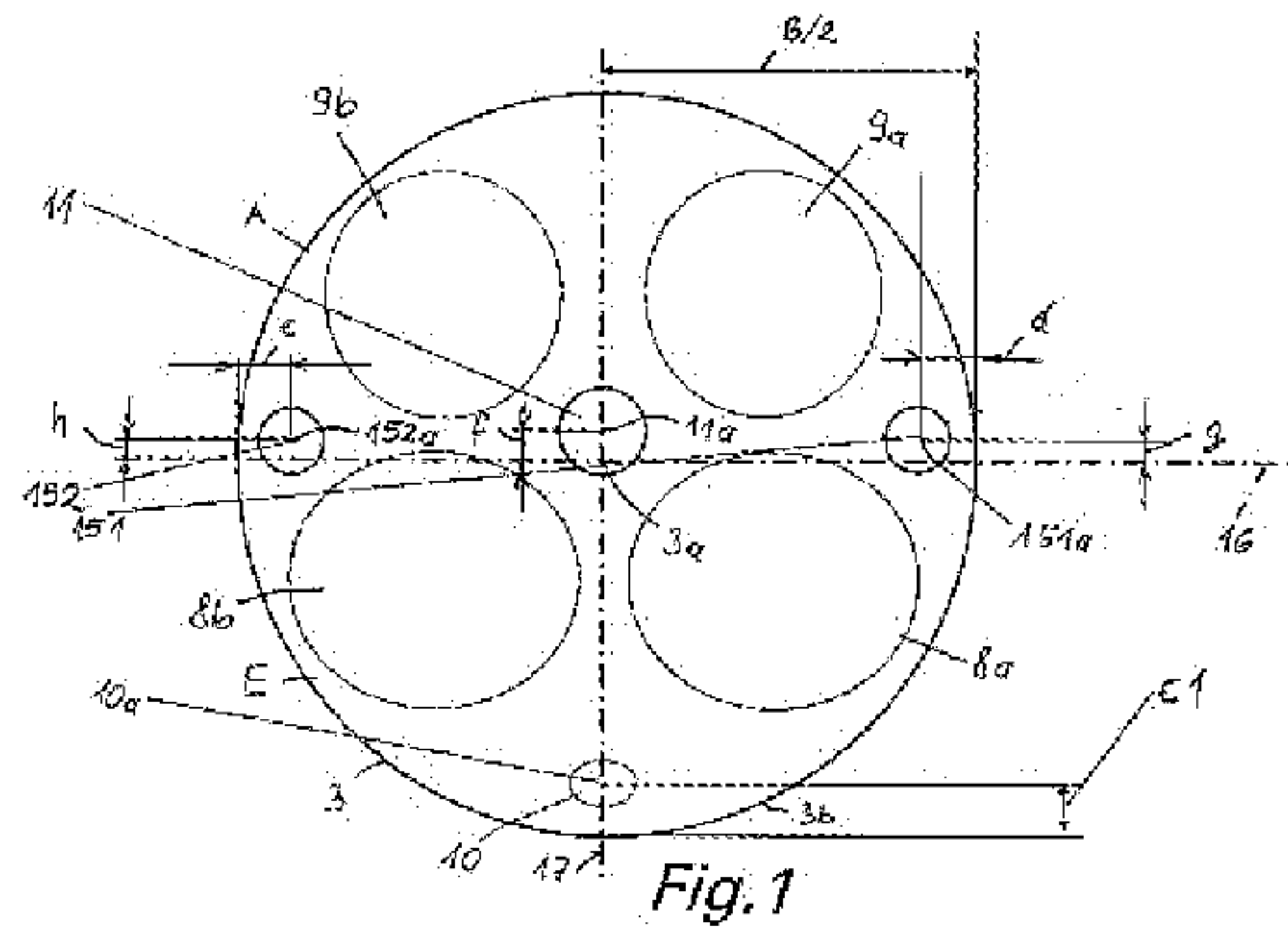
(51)

(56)

(73)

(54)

(57)



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Brennkraftmaschine mit einem Zylinderkopf mit einer Vorkammer pro Zylinder, die über zumindest eine Überströmöffnung mit einem Brennraum strömungsverbunden ist, wobei eine erste Zündquelle in die Vorkammer und eine zweite Zündquelle außerhalb der Vorkammer in den Brennraum einmündet, wobei eine dritte Zündquelle außerhalb der Vorkammer in den Brennraum einmündet. Weiters betrifft die Erfindung ein Verfahren zum Betreiben einer Brennkraftmaschine mit einem Zylinderkopf mit einer Vorkammer pro Zylinder, die über zumindest eine Überströmöffnung mit einem Brennraum strömungsverbunden ist, wobei Kraftstoff-/Luftgemisch über eine in der Vorkammer mündende erste Zündquelle und über zumindest eine außerhalb der Vorkammer in den Brennraum einmündende zweite Zündquelle gezündet wird, wobei das in der Vorkammer gezündete Kraftstoff-/Luftgemisch als Brennfackel über die zumindest eine Überströmöffnung in den Brennraum strömt.

[0002] Fremdgezündete Brennkraftmaschinen mit drei oder mehr Zündkerzen pro Zylinder sind beispielsweise aus den Druckschriften DE 103 44 215, EP 0 449 308 B1, WO 2006/111908 A2 bekannt. Der Kraftstoff wird dabei bei der EP 0 449 308 B1 und der WO 2006/111908 A2 in das Ansaugrohr eingespritzt.

[0003] Die DE 1 054 778 B beschreibt eine Brennkraftmaschine mit einer mit einem Brennraum eines Zylinders verbundenen Vorkammer, wobei in die Vorkammer eine erste Zündeinrichtung einmündet. In den Hauptbrennraum münden weiters eine zweite Zündeinrichtung und eine dritte Zündeinrichtung ein. Sowohl die Vorkammer als auch die zweite und dritte Zündeinrichtungen sind seitlich im Bereich des Zylinderrandes des Zylinders angeordnet.

[0004] Die US 8 006 666 B2 offenbart eine Brennkraftmaschine mit einer mit einem Brennraum verbundenen Vorkammer, in welche eine erste Zündeinrichtung und eine Einspritzeinrichtung einmünden. Solche Vorkammern werden auch als aktive Vorkammern bezeichnet. Eine zweite Zündeinrichtung mündet auch in den Brennraum. In einer Ausführungsvariante, bei der die Vorkammer seitlich angeordnet ist, mündet weiters eine dritte Zündeinrichtung in den Brennraum.

[0005] Die EP 3 453 856 A1 zeigt eine Brennkraftmaschine mit einer zentral in den Brennraum mündenden Vorkammer, in welche eine erste Zündeinrichtung einmündet, wobei eine zweite Zündeinrichtung seitlich in den Hauptbrennraum mündet.

[0006] Die JP 2007-170310 A offenbart eine Brennkraftmaschine mit einer seitlich in einen Brennraum mündenden Vorkammer, wobei die Vorkammer über ein Hubventil mit dem Brennraum strömungsverbindbar ist. Die Vorkammer weist eine erste Zündeinrichtung auf. In den Brennraum mündet weiters eine seitlich angeordnete zweite Zündeinrichtung.

[0007] Die DE 199 46 644 A1 beschreibt eine Otto-Brennkraftmaschine mit Schichtladung und Kraftstoffdirekteinspritzung in einen neben dem Zylinderraum angeordneten Nebenraum, der durch ein stehendes Auslassventil nach unten begrenzt wird. Oberhalb des Auslassventils münden eine Einspritzdüse sowie ein Heizelement in den Nebenraum ein. Zwischen dem Auslassventil und dem Kolben sind drei Zündkerzen im Bereich des Überganges vom Nebenraum in den Zylinderraum nebeneinander platziert. Von diesen sind zwei Zündkerzen zwischen Auslassventil und Zylinder so nebeneinander angeordnet, dass die den Zündkerzen gegenüberliegende Einspritzdüse immer in deren Richtung einspritzt, sodass in deren Bereich immer ein zündfähiges Gemisch vorhanden ist. Die dritte Zündkerze ist zwischen den Einlassventilen in Zylindermitte und der Einspritzeinrichtung der Einspritzdüse angeordnet, um die Flammausbreitung und die Abgasrückführungsverträglichkeit und die Abmagerung des Gemisches zu erhöhen.

[0008] Aus der US 2017/089252 A1 ist eine Brennkraftmaschine mit einem Zylinderkopf bekannt, in welchem eine in eine Brennkammer mündende Vorkammer angeordnet ist. Sowohl in den Brennraum, als auch in die Vorkammer mündet jeweils eine Zündkerze. Weiters mündet in die Vorkammer eine Einspritzeinrichtung.

[0009] Die Veröffentlichungen DE 10 2017 125 946 A1, US 2017/089252 A1, WO 14/117177 A1, WO 07/118068 A2, US 8,006,666 B2, US 6,055,954 A, US 6,095,111 A offenbaren ähnliche Zy-

linderköpfe mit zwei Zündkerzen, von denen jeweils eine in einer Vorkammer und die zweite außerhalb der Vorkammer angeordnet ist.

[0010] Weiters zeigt die US 6,948,474 B2 eine Brennkraftmaschine mit einem Zylinderkopf mit einer seitlich im Zylinder angeordneten Einspritzeinrichtung und einer zentral im Bereich der Zylinderachse angeordneten Zündkerze. Der Vorteil einer Vorkammerzündung ist, dass bei insbesondere hohen Motorlasten durch das Ausströmen von Brennfackeln aus der Vorkammer in den Hauptbrennraum das Gemisch im Hauptbrennraum sehr schnell entzündet wird. Es kommt zu einer schnellen Flammenausbreitung insbesondere in nahe am Brennraumrand liegende Zonen. Insbesondere im Bereich des Brennraumrandes am Zylinderumfang kommt es zu Klopferscheinungen, wenn sich das durch die Verbrennung verdichtete Gemisch selbst entzündet.

[0011] Als Brennfackeln werden entflammte Gemischteile bezeichnet, welche durch die Überströmöffnungen von der Vorkammer in den Brennraum strömen.

[0012] Der Nachteil einer Vorkammerzündung - insbesondere bei einer passiven Vorkammer - ist an sich, dass bei kleinen Motorlasten, im Start und im Katheizmodus die Verbrennung instabil ist. Bei niedrigen Lasten ist die Turbulenz in der Vorkammer, sowie die absolute Ladungsmasse relativ niedrig, der Restgasgehalt in der Vorkammer ist relativ hoch. Dadurch wird das Entflammen in der Vorkammer und das Ausströmen der Brennfackeln aus der Vorkammer erschwert. Im Start- und Katheizmodus wird zur Erzielung von hohen Abgastemperaturen ein später Zündwinkel eingestellt. Auch bei späten Zündwinkeln ist das Ausströmen der Brennfackeln aus der Vorkammer erschwert.

[0013] Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung mit geringem Aufwand die Verbrennung zu verbessern, Klopfen zu vermeiden und die Emissionen zu verringern.

[0014] Erfindungsgemäß wird dies dadurch erreicht, dass die Vorkammer in einem zentralen Bereich des Brennraumes, vorzugsweise im Bereich einer Zylinderachse des Zylinders, angeordnet ist.

[0015] Dadurch wird die Entflammung des Kraftstoff-Luftgemisches im Brennraum wesentlich verbessert. Insbesondere kann durch die Anordnung der Vorkammer im zentralen Bereich des Brennraumes eine rasche Verbrennung und eine platzsparende Anordnung erreicht werden.

[0016] In einer Ausführungsvariante der Erfindung mündet zumindest eine Einspritzeinrichtung für Kraftstoff seitlich in den Brennraum ein. Der Abstand der Mündung der Einspritzeinrichtung vom Brennraumrand ist dabei kleiner als 0,3mal dem Bohrungshalbmesser des Zylinders, vorzugsweise kleiner als 0,25-mal dem Bohrungshalbmesser, besonders vorzugsweise kleiner als 0,2-mal dem Bohrungshalbmesser.

[0017] In einer weiteren Ausführungsvariante der Erfindung mündet zumindest eine Einspritzeinrichtung für Kraftstoff in einem zentralen Bereich, vorzugsweise im Bereich der Zylinderachse des Zylinders, in den Brennraum ein. Die Mündung der Einspritzeinrichtung weist dabei einen Abstand von der Zylinderachse auf, der geringer ist als 0,3mal dem Bohrungshalbmesser des Zylinders, vorzugsweise geringer ist als 0,25-mal dem Bohrungshalbmesser, besonders vorzugsweise geringer ist als 0,2-mal dem Bohrungshalbmesser.

[0018] Vorzugsweise ist die Vorkammer als passive Vorkammer ausgebildet. Passive Vorkammern weisen keine Einspritzeinrichtungen auf. Bei einer passiven Vorkammerzündung gelangt das Gemisch während des Kompressionshubs durch die Überströmöffnungen in die Vorkammer und wird von der darin befindlichen Zündquelle entzündet. Im Vergleich zu einer aktiven Vorkammer, bei der ein Injektor zur Einbringung von Luft, Kraftstoff oder eines Kraftstoff-/Luftgemisches in die Vorkammer einmündet, welcher insbesondere zusätzlich zu einer in den Brennraum mündenden Haupteinspritzeinrichtung vorgesehen ist, ist eine passive Vorkammer konstruktiv einfacher und kostengünstiger, da pro Zylinder nur eine einzige Einspritzeinrichtung vorgesehen werden muss, welche direkt in den Brennraum oder in ein Ansaugrohr einmündet.

