

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 50751/2022 (51) Int. Cl.: **F02B 19/12** (2006.01)
(22) Anmeldetag: 29.09.2022 **F02B 19/16** (2006.01)
(43) Veröffentlicht am: 15.01.2024 **F02B 19/18** (2006.01)
F02P 13/00 (2006.01)
F02P 15/08 (2006.01)
F02F 1/24 (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
JP S53165106 U
CN 115013143 A
EP 2226495 A1
EP 2020503 A2
DE 2843119 A1
DE 102015016772 A1

(71) Patentanmelder:
AVL List GmbH
8020 Graz (AT)

(72) Erfinder:
DINIZ NETTO Nilton Antonio
8020 Graz (AT)
CERTIC Marko Dipl.-Ing.
8051 Graz (AT)
KAPUS Paul Dr.
8111 Gratwein-Straßengel (AT)
FÜRHAPTER Alois Dipl.-Ing.
8051 Thal (AT)

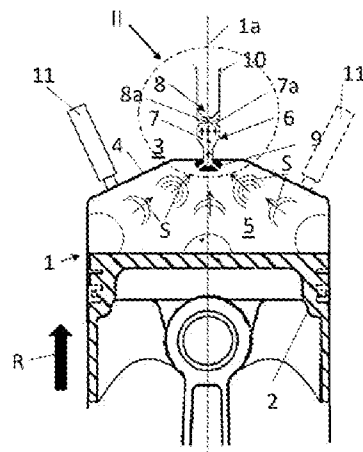
(74) Vertreter:
Babeluk Michael Dipl.-Ing. Mag.
1080 Wien (AT)

(54) **Verfahren zum Betreiben einer fremdgezündeten Viertakt-Brennkraftmaschine**

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben einer fremdgezündeten Viertakt-Brennkraftmaschine, bei der während eines Arbeitstaktes (AT) zumindest eines Arbeitszyklus Kraftstoff durch zumindest ein Kraftstoffeinspritzereignis (KE) direkt in einen Hauptbrennraum (5) eingespritzt wird, wobei vor der Verbrennung eines Kraftstoff/Luftgemisches Radikale (OH) durch zumindest einen Vorzündfunken (VZF) in einer Vorkammer (7) gebildet werden und das Kraftstoff/Luftgemisch durch zumindest einen Hauptzündfunken (HZF) in der Vorkammer (7) gezündet wird.

Um auf möglichst einfache Weise einen stabilen Betrieb der Brennkraftmaschine zu erreichen, ist vorgesehen, dass während eines Verdichtungsstaktes (VT) des Arbeitszyklus Restgas in der als passive Vorkammer ausgebildeten Vorkammer (7) durch Einleiten von Kraftstoff/Luftgemisch aus dem Hauptbrennraum (5) verdichtet und die Luftzahl (λ) innerhalb der Vorkammer (7) verringert wird, dass während eines Vorzündfunkenzeitfensters (VZF) mindestens ein Vorzündfunke (VZ) in der passiven Vorkammer (7) initiiert und Radikale (OH) innerhalb

der Vorkammer (7) erzeugt werden, dass eine Radikale (OH) enthaltende Gasteilmenge aus der Vorkammer (7) in ein mit der Vorkammer (7) strömungsverbundenes Radikalspeichervolumen (10) bewegt wird, und dass die Verbrennung des Radikale (OH) enthaltenden Kraftstoff/Luftgemisches durch Initiieren eines Hauptzündfunken (HZ) innerhalb eines Hauptzündfunkenzeitfensters (HZF) in der Vorkammer (7) eingeleitet wird.



Z U S A M M E N F A S S U N G

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben einer fremdgezündeten Viertakt-Brennkraftmaschine, bei der während eines Arbeitstaktes (AT) zumindest eines Arbeitszyklus Kraftstoff durch zumindest ein Kraftstoffeinspritzereignis (KE) direkt in einen Hauptbrennraum (5) eingespritzt wird, wobei vor der Verbrennung eines Kraftstoff/Luftgemisches Radikale (OH) durch zumindest einen Vorzündfunken (VZF) in einer Vorkammer (7) gebildet werden und das Kraftstoff/Luftgemisch durch zumindest einen Hauptzündfunken (HZF) in der Vorkammer (7) gezündet wird.