[0019] Eine konstruktiv einfache Ausführung der Erfindung sieht vor, dass die Mündung der Einspritzeinrichtung auf der Einlassseite, vorzugsweise in einer durch die Zylinderachse verlaufen-

den Motorquerebene, angeordnet ist. Die Einspritzeinrichtung ist dabei auf die Auslassseite gerichtet. Besonders platzsparend ist es, wenn die Mündung der Einspritzeinrichtung zwischen zwei Einlassventilöffnungen angeordnet ist

[0020] Vorzugsweise ist vorgesehen, dass die Mündungen der Vorkammer, der zweiten Zündquelle und der dritten Zündquelle in einer durch die Zylinderachse verlaufenden Motorlängsebene angeordnet sind. Vorzugsweise liegt die Ebene der drei Zündquellen annähernd 90° zur Strömungsrichtung des Gemisches, die vorzugsweise durch eine Tumbleströmung erzeugt wird.

[0021] Eine besonders kompakte Bauweise lässt sich erzielen, wenn die Vorkammer und die erste Zündquelle durch eine Vorkammerzündkerze gebildet sind.

[0022] Für eine rasche Verbrennung und geringe Klopfneigung ist es vorteilhaft, wenn die Einspritzeinrichtung mehrere Einspritzstrahlen aufweist, wobei - in Richtung der Zylinderachse betrachtet - zumindest zwei Einspritzstrahlen auf einen Bereich beidseits der Mündung der Vorkammer und/oder beidseits der Mündung der zweiten Zündquelle und/oder der dritten Zündquelle gerichtet sind.

[0023] Eine besonders gute Verbrennung mit niedrigen Emissionen lässt sich erreichen, wenn die Einspritzstrahlen einen definieren ersten Mindestabstand a zu den Mündungen der Vorkammer und/oder der zweiten Zündquelle und/oder zur Mündung der dritten Zündquelle aufweisen, welcher Mindestabstand 5% bis 30%, vorzugsweise 10% bis 20% des Durchmessers des Zylinders beträgt.

[0024] Die Vorkammer ist vorteilhafter Weise über zumindest zwei, vorzugsweise sechs, Überströmöffnungen für jeweils eine Brennfackel mit dem Brennraum verbunden.

[0025] Die Brennfackeln sind auf jene Orte im Brennraum ausgerichtet, die zu klopfender Verbrennung neigen. Vorzugsweise sind das zumindest die Auslass- und die Einlassseite. Weitere Brennfackeln sind auf die Seite des Brennraumes ausgerichtet. Ist eine Brennfackel direkt in Richtung der zweiten Zündquelle oder in Richtung der dritten Zündquelle ausgerichtet, so ist die Brennfackel von der zweiten Zündquelle bzw. dritten Zündquelle beabstandet um ein Beschädigen der zweiten bzw. dritten Zündquelle zu verhindern.

[0026] Die Brennfackeln sind in einem Zylinderschnitt so angeordnet, dass sie auch zu den Einlass- und Auslassventilen beabstandet sind. Der Abstand der Brennfackeln von der zweiten Zündquelle und/oder der dritten Zündquelle und zu den Einlass- und Auslassventilen beträgt mindestens 1 mm, vorzugsweise $>1,5$ mm.

[0027] Besonders vorzugsweise sind zumindest zwei Einspritzstrahlen der Einspritzeinrichtung - in einem Längsschnitt durch den Zylinder betrachtet - übereinander angeordnet.

[0028] Dadurch lässt sich ein rasches Verbrennen des Kraftstoff-/Luftgemisches erreichen.

[0029] Weiters vorteilhaft für den Brennverlauf ist es, wenn - in Richtung der Zylinderachse betrachtet - die Mitte der Mündung der zweiten Zündquelle und/oder die Mitte der Mündung der dritten Zündquelle in einer Entfernung vom Brennraumrand angeordnet ist/sind, der geringer ist als 0,3mal dem Bohrungshalbmesser des Zylinders, vorzugsweise geringer ist als 0,25-mal dem Bohrungshalbmesser, besonders vorzugsweise geringer ist als 0,2-mal dem Bohrungshalbmesser.

[0030] Gemäß einer Ausführung der Erfindung ist weiters vorgesehen, dass die Mündung der Vorkammer und die Mündung der zweiten Zündquelle und die Mündung der dritten Zündquelle an unterschiedlichen Seiten einer durch die Zylinderachse verlaufenden Motorquerebene angeordnet sind. Im vorliegenden Fall wird der Kraftstoff über die direkt in den Brennraum mündende Einspritzeinrichtung zugeführt. Zusätzlich kann eventuell noch zumindest eine Saugrohreinspritzeinrichtung vorgesehen sein.

[0031] Gemäß einer Ausführungsvariante der Erfindung beträgt das Volumen der Vorkammer maximal 2,5%, vorzugsweise maximal 2%, besonders vorzugsweise maximal 1,5% des Schadraumes des Brennraumes. Der Schadraum des Brennraumes ist das Volumen des jeweiligen

Zylinders zwischen der Brennraumdeckfläche des Zylinderkopfes und dem Kolben bei Stellung des Kolbens in seinem oberen Totpunkt.

[0032] Das Kraftstoff-/Luftgemisch wird im größten Teil des Betriebskennfeldes über eine in der Vorkammer angeordnete erste Zündquelle gezündet, wobei das in der Vorkammer gezündete Kraftstoff-/Luftgemisch als Brennfackel über die zumindest eine Überströmöffnung in den Brennraum strömt.

[0033] In bestimmten Betriebsbereichen - vorzugsweise Kaltstart, Niedriglast und Katheizbetrieb, aber auch in Bereichen mit hohem Restgasgehalt oder hoher Verdünnung im Zylinder - wird das Gemisch auch über die außerhalb der Vorkammer in den Brennraum einmündende zweite und dritte Zündquelle gezündet.

[0034] Der Kraftstoff wird über die - bevorzugt seitlich direkt in den Brennraum mündende - Einspritzeinrichtung in den Brennraum eingespritzt, vermischt sich dort mit der während des Einlasstaktes dem Brennraum zugeführten Luft. Während des Kompressionshubes strömt das Kraftstoff-Luftgemisch vom Brennraum in die Vorkammer. Alternativ zu einer direkten Einspritzung in den Brennraum kann auch eine Einspritzung des Kraftstoffes in das Saugrohr erfolgen.

[0035] Gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren ist vorgesehen, dass

[0036] -in einem ersten Betriebsbereich das Kraftstoff-/Luftgemisch durch die zweite Zündquelle und die dritte Zündquelle im Brennraum gezündet wird, und

[0037] -in einem zweiten Betriebsbereich das Kraftstoff-/Luftgemisch durch die erste Zündquelle in der Vorkammer gezündet wird, und

[0038] -in einem dritten Betriebsbereich das Kraftstoff-/Luftgemisch in der Vorkammer und das Kraftstoff-/Luftgemisch im Brennraum gleichzeitig oder nacheinander durch die erste Zündquelle in der Vorkammer und durch die zweite Zündquelle und die dritte Zündquelle im Brennraum gezündet werden.

[0039] Eine Ausführungsvariante der Erfindung sieht vor, dass der erste Betriebsbereich dem Kaltstart und/oder dem Katalysatorheizbetrieb und/ oder dem Leerlaufbereich zugeordnet wird.

[0040] Weiters kann vorgesehen sein, dass der zweite Betriebsbereich dem oberen Teillastbereich und/oder dem Vollastbereich zugeordnet wird.

[0041] Vorzugsweise wird der dritte Betriebsbereich dem Leerlaufbereich und/oder einem vorzugsweise leerlaufnahen Teillastbereich und/oder einem Bereich mit hohem Restgasgehalt bzw. hoher Verdünnung zugeordnet.

[0042] Gemäß einer Ausführungsvariante der Erfindung werden im dritten Betriebsbereich das Kraftstoff-/Luftgemisch in der Vorkammer und das Kraftstoff-/Luftgemisch im Brennraum gleichzeitig durch die erste Zündquelle in der Vorkammer und durch die zweite Zündquelle und die dritte Zündquelle im Brennraum gezündet.

[0043] Alternativ dazu vorgesehen sein, dass im dritten Betriebsbereich das Kraftstoff- /Luftgemisch in der Vorkammer und das Kraftstoff-/Luftgemisch im Brennraum nacheinander durch die erste Zündquelle in der Vorkammer und durch die zweite Zündquelle und die dritte Zündquelle im Brennraum gezündet werden, wobei vorzugsweise die erste Zündquelle bis zu 10° Kurbelwinkel, besonders vorzugsweise bis zu 5° Kurbelwinkel, vor der zweiten Zündquelle und/oder der dritten Zündquelle zündet.

[0044] Die zweite Zündquelle und die dritte Zündquelle werden vorteilhafter Weise - insbesondere bei der Verwendung von externer Abgasrückführung - zur Unterstützung der Entflammung verwendet.

[0045] Durch die seitlich angeordneten zweiten und dritten Zündquellen und die in der Vorkammer angeordnete erste Zündkerze ist ein besonders stabiler und schneller Brennverlauf zu erzielen.

[0046] Die Erfindung wird im Folgenden anhand der in den Figuren gezeigten nicht einschrän-

kenden Ausführungsbeispiele näher erläutert. Darin zeigen:

- [0047]** Fig. 1 eine erfindungsgemäße Brennkraftmaschine in einem Schnitt gemäß der Linie III - III in Fig. 2 in einer Ausführungsvariante,
- [0048]** Fig. 2 die Brennkraftmaschine in einer ersten Ausführungsvariante während der Kraftstoffeinspritzung in einem Schnitt gemäß der Linie II - II in Fig. 3,
- [0049]** Fig. 3 diese Brennkraftmaschine in einer ersten Ausführungsvariante in einem Schnitt gemäß der Linien III - III in Fig. 2,
- [0050]** Fig. 4 die Brennkraftmaschine in einer zweiten Ausführungsvariante in einem Schnitt analog zu Fig. 3,
- [0051]** Fig. 5 diese Brennkraftmaschine in einem Schnitt analog zu Fig. 2 während einer Verbrennungsphase,
- [0052]** Fig. 6 diese Brennkraftmaschine in einem Schnitt analog zu Fig. 3 oder 4 während dieser Verbrennungsphase,
- [0053]** Fig. 7 eine erfindungsgemäße Brennkraftmaschine in einem Schnitt analog zu Fig. 1 in einer weiteren Ausführungsvariante,
- [0054]** Fig. 8 diese Brennkraftmaschine in einem Schnitt gemäß der Linie VIII - VIII in Fig. 9 während einer Verbrennungsphase,
- [0055]** Fig. 9 diese Brennkraftmaschine in einem Schnitt gemäß der Linie IX-IX in Fig. 8, mit eingezeichneten Brennfackeln und Einspritzstrahlaufteilung,
- [0056]** Fig. 10 diese Brennkraftmaschine in einem Schnitt analog zu Fig. 9 mit eingezeichneten Brennfackeln und alternativer Einspritzstrahlaufteilung,
- [0057]** Fig. 11 ein Last-Drehzahl Kennfeld der erfindungsgemäßen Brennkraftmaschine für geringen Restgasgehalt,
- [0058]** Fig. 12 ein Last-Drehzahl Kennfeld der erfindungsgemäßen Brennkraftmaschine für hohen Restgasgehalt,
- [0059]** Fig. 13 eine Vorkammerzündkerze der erfindungsgemäßen Brennkraftmaschine in einer Ausführungsvariante in einem Längsschnitt,
- [0060]** Fig. 14 das Detail XIV aus Fig. 13,
- [0061]** Fig. 15 eine Vorkammerzündkerze in einer weiteren Ausführungsvariante in einem Längsschnitt,
- [0062]** Fig. 16 diese Vorkammerzündkerze in einem Schnitt gemäß der Linie XVI - XVI in Fig. 15 und
- [0063]** Fig. 17 diese Vorkammerzündkerze in einer axonometrischen Kerndarstellung.
- [0064]** Gleiche Teile sind in den Ausführungsvarianten mit gleichen Bezugszeichen versehen.
- [0065]** Die Brennkraftmaschine 1 weist in den in Fig. 1 bis 10 dargestellten Ausführungsvarianten jeweils einen Zylinderkopf 2 für zumindest einen Zylinder 3 auf, in welche ein hin- und hergehender Kolben 4 angeordnet ist. Der Zylinderkopf 2 bildet eine dachförmige Brennraumdeckfläche 5 aus, welche zusammen mit der eine Kolbenmulde 6a ausbildenden Kolbenoberfläche 6 einen Brennraum 7 begrenzt. In der Brennraumdeckfläche 5 sind auf einer Einlassseite E zwei Einlassventilöffnungen 8a, 8b für Einlasskanäle und auf einer Auslassseite A zwei Auslassventilöffnungen 9a, 9b für Auslasskanäle angeordnet.
- [0066]** In den in Fig. 1 bis 6 gezeigten Ausführungsvarianten ist im Zylinderkopf 2 seitlich eine Einspritzeinrichtung 10 zur direkten Kraftstoffeinspritzung in den Brennraum 7 angeordnet. Weiters mündet in einen zentralen Bereich des Brennraumes 7 eine passive Vorkammer 11 ein, wobei die Vorkammer 11 eine erste Zündquelle 13 aufweist. Passive Vorkammern 11 weisen keine

Einspritzeinrichtung, sondern nur eine Zündquelle auf.

[0067] Die Ausführungsvarianten der Fig. 7 bis 10 unterscheidet sich davon durch eine zentral angeordnete Einspritzeinrichtung 10. In den Fig. 9 und 10 sind die Verteilungen der Brennfackeln 19 und der Einspritzstrahlen 18 eingezeichnet.

[0068] Die Vorkammer 11 ist in den dargestellten Ausführungsbeispielen über mehrere - insbesondere sechs sternartig angeordnete (siehe Fig. 6, 9, 10) - Überströmöffnungen 14 mit dem Brennraum 7 strömungsverbunden.

[0069] In den dargestellten Ausführungsbeispielen ist die Vorkammer 11 und die erste Zündquelle 13 als Vorkammerzündkerze 12 ausgebildet.

[0070] Weiters mündet in den Brennraum 7 eine zweite Zündquelle 151 und eine dritte Zündquelle 152 ein, welche bevorzugt durch eine Standardzündkerze gebildet sein können.

[0071] Die Vorkammer 11 ist zentral in der Brennraumdeckfläche 5 unmittelbar im Bereich der Zylinderachse 3a an verschiedenen Seiten einer durch die Zylinderachse 3a verlaufenden Motorlängsebene 16 angeordnet, welche die Einlassseite E von der Auslassseite A trennt. Die Mündungen 10a, 11a der Einspritzeinrichtung 10 und der Vorkammer 11 sind in einer durch die Zylinderachse 3a verlaufenden Motorquerebene 17 angeordnet, welche normal zur Motorlängsebene 16 ausgebildet ist.

[0072] Die Mündung 10a der Einspritzeinrichtung 10 befindet sich in der in den Fig. 1 bis 6 dargestellten Ausführungsvariante nahe dem Zylinderrand 3b seitlich in der Brennraumdeckfläche 5 zwischen den zwei Einlassventilöffnungen 8a, 8b. Die Mündung 10a der Einspritzeinrichtung 10 weist einen Abstand c_1 vom Brennraumrand 3b auf, der geringer ist 0,2-mal dem Bohrungshalbmesser $B/2$. Die Mündung 10a der Einspritzeinrichtung 10 weist dabei eine Vielzahl an Einspritzöffnungen 14 auf.

[0073] Die Mündungen 151a, 152a der zweiten Zündquelle 151 und der dritten Zündquelle 152 sind im Bereich der durch die Zylinderachse 3a verlaufenden Motorlängsebene 16 ausgebildet. Die Anordnung der Zündquellen 13, 151, 152 im Bereich der Motorlängsebene 16 hat insbesondere bei einer im Brennraum 7 ausgeprägten Tumbleströmung, welche um eine in der Motorlängsebene 16 liegenden Tumbleachse rotiert, die etwa normal zur Motorquerebene 17 verläuft, den Vorteil, dass die Zündquellen 13, 151, 152 etwa normal zur Tumbleachse stehen. Die Tumbleströmung verläuft dabei im Brennraum 7 auf der Einlassseite E in Richtung der Brennraumdeckfläche 5 (nach „oben“) und auf der Auslassseite A von der Brennraumdeckfläche 5 weg (nach „unten“).

[0074] Bei den in Fig. 7 bis 10 dargestellten Ausführungsvarianten ist die Mündung 10a der Einspritzeinrichtung 10 in einem zentralen Bereich k der Brennraumdecke 5 im Bereich der der Zylinderachse 3a zwischen den zwei Einlassventilöffnungen 8a, 8b angeordnet. Die Mündung 10a der Einspritzeinrichtung 10 weist dabei einen Abstand c_2 von der Zylinderachse 3a des Zylinders 3 auf, der geringer ist als 0,3mal dem Bohrungshalbmesser $B/2$ des Zylinders 3, vorzugsweise geringer ist als 0,25-mal dem Bohrungshalbmesser $B/2$, besonders vorzugsweise geringer ist als 0,2-mal dem Bohrungshalbmesser $B/2$.

[0075] Die Mitte der Mündung 11a der Vorkammer ist in einem zentralen Bereich k des Brennraumes 7 angeordnet. Der zentrale Bereich k ist dabei - in Richtung der Zylinderachse 3a betrachtet - durch einen Kreis um die Zylinderachse 3a definiert, dessen Radius beispielsweise der minimalen Entfernung der Einlassventilöffnungen 8a, 8b und/oder Auslassventilöffnungen 9a, 9b von der Zylinderachse 3a entspricht. Der Kreis k liegt also zwischen der Zylinderachse 3a und den Einlassventilöffnungen 8a, 8b und Auslassventilöffnungen 9a, 9b (siehe Fig. 3, 4, 6, 8).

[0076] Der Abstand f zwischen der Mitte der Mündung 11a der Vorkammer 11 und der Motorlängsebene 16 ist dabei bevorzugt kleiner als 0,2-mal dem halben Bohrungsdurchmesser B des Zylinders 3. Ebenso beträgt der Abstand g zwischen der Mitte der Mündung 151a der zweiten Zündquelle 151 und der Motorlängsebene 16, sowie der Abstand h zwischen der Mitte der Mündung 152a der dritten Zündquelle 152 und der Motorlängsebene 16 bevorzugt weniger als 0,2-

mal dem halben Bohrungsdurchmesser B (Fig. 7).

[0077] Bei den in den Fig. 9 und 10 gezeigten Ausführungsvarianten sind die zweite Zündquelle 152 und die dritte Zündquelle 152 in der Motorlängsebene 16 angeordnet. Auch die Mündung 11a der Vorkammer 11 ist in der Motorlängsebene 16 oder unmittelbar neben der Motorlängsebene 16 angeordnet.

[0078] Die Figuren 1 bis 10 zeigen Ausführungsvarianten der Erfindung, bei denen jeweils die Mündung 11a der Vorkammer 11 und die Mündung 10a der Einspritzeinrichtung 10 im Bereich der Motorquerebene 17 angeordnet sind, und bei denen jeweils die Mündung 11a der Vorkammer 11, die Mündung 151a der zweiten Zündquelle 151 und die Mündung 152a der dritten Zündquelle 152 im Bereich der Motorlängsebene 16 angeordnet ist. Die Mündung 151a der zweiten Zündquelle 151 und die Mündung 152a der dritten Zündquelle 152 sind im Bereich eines zylindernahen Brennraumrandes 3b in der Brennraumdeckfläche 5 angeordnet, wobei der Abstand d zwischen der Mitte der Mündung 151a der zweiten Zündquelle 151 und der Motorlängsebene 16 und/oder der Abstand e zwischen der Mitte der Mündung 152a der dritten Zündquelle 152 vom Brennraumrand 3b bevorzugt weniger als 0,2-mal dem halben Bohrungsdurchmesser B beträgt.

[0079] Durch die Einspritzeinrichtung 10 wird Kraftstoff in Richtung der Kolbenmulde 6a des Kolbens 4 in mehreren Einspritzstrahlen 18 eingespritzt. In Richtung der Zylinderachse 3a betrachtet, sind in den in Fig. 3 und 9 dargestellten Ausführungsvarianten der Erfindung zumindest zwei Einspritzstrahlen 18 auf einen Bereich beidseits der Mündung 11a der Vorkammer 11 gerichtet. In der in Fig. 4 und 10 dargestellten Ausführungsvariante ist ein Einspritzstrahl 18 auf einen Bereich in Richtung der Mündung 11a der Vorkammer 11 gerichtet. Die Einspritzstrahlen 18 weisen einen definierten ersten Mindestabstand a (Fig. 2) zur Mündung 11a der Vorkammer 11 auf, welcher erste Mindestabstand a zwischen 5% und 20% des Bohrungsdurchmessers B des Zylinders 3 beträgt.

[0080] Aus den Fig. 5 und 6, sowie 8 bis 10 geht deutlich hervor, dass die Vorkammer 11 über zumindest zwei Überströmöffnungen 14 für jeweils eine Brennfackel 19 mit dem Brennraum 7 verbunden ist. In Richtung der Zylinderachse 3a betrachtet kann zumindest eine Brennfackel 19 auf den Bereich der zweiten Zündquelle 151 oder der dritten Zündquelle 152 gerichtet sein. Die Brennfackeln 19 weisen dabei auch einen definierten Mindestabstand von insbesondere mindestens 1 mm zu den Zündquellen 151, 152 auf.

[0081] Der Kraftstoff wird über die seitlich angeordnete Einspritzeinrichtung 10 direkt in den Brennraum 7 eingespritzt und vermischt sich mit der dort vorhandenen Luft.

[0082] Bei der verwendeten passiven Vorkammerzündung gelangt das Gemisch während des Kompressionshubs durch die Überströmöffnungen 14 in die Vorkammer 11 und wird von der darin befindlichen ersten Zündquelle 13 entzündet. Das in der Vorkammer 11 gezündete Kraftstoff-/Luftgemisch strömt als Brennfackel 19 über die zumindest eine Überströmöffnung 14 in den Brennraum 7.

[0083] Außerhalb der Vorkammer 11 wird das Kraftstoff-/Luftgemisch über die in den Brennraum 7 einmündende zweite Zündquelle 151 und dritte Zündquelle 152 gezündet. Die zweite Zündquelle 151 und die dritte Zündquelle 152 kann insbesondere bei der Verwendung von externer Abgasrückführung zur Unterstützung der Entflammung verwendet werden.

[0084] Fig. 11 zeigt ein Motorkennfeld der erfindungsgemäßen Brennkraftmaschine für die Ausführungsvarianten mit seitlicher oder zentraler Einspritzeinrichtung 10, wobei die Last L über der Drehzahl n aufgetragen sind bei geringem Restgasgehalt im Zylinder 3 bzw. geringer Verdünnung bei mittleren Lasten L. Fig. 12 zeigt ein analoges Motorkennfeld für die Ausführungsvariante mit seitlicher oder zentraler Einspritzeinrichtung 10 bei hohem Restgasgehalt im Zylinder 3 bzw. hoher Verdünnung bei mittleren Lasten L. In den Motorkennfeldern sind jeweils ein erster Betriebsbereich A, ein zweiter Betriebsbereich B und ein dritter Betriebsbereich C eingezeichnet. Der erste Betriebsbereich A ist dem Kaltstart und/oder dem Katalysatorheizbetrieb und/oder dem Leerlaufbereich zugeordnet. Der zweite Betriebsbereich B ist dem oberen Teillastbereich und/oder dem Vollastbereich zugeordnet. Der dritte Betriebsbereich C ist dem Leerlaufbereich und/o-

der einem vorzugsweise leerlaufnahen Teillastbereich oder einem Bereich mit hohem Restgasgehalt bzw. hoher Verdünnung zugeordnet.

[0085] Im ersten Betriebsbereich A wird das Kraftstoff-/Luftgemisch durch die zweite Zündquelle 151 und die dritte Zündquelle 152 im Brennraum 7 gezündet. Im zweiten Betriebsbereich B wird das Kraftstoff-/Luftgemisch durch die erste Zündquelle 13 in der Vorkammer 11 gezündet.

[0086] Im dritten Betriebsbereich C werden das Kraftstoff-/Luftgemisch in der Vorkammer 11 und das Kraftstoff-/Luftgemisch im Brennraum 7 nacheinander durch die erste Zündquelle 13 in der Vorkammer 11 und durch die zweite Zündquelle 151 und die dritte Zündquelle 152 im Brennraum 7 gezündet. Dies kann gleichzeitig oder phasenversetzt erfolgen, wobei bevorzugt die erste Zündquelle 13, vorzugsweise 0° bis zu 5° Kurbelwinkel, vor der zweiten Zündquelle 151 und der dritten Zündquelle 152 zündet.

[0087] Insbesondere wird im dritten Betriebsbereich C über eine externe, insbesondere gekühlte, Abgasrückführung Abgas rückgeführt. Da es hierbei vorkommen kann, dass der Restgasgehalt in der Vorkammer 11 über dem Restgasgehalt im Brennraum 7 liegt, ist es besonders vorteilhaft, in diesem dritten Betriebsbereich C sowohl mit der ersten Zündquelle 13, als auch mit der zweiten Zündquelle 151 und der dritten Zündquelle 152 zu zünden.

[0088] In vorteilhafter Weise sind die Wände der Vorkammer 11 aus Kupfer-, Nickel-, Chrom-, Wolfram- oder Silizium-Legierungen ausgeführt. Hierdurch kann auf eine gezielte Kühlung der Vorkammer 11 und der ersten Zündquelle 13 verzichtet werden.

[0089] Fig. 13 und 14 zeigen eine die Vorkammer 11 ausbildende Vorkammerzündkerze 12, welche eine erste Zündquelle 13 aufweist, die über ein Gewinde 20 - insbesondere M8 oder M10 - in ein Gehäuse 21 der Vorkammerzündkerze 12 eingeschraubt ist. Die erste Zündquelle 13 kann bevorzugt eine handelsübliche Zündkerze sein.

[0090] Die Elektroden 21 der ersten Zündquelle 13 münden zentral - also im Bereich der Längsachse 11b der Vorkammer 11 - in die Vorkammer 11 ein. Die Vorkammer 11 wird durch einen brennraumseitigen Wandbereich 23 des Gehäuses 21 gebildet. Der Wandbereich 23 weist ein Außengewinde 24 auf, über welches die Vorkammerzündkerze 12 im Zylinderkopf 2 befestigt ist.