Um auf möglichst einfache Weise einen stabilen Betrieb der Brennkraftmaschine zu erreichen, ist vorgesehen, dass während eines Verdichtungstaktes (VT) des Arbeitszyklus Restgas in der als passive Vorkammer ausgebildeten Vorkammer (7) durch Einleiten von Kraftstoff/Luftgemisch aus dem Hauptbrennraum (5) verdichtet und die Luftzahl (λ) innerhalb der Vorkammer (7) verringert wird, dass während eines Vorzündfunkenzeitfensters (VZF) mindestens ein Vorzündfunke (VZ) in der passiven Vorkammer (7) initiiert und Radikale (OH) innerhalb der Vorkammer (7) erzeugt werden, dass eine Radikale (OH) enthaltende Gasteilmenge aus der Vorkammer (7) in ein mit der Vorkammer (7) strömungsverbundenes Radikalspeichervolumen (10) bewegt wird, und dass die Verbrennung des Radikale (OH) enthaltenden Kraftstoff/Luftgemisches durch Initiieren eines Hauptzündfunkens (HZ) innerhalb eines Hauptzündfunkenzeitfensters (HZF) in der Vorkammer (7) eingeleitet wird.

Fig. 1

Verfahren zum Betreiben einer fremdgezündeten Viertakt-Brennkraftmaschine

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben einer fremdgezündeten Viertakt-Brennkraftmaschine, bei der während eines Arbeitstaktes Kraftstoff durch zumindest ein Kraftstoffeinspritzereignis direkt in einen Hauptbrennraum eingespritzt wird, wobei vor der Verbrennung eines Kraftstoff/Luftgemisches Radikale durch zumindest einen Vorzündfunken in einer Vorkammer gebildet werden und das Kraftstoff/Luftgemisch durch zumindest einen Hauptzündfunken in der Vorkammer gezündet wird. Weiters betrifft die Erfindung eine fremdgezündete Viertakt-Brennkraftmaschine mit zumindest einem Hauptbrennraum, in welchen zumindest eine Kraftstoffeinspritzeinrichtung zur direkten Kraftstoffeinspritzung einmündet, und mit einer Zündeinheit mit einer mit dem Hauptbrennraum strömungsverbundenen passiven Vorkammer, in welche eine Zündeinrichtung einmündet.

Bei fremdgezündeten Brennkraftmaschinen sind die Verbrennungseigenschaften fortschrittlicher Verbrennungssysteme mit Vorkammerzündung verändert, so dass die Verwendung der bekannten Einspritz- und Zündstrategie im Katalysatorheiz- und Schwachlastbetrieb nicht zuverlässig genug ist, um einen stabilen Betrieb zu erreichen, insbesondere wenn der Motor nicht vollständig warmgelaufen ist.

Es ist bekannt bei einer fremdgezündeten Brennkraftmaschine Radikale durch Vorzündfunken in einer Vorkammer zu erzeugen.

Aus der DE 2843119 A1 ist eine fremdgezündete Brennkraftmaschine mit einer Vorkammer bekannt, in welche eine Zündkerze einmündet. Am Ende des Einlasstaktes werden durch einen Vorzündfunken Radikale aus dem Kraftstoff/Luftgemisch erzeugt.

Die EP 2020503 A2 zeigt eine fremdgezündete Brennkraft, wobei mehrere Vorzündfunken zur Bildung von Radikalen aus dem Kraftstoff/Luftgemisch erzeugt werden.

Die DE 102015016772 A1 beschreibt eine Brennkraftmaschine mit Vorkammer, in welcher eine Zündkerze angeordnet ist, wobei thermisch Radikale erzeugt werden. Dabei werden Hydroxylradikale durch die Funkenzündvorrichtung dissoziiert.

Aufgabe der Erfindung ist es, auf möglichst einfache Weise einen stabilen Betrieb der Brennkraftmaschine, insbesondere in der Warmlaufphase, zu erreichen.

Erfindungsgemäß wird dies dadurch erreicht, dass während eines Verdichtungstaktes des Arbeitszyklus Restgas in der als passive Vorkammer ausgebildeten Vorkammer durch Einleiten von Kraftstoff/Luftgemisch aus dem Hauptbrennraum verdichtet und die Luftzahl innerhalb der Vorkammer verringert wird, dass während eines Vorzündfunkenzeitfensters mindestens ein Vorzündfunke in der passiven Vorkammer initiiert und Radikale innerhalb der Vorkammer erzeugt werden, dass eine Radikale enthaltende Gasteilmenge aus der Vorkammer in ein mit der Vorkammer strömungsverbundenes Radikalspeichervolumen bewegt wird, dass die Verbrennung des Radikale enthaltenden Kraftstoff/Luftgemisches durch Initiieren eines Hauptzündfunken innerhalb eines Hauptzündfunkenzeitfensters in der Vorkammer eingeleitet wird.