[0091] Gemäß einer Ausführungsvariante der Erfindung beträgt das Volumen der Vorkammer 11 maximal 2,5%, vorzugsweise maximal 2%, besonders vorzugsweise maximal 1,5% des Schadraumes des Brennraumes 7.

[0092] Der Schadraum des Brennraumes 7 ist das Volumen des jeweiligen Zylinders 3 zwischen der Brennraumdeckfläche 5 des Zylinderkopfes 2 und dem Kolben 4 bei Stellung des Kolbens 4 in seinem oberen Totpunkt.

[0093] Durch eine besondere Formgebung der Vorkammer kann die Verbrennung verbessert werden.

[0094] Das absolute Volumen der Vorkammer 11 beträgt insbesondere 250 mm^3 bis 1000 mm^3 , vorzugsweise $400 - 800 \text{ mm}^3$, besonders vorzugsweise $350 - 600 \text{ mm}^3$.

[0095] Um eine rasche Verbrennung zu ermöglichen ist es vorteilhaft, wenn die Vorkammer fünf in Richtung der Längsachse der Vorkammer aufeinander folgende Sektoren mit unterschiedlichen geometrischen Formen aufweist. Wie aus den Fig. 10 und 11 ersichtlich ist, weist die Vorkammer 11 der Vorkammerzündkerze 12 eine spezielle Form des Innenraumes auf. Die Form wird beschrieben durch eine Abfolge von fünf Sektoren S1 bis S5 des Innenraumes.

[0096] Der erste Sektor S1 weist eine zylindrische oder konische oder konvexe oder konkave Form der Innenwände der Vorkammer 11 auf.

[0097] Der zweite Sektor S2 bildet einen Übergang zwischen dem ersten Sektor S1 und dem dritten Sektor S3. Im Ausführungsbeispiel ist die Innenwand der Vorkammer 11 im zweiten Sektor 2 konkav geformt und mit einem Übergangsradius r_2 ausgebildet.

[0098] Der dritte Sektor S3 weist eine zylindrische oder konische oder konvexe oder konkave

Form der Innenwände der Vorkammer 11 auf.

[0099] Der vierte Sektor S4 bildet einen Übergang zwischen dem dritten Sektor S3 und dem fünften Sektor S5. Im Ausführungsbeispiel ist die Innenwand der Vorkammer 11 im vierten Sektor 2 konvex geformt und mit einem Übergangsradius R4 ausgebildet.

[00100] Das Verhältnis der Durchmesser d1:d5 zwischen den Innenwänden der Sektoren S1 und S5 beträgt insbesondere 1:1 bis 1:5, vorzugsweise 1:2 - 1:4, besonders vorzugsweise 1:2,2 - 1,3. Die Durchmesser d1, d5 werden jeweils in einer Normalebene auf die Längsachse 11b der Vorkammer 11 gemessen.

[00101] Das Verhältnis der Höhen h1: h5 der Sektoren 1 und 5 beträgt insbesondere 0,2:1 bis 5:1, vorzugsweise 0,5:1 - 3:1 besonders vorzugsweise 0,7:1 - 1,2:1. Die Höhen h1, h5 werden jeweils parallel zur Längsachse 11b der Vorkammer 11 gemessen.

[00102] Der Winkel β zur Längsachse 11b der Vorkammer 11 des Sektors S3 beträgt 3° bis 85° , vorzugsweise 10° - 60° , besonders vorzugsweise 25° - 35° .

[00103] Der Übergangsradius r2 im zweiten Sektor S2 zwischen dem ersten Sektor S1 und dem dritten Sektor S3 beträgt bevorzugt 1 bis 15 mm, vorzugsweise 3 bis 12 mm, besonders vorzugsweise 4 bis 7 mm.

[00104] Der Übergangsradius r4 im vierten Sektor S4 zwischen dem dritten Sektor S3 und dem fünften Sektor S5 beträgt insbesondere 1 bis 15 mm, vorzugsweise 3 bis 12 mm, besonders vorzugsweise 4 bis 7 mm.

[00105] Die Innenwände der Vorkammer können drehsymmetrisch ausgebildet sein.

[00106] Durch eine derartige Formgebung der Vorkammer kann eine gute Ladungsbewegung in der Vorkammer generiert und dadurch die Zündbedingungen verbessert werden.

[00107] Wie in den Fig. 15 bis 17 gezeigt ist, kann die Innenform der Vorkammer 11 in Ergänzung zu einem Hauptvolumen V1 ein Nebenvolumen V2 aufweisen, in welches Restgas im Verdichtungstakt verdrängt werden kann. Das Nebenvolumen V2 ist vom Hauptvolumen V1 räumlich getrennt und durch zumindest einen Übertrittskanal 25 mit dem Hauptvolumen V1 strömungsverbunden. Bevorzugt ist das Nebenvolumen V2 ist Richtung der Längsachse 11a der Vorkammer 11 vom Hauptvolumen V1 beabstandet, wobei vorzugsweise zumindest ein Übertrittskanal 25 im Wesentlichen parallel zur Längsachse 11a der Vorkammer 11 und/oder parallel zur Längsachse 13a der ersten Zündquelle 13 verläuft. Das Hauptvolumen V1 und das Nebenvolumen V2 sind in einer Ausführungsvariante in einer Vorkammerzündkerze angeordnet. Wie insbesondere in den Fig. 15 bis 17 gezeigt ist, verläuft zumindest ein Übertrittskanal 25 - vorzugsweise alle Übertrittskanäle 25 - in Bezug auf die Längsachse der ersten Zündquelle 13 - radial außerhalb des Gewindes 20 der ersten Zündquelle 13 parallel zur Längsachse 11b der Vorkammer 11 bzw. parallel zur Längsachse 13a der ersten Zündquelle 13. In Fig. 17 sind als inverse Darstellung nur die durch das Gehäuse 21 ausgebildeten Hohlräume des Hauptvolumens V1 und des Nebenvolumens V2, sowie die vier gleichmäßig über den Umfang verteilt angeordneten Übertrittskanäle 25 dargestellt.

[00108] Das Nebenvolumen V2 ist als Ringraum ausgebildet und weist einen Rauminhalt auf, welcher insbesondere das 0,05 bis 0,8 fache des Hauptvolumens V1 beträgt. Vorzugsweise beträgt das Nebenvolumen V2 das 0,075 - 0,4 fache des Hauptvolumens V1 der Vorkammer 11, besonders vorzugsweise das 0,1 bis 0,3 fache des Volumens des Hauptvolumens V1 der Vorkammer 11.

[00109] Die Überströmöffnungen 14 vom Hauptvolumen V1 der Vorkammer 11 in den Brennraum 7 weisen eine Länge L von 2 - 20 mm und einen Durchmesser D von 0,1 - 3 mm auf (Fig. 12). Die Form der Übertrittsöffnungen 14 kann vorteilhaft entweder annähernd zylindrisch oder eckig ausgeführt sein.

Patentansprüche

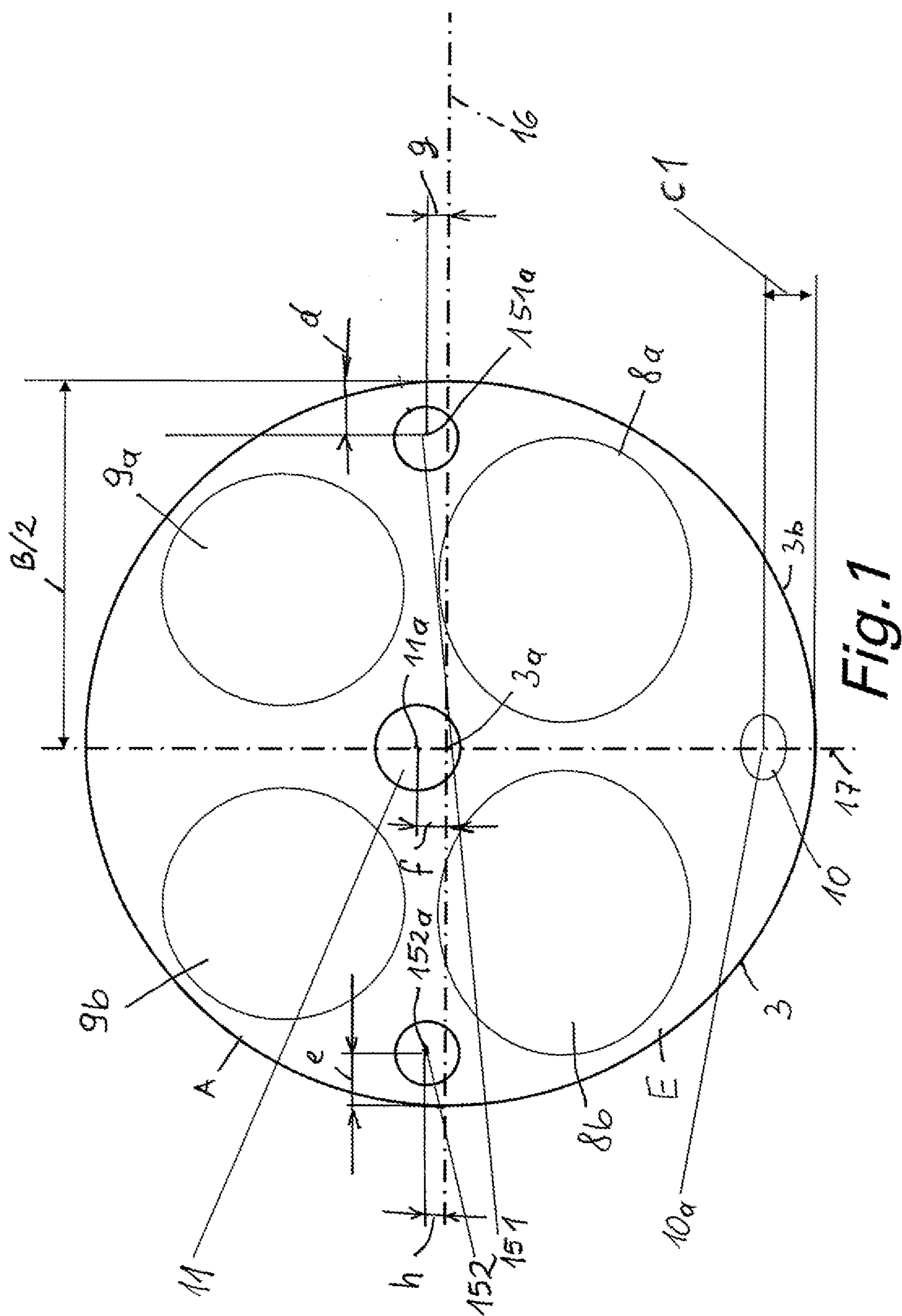
1. Brennkraftmaschine (1) mit einem Zylinderkopf (2) mit einer Vorkammer (11) pro Zylinder (3), die über zumindest eine Überströmöffnung (14) mit einem Brennraum (7) strömungsverbunden ist, wobei eine erste Zündquelle (13) in die Vorkammer (11) und eine zweite Zündquelle (151) außerhalb der Vorkammer (11) in den Brennraum (7) einmündet, wobei eine dritte Zündquelle (152) außerhalb der Vorkammer (11) in den Brennraum (7) einmündet, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Vorkammer (11) in einem zentralen Bereich (k) des Brennraumes (7), vorzugsweise im Bereich einer Zylinderachse (3a) des Zylinders (3), angeordnet ist.
2. Brennkraftmaschine (1) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Vorkammer (11) als passive Vorkammer ausgeführt ist.
3. Brennkraftmaschine (1) nach Ansprüchen 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass zumindest eine Einspritzeinrichtung (10) für Kraftstoff seitlich in den Brennraum (7) einmündet.
4. Brennkraftmaschine (1) nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Mündung (10a) der Einspritzeinrichtung (10) einen Abstand (c1) vom Brennraumrand (3b) aufweist, der geringer ist als 0,3mal dem Bohrungshalbmesser (B/2) des Zylinders (3), vorzugsweise geringer ist als 0,25-mal dem Bohrungshalbmesser (B/2), besonders vorzugsweise geringer ist als 0,2-mal dem Bohrungshalbmesser (B/2).
5. Brennkraftmaschine (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass zumindest eine Einspritzeinrichtung (10) für Kraftstoff in einem zentralen Bereich (k), vorzugsweise im Bereich der Zylinderachse (3a) des Zylinders (3), in den Brennraum (7) einmündet.
6. Brennkraftmaschine (1) nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Mündung (10a) der Einspritzeinrichtung (10) einen Abstand (c2) von der Zylinderachse (3a) aufweist, der geringer ist als 0,3mal dem Bohrungshalbmesser (B/2) des Zylinders (3), vorzugsweise geringer ist als 0,25-mal dem Bohrungshalbmesser (B/2), besonders vorzugsweise geringer ist als 0,2-mal dem Bohrungshalbmesser (B/2).
7. Brennkraftmaschine (1) nach einem der Ansprüche 3 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Mündung (10a) der Einspritzeinrichtung (10) auf der Einlassseite des Zylinderkopfes (2), vorzugsweise im Bereich einer durch die Zylinderachse (3a) verlaufenden Motorquerebene (17), angeordnet ist.
8. Brennkraftmaschine (1) nach einem der Ansprüche 3 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Mündung (10a) der Einspritzeinrichtung (10) im Bereich zwischen zwei Einlassventilöffnungen (8a, 8b) des Zylinderkopfes (2) angeordnet ist.
9. Brennkraftmaschine (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Mündungen (11a) der Vorkammer (11), die Mündung (15a) der zweiten Zündquelle (15) und die Mündung (152a) der dritten Zündquelle (152) im Bereich einer durch die Zylinderachse (3a) verlaufenden Motorlängsebene (16), angeordnet sind, wobei vorzugsweise ein Abstand (f) zwischen einer Mitte der Mündung (11a) der Vorkammer (11) und der Motorlängsebene (16), ein Abstand (g) zwischen einer Mitte der Mündung (151a) der zweiten Zündquelle (151) und der Motorlängsebene (16) und/oder ein Abstand (h) zwischen einer Mitte der Mündung (152a) der dritten Zündquelle (152) und der Motorlängsebene (16) weniger als 0,2-mal dem halben Bohrungsdurchmesser (B) beträgt.
10. Brennkraftmaschine (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Vorkammer (11) und die erste Zündquelle (13) durch eine Vorkammerzündkerze (12) gebildet sind.
11. Brennkraftmaschine (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Einspritzeinrichtung (10) mehrere Einspritzstrahlen (18) aufweist, wobei - in Richtung der Zylinderachse (3a) betrachtet - zumindest zwei Einspritzstrahlen (18) auf einen Bereich beidseits der Mündung (11a) der Vorkammer (11) und/oder Mündung (15a) der zweiten

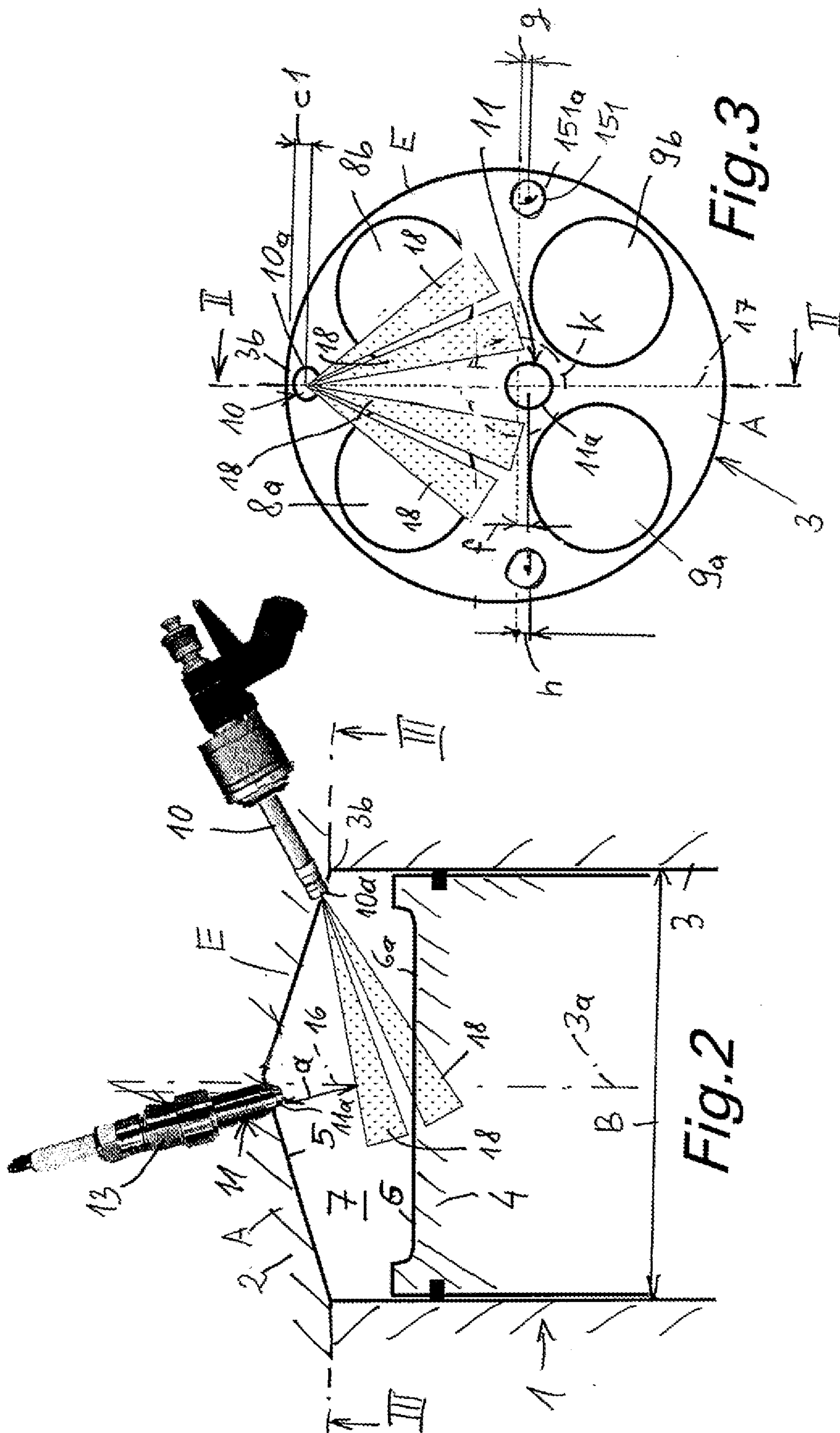
Zündquelle (151) oder der dritten Zündquelle (152) gerichtet sind.

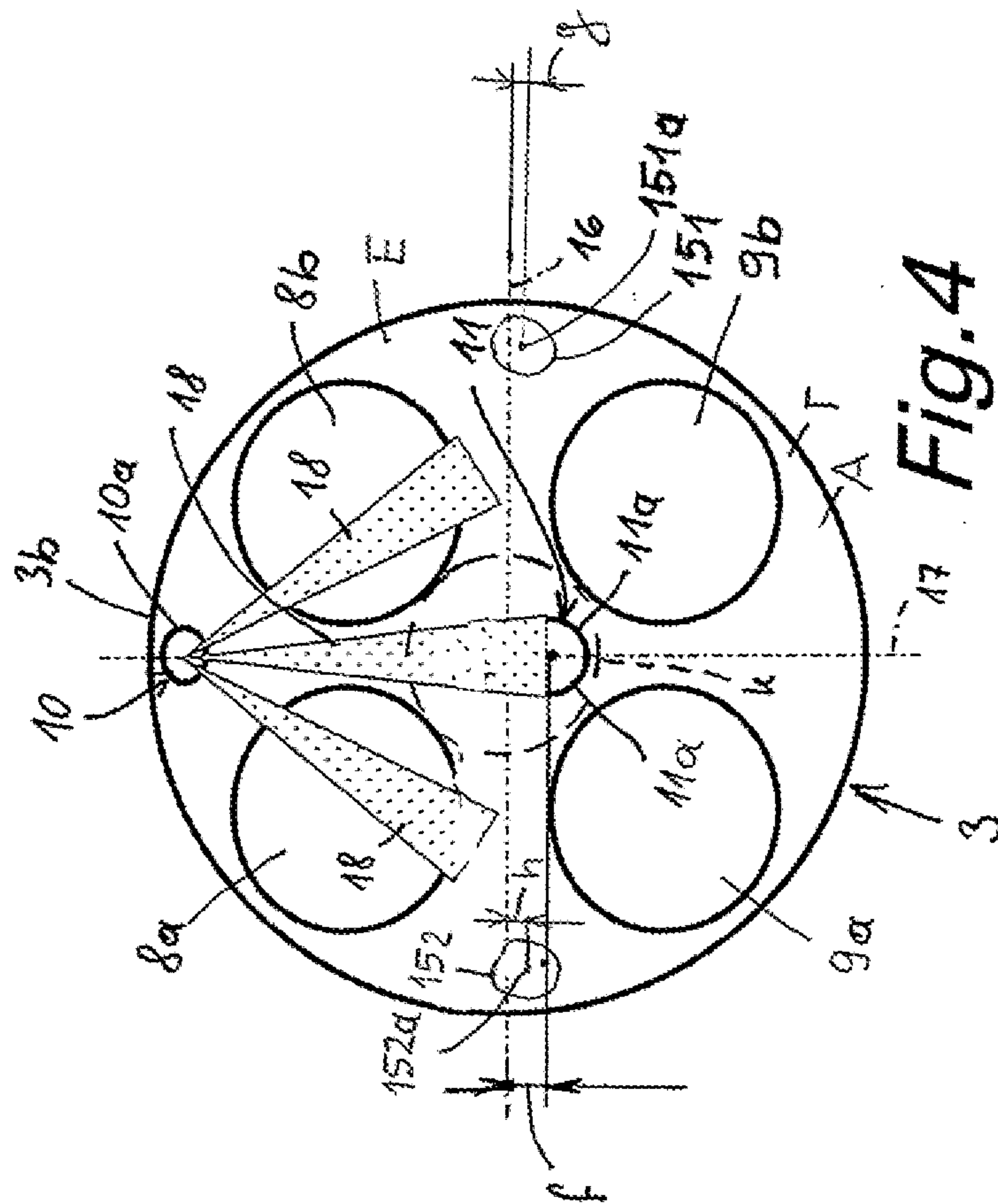
12. Brennkraftmaschine (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Einspritzeinrichtung (10) mehrere Einspritzstrahlen (18) aufweist, wobei - in Richtung der Zylinderachse (3a) betrachtet - zumindest ein Einspritzstrahl (18) auf einen Bereich in Richtung der Mündung (11a) der Vorkammer (11) und/oder Mündung (151a, 152a) der zweiten Zündquelle (151) oder der dritten Zündquelle (152) gerichtet ist.
13. Brennkraftmaschine (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Einspritzstrahlen (18) einen definieren ersten Mindestabstand (a) zur Mündung (11a) der Vorkammer (11) und/oder zur Mündung (151a) der zweiten Zündquelle (151) und/oder zur Mündung (152a) der dritten Zündquelle (152) aufweisen, welcher erste Mindestabstand (a) zwischen 5% und 30%, vorzugsweise 10% bis 20% des Bohrungsdurchmessers (B) des Zylinders (3) beträgt.
14. Brennkraftmaschine (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Vorkammer (11) über zumindest zwei Überströmöffnungen (14) für jeweils eine Brennfackel (19) mit dem Brennraum (7) verbunden ist, wobei - in Richtung der Zylinderachse (3a) betrachtet - zumindest eine Brennfackel (19) auf die zweite Zündquelle (151) und/oder die dritte Zündquelle (152) gerichtet ist, wobei vorzugsweise die zumindest eine Brennfackeln (19) einen definierten zweiten Mindestabstand (b) zur zweiten Zündquelle (151) oder dritten Zündquelle (152) aufweist, welcher besonders vorzugsweise mindestens 1mm beträgt.
15. Brennkraftmaschine (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass - in Richtung der Zylinderachse (3a) betrachtet - die Mitte der Mündung (151a) der zweiten Zündquelle (151) und/oder die Mitte der Mündung (152a) der dritten Zündquelle (152) in einer Entfernung (d, e) vom Brennraumrand (3b) angeordnet ist/sind, der geringer ist als 0,3mal dem Bohrungshalbmesser (B/2) des Zylinders (3), vorzugsweise geringer ist als 0,25-mal dem Bohrungshalbmesser (B/2), besonders vorzugsweise geringer ist als 0,2-mal dem Bohrungshalbmesser (B/2).
16. Brennkraftmaschine (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Mündung (151a) der zweiten Zündquelle (151) und die Mündung (152a) der dritten Zündquelle (152) an unterschiedlichen Seiten einer durch die Zylinderachse (3a) verlaufenden Motorquerebene (17) angeordnet sind.
17. Verfahren zum Betreiben einer Brennkraftmaschine (1) mit einem Zylinderkopf (2) mit einer Vorkammer (11) pro Zylinder (3), die über zumindest eine Überströmöffnung (14) mit einem Brennraum (7) strömungsverbunden ist, wobei Kraftstoff-/Luftgemisch über eine in die Vorkammer (11) einmündende erste Zündquelle (13) und zumindest über eine außerhalb der Vorkammer (11) in den Brennraum (7) einmündende zweite Zündquelle (151) gezündet wird, wobei das in der Vorkammer (11) gezündete Kraftstoff-/Luftgemisch als Brennfackel (19) über die zumindest eine Überströmöffnung (14) in den Brennraum (7) strömt, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Kraftstoff über eine Einspritzeinrichtung (10) eingespritzt wird, sich mit Luft vermischt, und das Kraftstoff-Luftgemisch vom Brennraum (7) in die Vorkammer (11) strömt und dass
 - in einem ersten Betriebsbereich (A) das Kraftstoff-/Luftgemisch durch die zweite Zündquelle (151) und eine in den Brennraum (7) einmündende dritte Zündquelle (152) im Brennraum (7) gezündet wird, und
 - in einem zweiten Betriebsbereich (B) das Kraftstoff-/Luftgemisch durch die erste Zündquelle (13) in der Vorkammer (11) gezündet wird, und
 - in einem dritten Betriebsbereich (C) das Kraftstoff-/Luftgemisch in der Vorkammer (11) und das Kraftstoff-/Luftgemisch im Brennraum (7) gleichzeitig oder nacheinander durch die erste Zündquelle (13) in der Vorkammer (11) und durch die zweite Zündquelle (151) und die dritte Zündquelle (152) im Brennraum (7) gezündet werden.