Unter einer passiven Vorkammer ist hier eine Vorkammer zu verstehen, in welche keine Kraftstoffeinspritzeinrichtung einmündet.

Gemäß der Erfindung weist die Zündeinheit ein mit der Vorkammer strömungsverbundenes und/oder in dieses integriertes Radikalspeichervolumen auf.

Im Radikalspeichervolumen wird ein Teil der erzeugten Radikale zwischengespeichert. Die im Radikalspeichervolumen zwischengespeicherten Radikale gelangen verzögert während des Arbeitstaktes in die Vorkammer und weiter in den Hauptbrennraum und wirken sich besonders stabilisierend und beschleunigend auf den Verbrennungsverlauf aus. Im Vergleich zum bekannten Stand der Technik ermöglicht das zusätzliche Radikalspeichervolumen die Bereitstellung einer größeren Menge an Radikalen im Hauptbrennraum für die Hauptzündung. Dies wirkt sich beschleunigend und stabilisierend auf die Verbrennung aus, insbesondere im Warmlaufbetrieb der Brennkraftmaschine.

Die Zündeinrichtung der Brennkraftmaschine ist günstigerweise mit einem Zündstromkreis verbunden, welcher ausgebildet ist, um mehrere Zündfunken pro Arbeitszyklus zu erzeugen.

Günstigerweise wird das Vorzündfunkenzeitfenster einem Verdichtungstakt zumindest eines Arbeitszyklus, vorzugsweise einem Kurbelwinkelbereich zwischen 180° und 30° vor dem oberen Totpunkt der Zündung, besonders vorzugsweise einem Kurbelwinkelbereich zwischen 120° und 80° Kurbelwinkel vor dem oberen Totpunkt der Zündung - zugeordnet. Das Hauptzündfunkenzeitfenster wird vorteilhafterweise einem Kurbelwinkelbereich zwischen -30° und $+30^\circ$, bezogen auf den oberen Totpunkt der Zündung, zugeordnet.

In einer Ausführungsvariante der Erfindung ist vorgesehen, dass zumindest ein Vorzündfunke an ein Kraftstoffeinspritzereignis gekoppelt wird, wobei zumindest ein Vorzündfunke nach einer definierten Verzögerungsdauer nach dem Kraftstoffeinspritzereignis initiiert wird, wobei vorzugsweise die Verzögerungsdauer zwischen 40° und 10° Kurbelwinkel beträgt. Auf diese Weise kann die Radikalbildung optimiert werden.

Dabei ist es vorteilhaft, wenn zumindest eine Kraftstoffeinspritzung im Einlasstakt in einem Kurbelwinkelbereich zwischen 340° und 180° vor dem oberen Totpunkt der Zündung durchgeführt wird und/oder wenn zumindest eine Kraftstoffeinspritzung im Verdichtungstakt in einem Kurbelwinkelbereich zwischen 180° und 30° vor dem oberen Totpunkt der Zündung durchgeführt wird.

In einer Ausführungsvariante der Erfindung ist vorgesehen, dass zumindest zwei Kraftstoffeinspritzeinrichtungen in den Hauptbrennraum einmünden, wobei die Kraftstoffeinspritzeinrichtungen mit unterschiedlichen Einspritzparametern und/oder unabhängig voneinander betreibbar sind. Auf diese Weise kann eine besonders effektive Voraktivierung erreicht werden.

Eine Ausführungsvariante der Erfindung sieht vor, dass ein erster Vorzündfunke in einem Kurbelwinkelbereich zwischen 140° und 120° vor dem oberen Totpunkt der Zündung initiiert wird. Vorzugsweise wird ein zweiter Vorzündfunke in einem Kurbelwinkelbereich zwischen 100° und 80° vor dem oberen Totpunkt der Zündung initiiert. Dies ermöglicht eine besonders hohe Anzahl an gebildeten Radikalen.