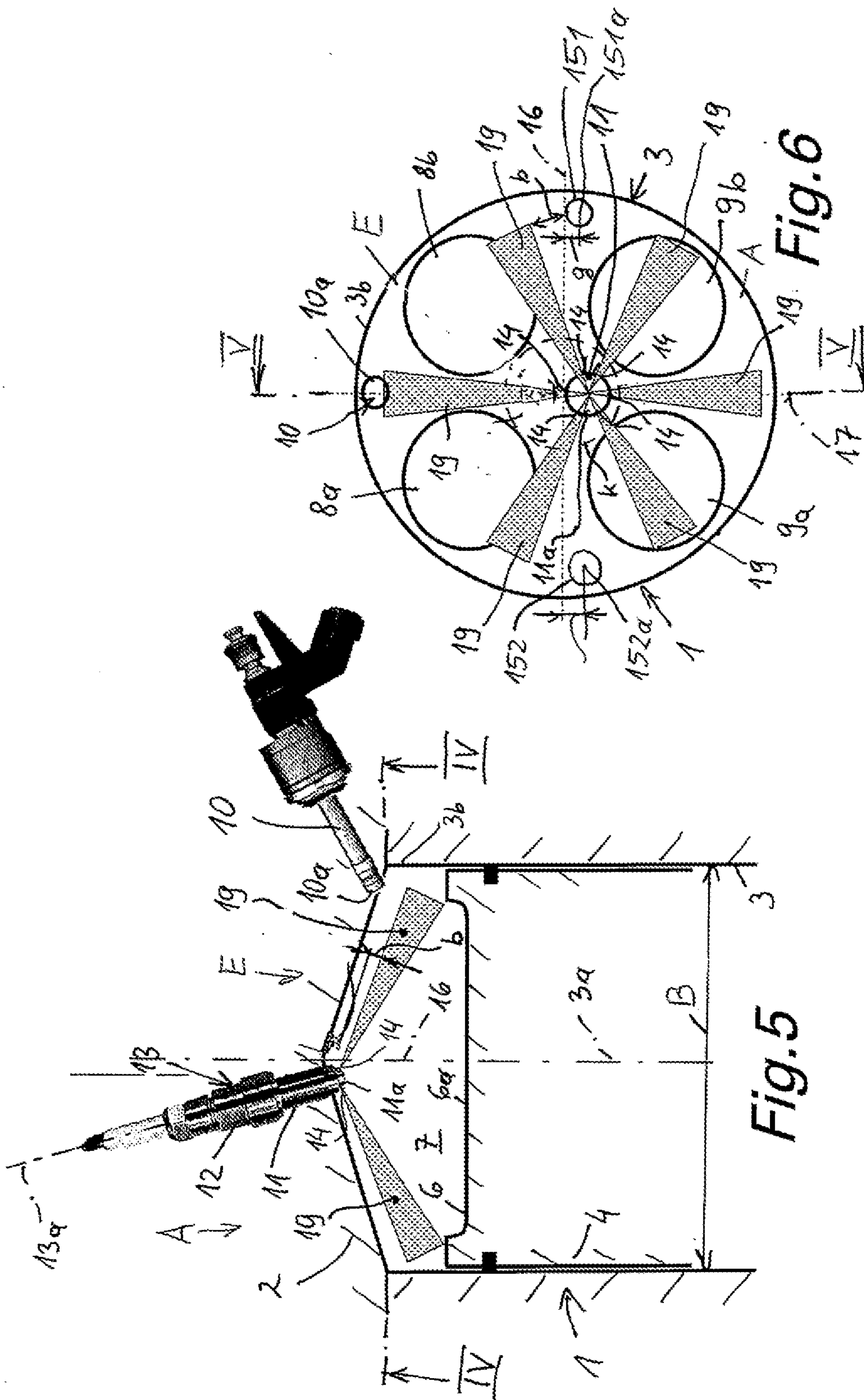
18. Verfahren nach Anspruch 17, **dadurch gekennzeichnet**, dass der erste Betriebsbereich (A) dem Kaltstart und/oder dem Katalysatorheizbetrieb und/ oder dem Leerlaufbereich zugeordnet wird.
19. Verfahren nach Anspruch 17 oder 18, **dadurch gekennzeichnet**, dass der zweite Betriebsbereich (B) dem oberen Teillastbereich und/oder dem Vollastbereich zugeordnet wird.
20. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 19, **dadurch gekennzeichnet**, dass der dritte Betriebsbereich (C) dem Leerlaufbereich und/oder einem vorzugsweise leerlaufnahen Teillastbereich zugeordnet wird.
21. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 20, **dadurch gekennzeichnet**, dass im dritten Betriebsbereich (C) das Kraftstoff-/Luftgemisch in der Vorkammer (11) und das Kraftstoff-/Luftgemisch im Brennraum (7) gleichzeitig durch die erste Zündquelle (13) in der Vorkammer (11) und durch die zweite Zündquelle (151) und durch die dritte Zündquelle (152) im Brennraum (7) gezündet werden.
22. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 21, **dadurch gekennzeichnet**, dass im dritten Betriebsbereich (C) das Kraftstoff-/Luftgemisch in der Vorkammer (11) und das Kraftstoff-/Luftgemisch im Brennraum (7) nacheinander durch die erste Zündquelle (13) in der Vorkammer (11) und durch die zweite Zündquelle (151) und durch die dritte Zündquelle (152) im Brennraum (11) gezündet werden, wobei vorzugsweise die erste Zündquelle (13), besonders vorzugsweise bis zu 5° Kurbelwinkel, vor der zweiten Zündquelle (151) und dritten Zündquelle (152) zündet.
23. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 22, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Teil des Abgases der Brennkraftmaschine (1) gekühlt und in den Brennraum (7) rückgeführt wird.
24. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 23, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zweite Zündquelle (151) und die dritte Zündquelle (152) zur Unterstützung der Entflammung verwendet werden.

Hierzu 10 Blatt Zeichnungen









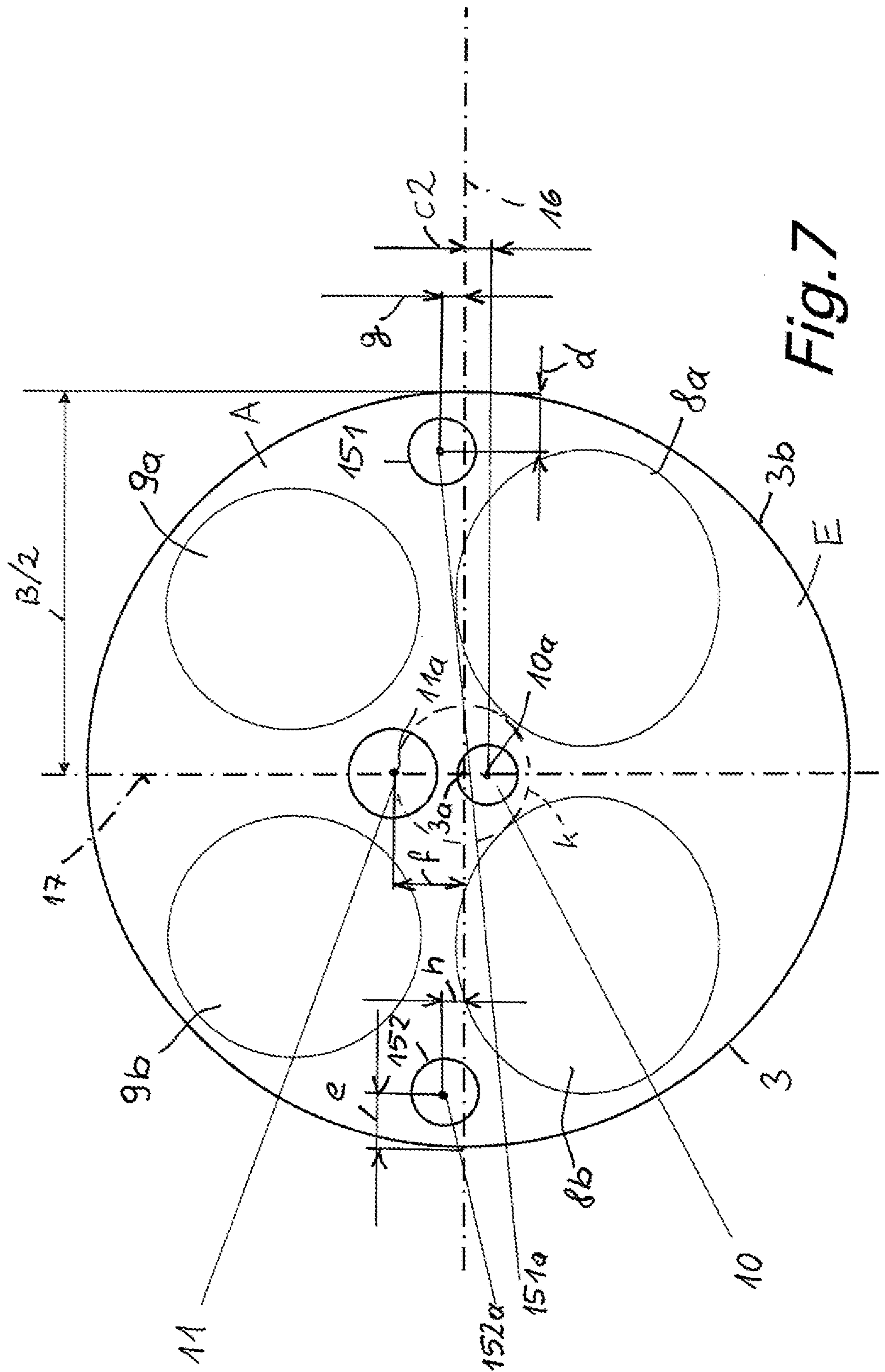
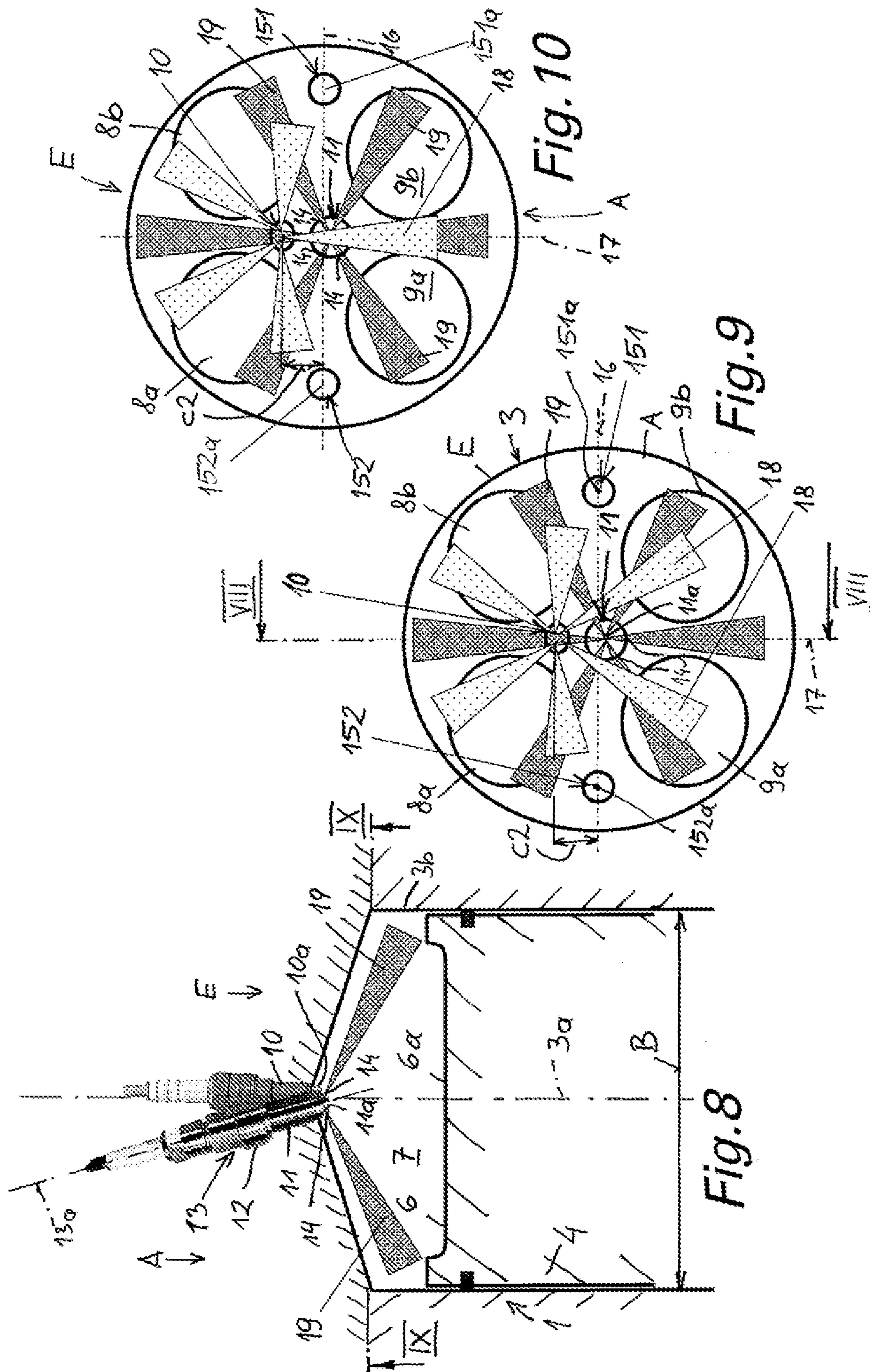