Gemäß einer Ausführungsvariante der Erfindung ist die Vorkammer über mehrere - vorzugsweise vier bis zwölf - beispielsweise durch Bohrungen gebildete Überströmkanäle mit dem Hauptbrennraum strömungsverbunden.

Vorteilhafterweise weisen die Überströmkanäle jeweils einen Kreisquerschnitt mit einem Durchmesser zwischen 0,4 mm und 3,0 mm oder einen äquivalenten Querschnitt mit einer diesem Kreisquerschnitt entsprechenden Querschnittsfläche auf. Versuche haben gezeigt, dass diese konstruktive Ausgestaltung sich besonders günstig auf die Verbrennungseinleitung im Hauptbrennraum auswirkt.

Vorteilhafterweise ist das Radikalspeichervolumen von den Überströmkanälen weiter entfernt ist als die Elektroden der Zündeinrichtung. Das Radikalspeichervolumen ist günstigerweise mit der Vorkammer über zumindest einen, beispielsweise zwei bis acht Verbindungskanäle strömungsverbunden, wobei vorzugsweise die Verbindungskanäle jeweils einen Kreisquerschnitt mit einem Durchmesser zwischen 0,4 mm und 3,0 mm oder einen äquivalenten Querschnitt mit einer diesem Kreisquerschnitt entsprechenden Querschnittsfläche aufweisen. Diese Anordnung und die konstruktive Ausgestaltung wirken sich günstig auf eine rasche und stabile Verbrennung aus.

In vorteilhaften Ausführungsvarianten der Erfindung beträgt das Radikalspeichervolumen typischerweise 10% bis 75%, vorzugsweise 20% bis 40%, des Volumens der Vorkammer.

Die Erfindung wird im Folgenden anhand der in den nicht einschränkenden Figuren dargestellten Ausführungsbeispiele näher erläutert. Darin zeigen schematisch:

Fig. 1 einen Zylinder einer erfindungsgemäßen Brennkraftmaschine während einer ersten Phase eines Verdichtungstaktes in einem Längsschnitt;

Fig. 2 und 3 das Detail II aus Fig. 1;

Fig. 4 den Zylinder aus Fig. 1 während einer zweiten Phase des Verdichtungstaktes;

Fig. 5 das Detail V aus Fig. 4;

Fig. 6 den Zylinder aus Fig. 1 während einem Arbeitstakt;

Fig. 7 das Detail VII aus Fig. 6;

Fig. 8 eine Vorkammer samt Radikalspeichervolumen in einer Seitenansicht;

Fig. 9 Kraftstoffeinspritzung und Zündung beim erfindungsgemäßen Verfahren in einem Kurbelwinkeldiagramm und

Fig. 10 einen zeitlichen Verlauf des Zylinderdruckes und der Zylindertemperatur beim erfindungsgemäßen Verfahren.

Fig. 1 zeigt schematisch einen Zylinder 1 mit einem hin- und hergehenden Kolben 2 einer erfindungsgemäßen Brennkraftmaschine. Die fremdgezündete Brennkraftmaschine arbeitet nach dem Viertaktverfahren und kann einen oder mehrere Zylinder 1 aufweisen. Pro Zylinder 1 ist zwischen dem Kolben 2 und der - hier dachförmig durch den Zylinderkopf 3 geformten - Brennraumdeckfläche 4 ein Hauptbrennraum 5 ausgebildet.

In den Hauptbrennraum 5 mündet mittig – also im Bereich der Zylinderachse 1a - eine Zünderinheit 6 ein. Die Zünderinheit 6 weist eine passive Vorkammer 7 auf, in welche eine Zünderinrichtung 8 eines Hochspannungszündstromkreises mit einmündet. Zumindest eine Elektrode 8a der Zünderinrichtung 8 ist im Bereich der Zylinderachse 1a im Bereich der Vorkammerdecke 7a angeordnet. Die Vorkammer 7 ist über mehrere – beispielsweise vier bis zwölf - Überströmkanäle 9 mit dem Hauptbrennraum 5 strömungsverbunden. Die Überströmkanäle 9 weisen jeweils einen Kreisquerschnitt mit einem Durchmesser zwischen 0,4 mm und 3,0 mm oder einen äquivalenten Querschnitt mit einer diesem Kreisquerschnitt entsprechenden Querschnittsfläche auf, um dem hindurchströmenden Gasstrom in einem definierten Ausmaß zu drosseln.