Fig. 7



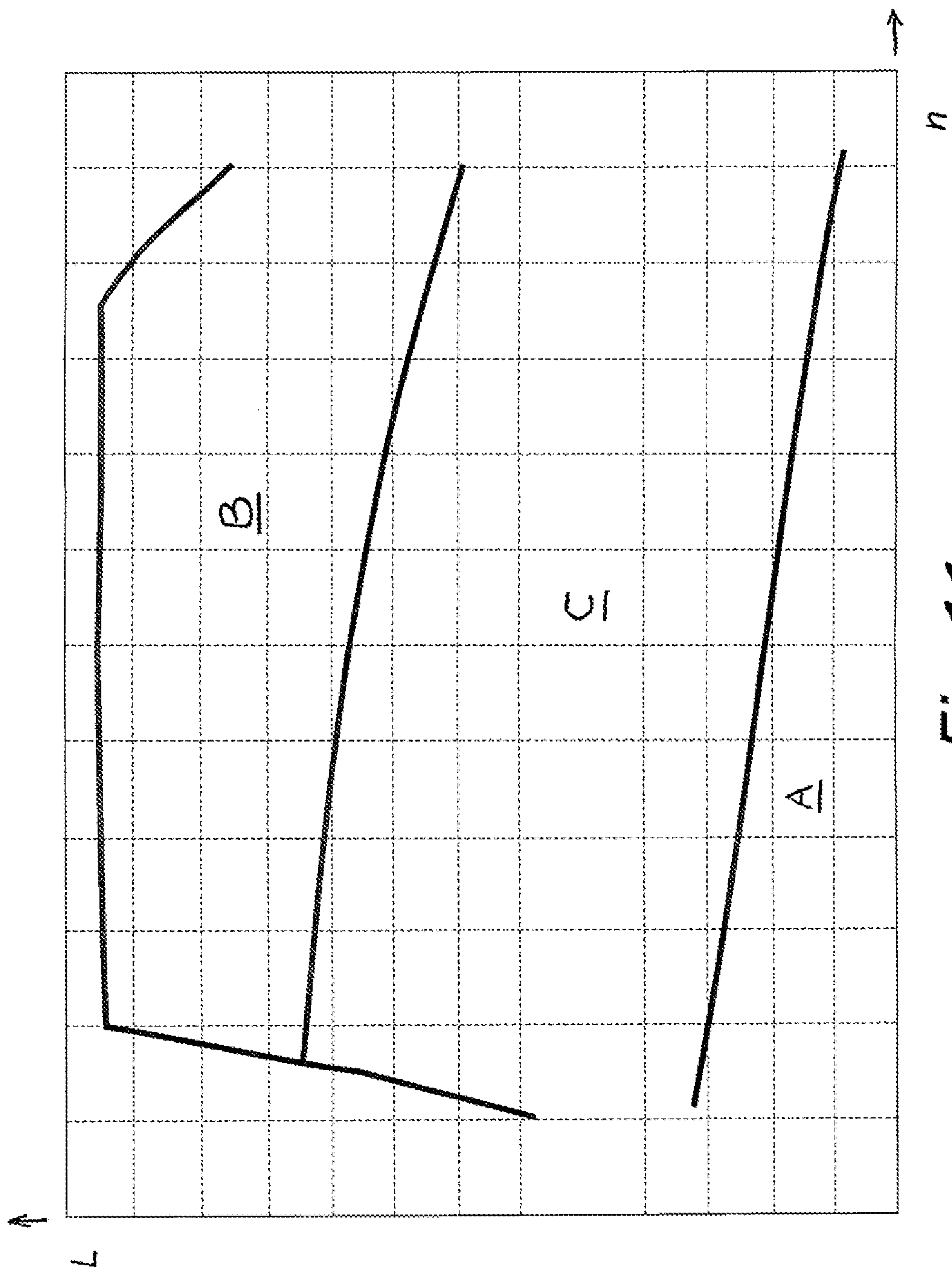


Fig. 11

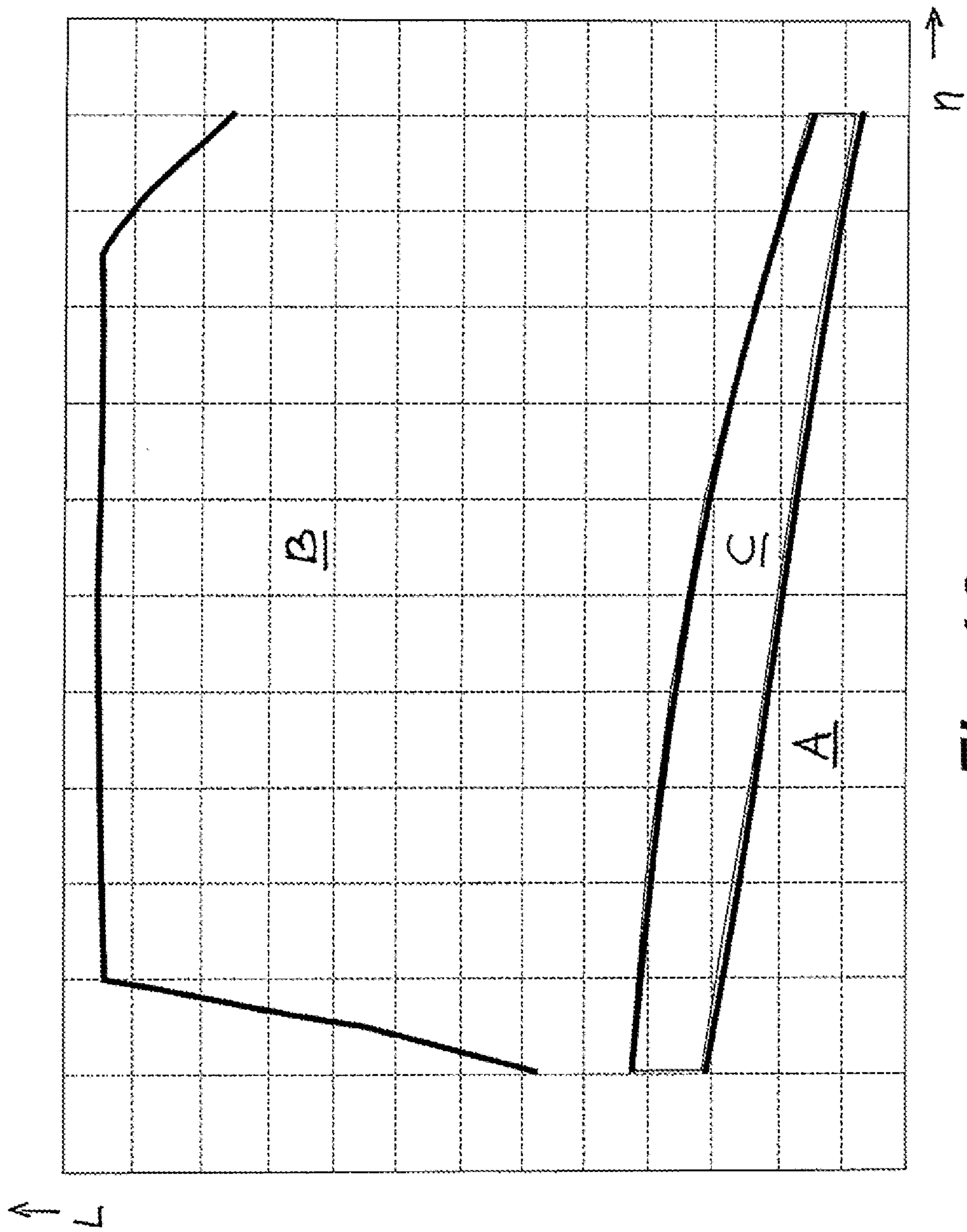


Fig. 12

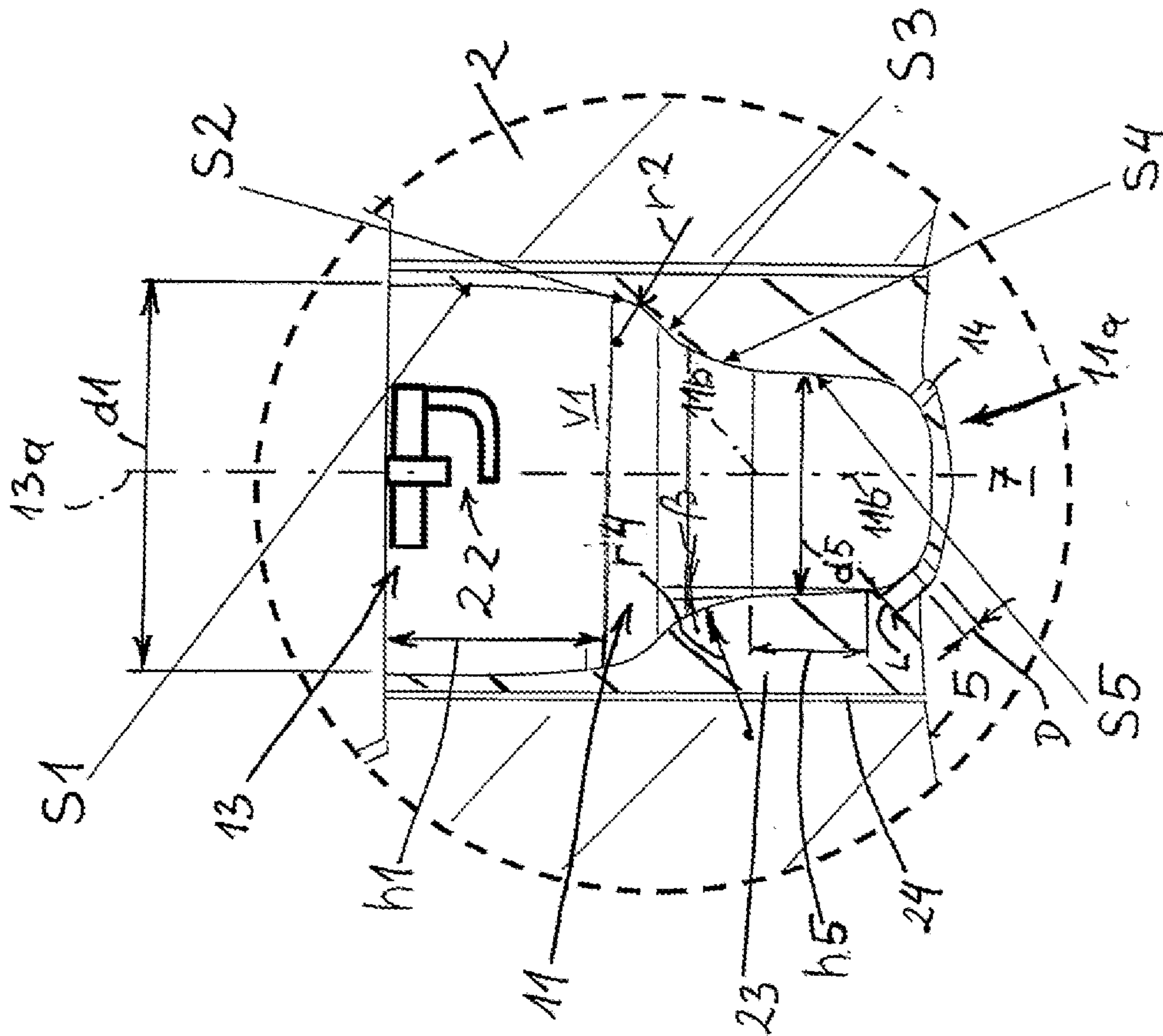


Fig. 14

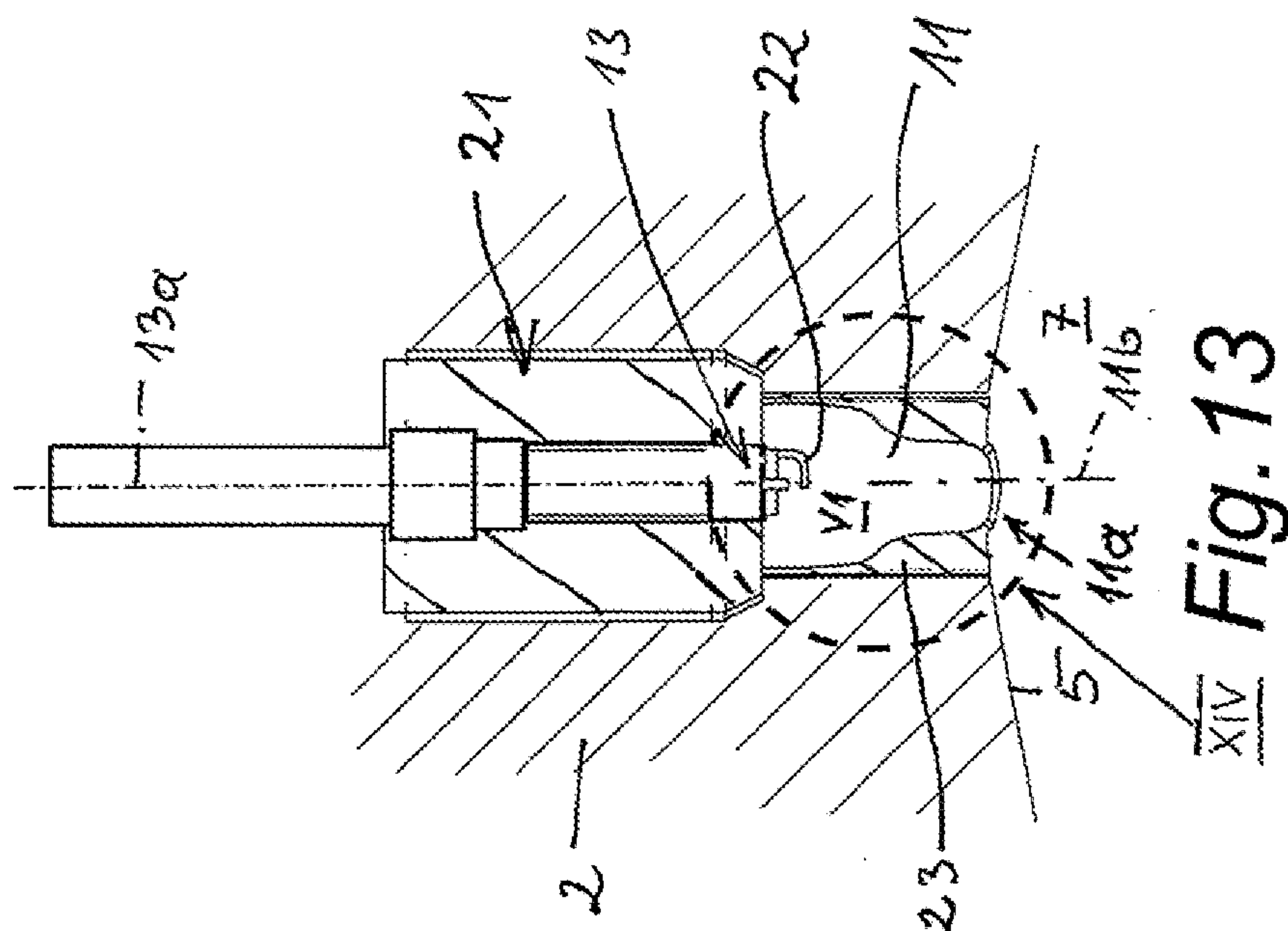


Fig. 13

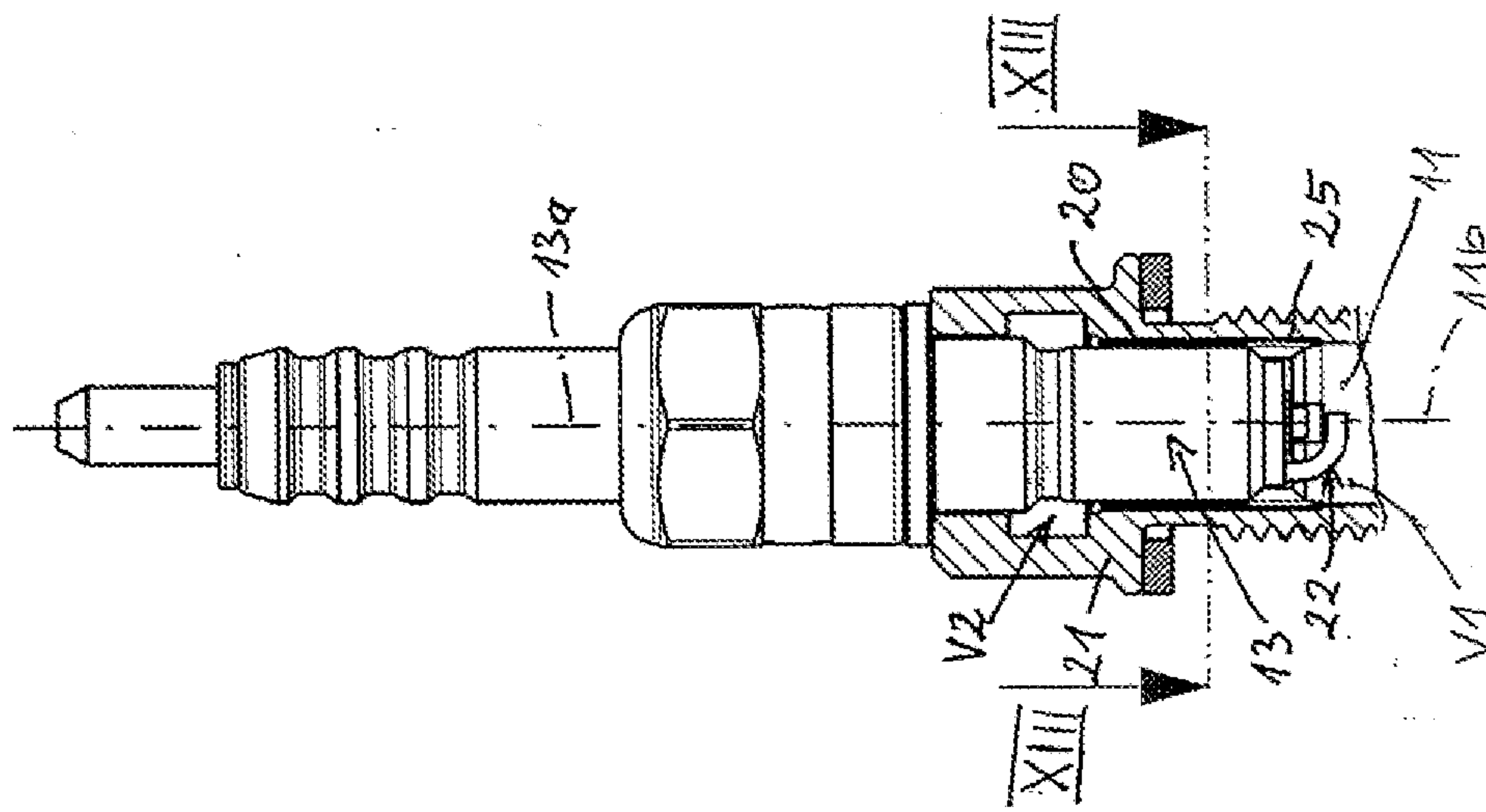


Fig. 15

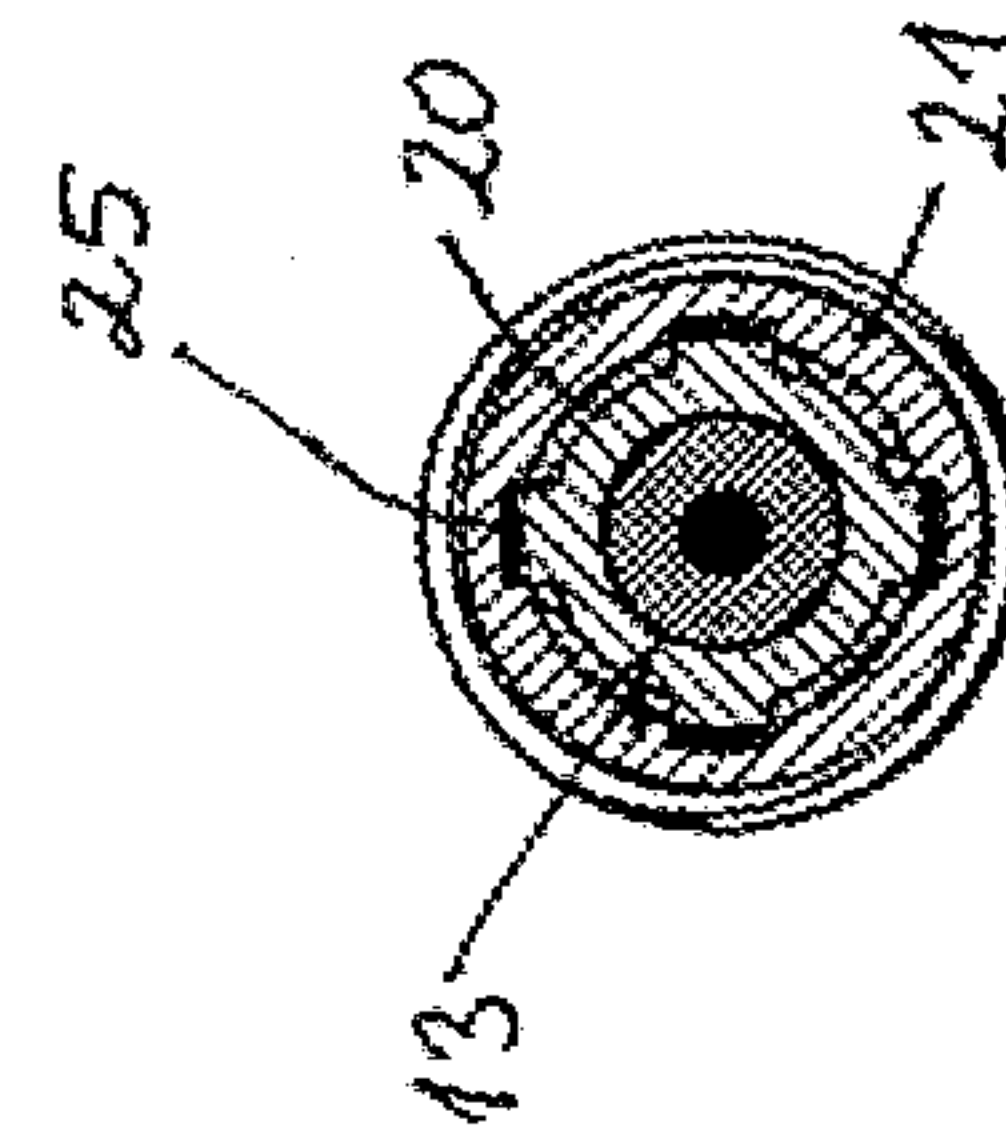


Fig. 16

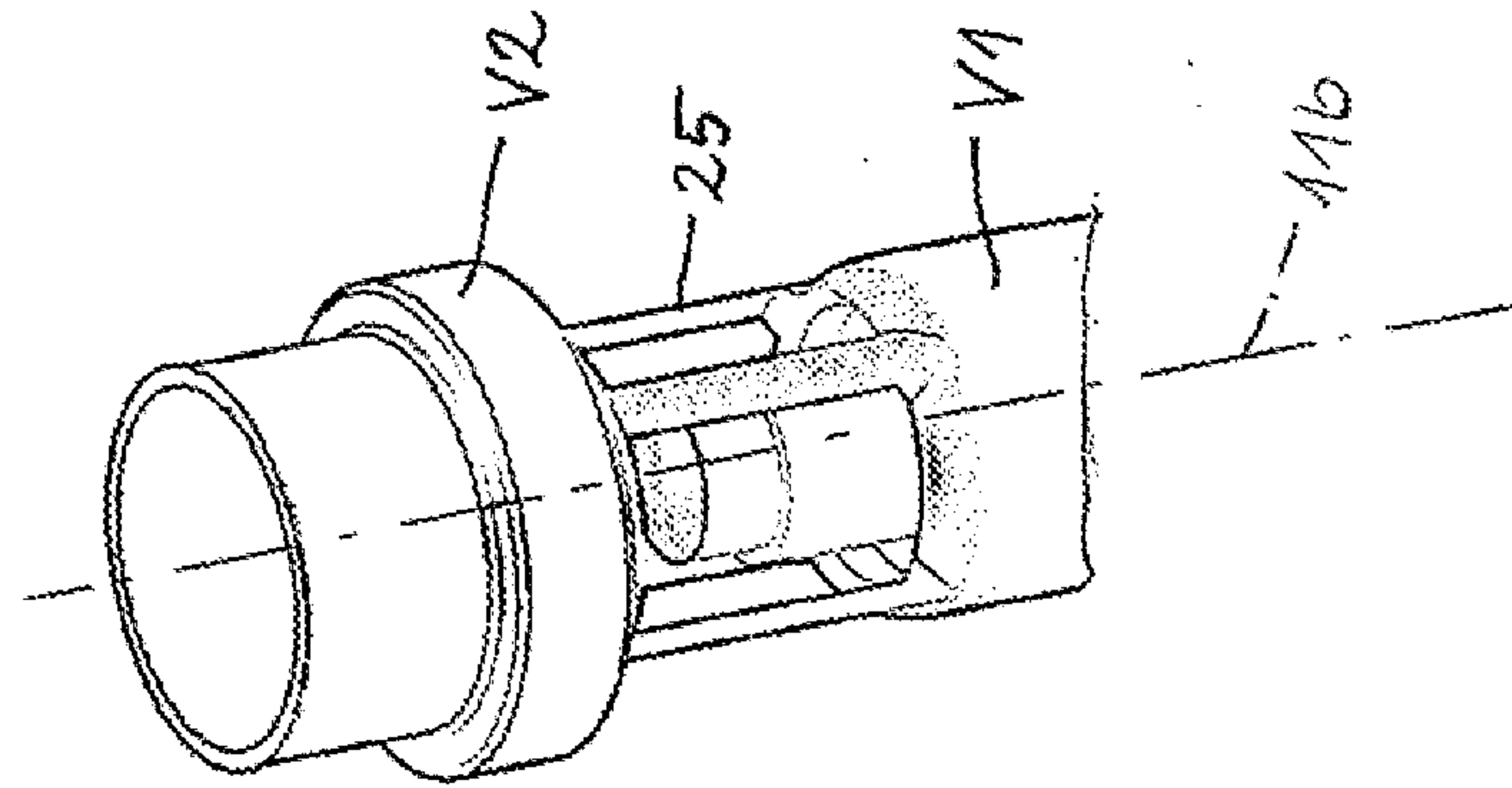


Fig. 17