Wie insbesondere aus den Fig. 2 und 3 hervorgeht, münden die in die Zünderinheit 6 integrierten Elektroden 8a, 8b der Zünderinrichtung 8 im Bereich der Vorkammerdecke 7a in die passive Vorkammer 7 und sind so zueinander angeordnet, dass der Betrieb in bekannter Weise mit einer induktiven Zündspule möglich ist, wobei der Abstand zwischen den Elektroden 8a, 8b im Bereich von 0,5 bis 1,5 mm (insbesondere 0,7-1,2 mm) liegt. Der Hochspannungszündstromkreis ist ausgebildet um mehrere Funken pro Motorzyklus (720° KW) zu erzeugen, wobei jeder Funke optional auch mit verlängerter Zünddauer realisiert werden kann.

Die Zündeinheit 6 ist mit einem Radikalspeichervolumen 10 von definierter Größe ausgestattet. Das Radikalspeichervolumen 10 ist weiter von den Überströmkanälen 9 entfernt als die Elektroden 8a, 8b der Zündeinrichtung 8 (siehe Fig. 3). Das Radikalspeichervolumen 10 beträgt beispielsweise 10% bis 75%, vorzugsweise 20% bis 40% des Volumens der Vorkammer 7.

Fig. 8 zeigt eine Zündeinheit 8 im Detail als Negativkörper. Die Vorkammer 7 bildet das Hauptvolumen der Zündeinheit 8 aus und ist über die Überströmkanäle 9 mit dem Hauptbrennraum 5 strömungsverbunden. Das Radikalspeichervolumen 10 ist beispielsweise durch einen die Zündeinrichtung 8 umgebenden Ringraum zwischen Zylinderkopf 3 und Zündeinrichtung 8 gebildet und axial distanziert zur Vorkammer 7 angeordnet. Das Radikalspeichervolumen 10 ist über einen oder mehrere – beispielsweise zwei bis acht – axiale Verbindungskanäle 12 mit der Vorkammer 7 strömungsverbunden. Die Verbindungskanäle 12 können jeweils einen Kreisquerschnitt mit einem Durchmesser zwischen beispielsweise 0,4 mm und 3,0 mm oder einen äquivalenten Querschnitt mit einer diesem Kreisquerschnitt entsprechenden Querschnittsfläche aufweisen.

Über eine Kraftstoffeinspritzeinrichtung 11 oder mehrere in den Hauptbrennraum 5 mündende Kraftstoffeinspritzeinrichtungen 11 kann Kraftstoff direkt in den Hauptbrennraum 5 eingespritzt werden. Der Kraftstoffzufuhrdruck, die Position und die Sprühhichtung zwischen zwei Kraftstoffeinspritzeinrichtungen 11 kann durchaus unterschiedlich sein. Im Falle von – in den Fig. 1, 4, 6 mit strichlierten Linien angedeuteten – mehreren Kraftstoffeinspritzeinrichtungen 11 können diese unabhängig voneinander betrieben werden und dabei mehrere Kraftstoffeinspritzereignisse KE pro Arbeitszyklus vornehmen.

Die Gasströmung ist in den Fig. 1 bis 7 mit Pfeilen S angedeutet.

Als Ergebnis des vorangegangenen Arbeitszyklus ist der größte Teil des Volumens der Vorkammer 7 mit Restgas RG bei niedrigen Druckverhältnissen gefüllt, die dem Druck im Hauptbrennraum 5 ähnlich sind.

Gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren wird während des Verdichtungstaktes Restgas RG in der passiven Vorkammer 7 durch Einleiten von Kraftstoff/Luftgemisch aus dem Hauptbrennraum 5 verdichtet und die Luftzahl λ innerhalb der Vorkammer 7 verringert (siehe Fig. 1, 2). Während eines

Vorzündfunkenzeitfensters VZF wird mindestens ein Vorzündfunken VZ in der passiven Vorkammer 7 initiiert und Radikale OH innerhalb der Vorkammer 7 erzeugt. Eine Radikale OH enthaltende Gasteilmenge wird aus der Vorkammer 7 in ein mit der passiven Vorkammer 7 strömungsverbundenes Radikalspeichervolumen 10 bewegt und zwischengespeichert (siehe Fig. 3). Die Verbrennung des die Radikale OH enthaltenden Kraftstoff/Luftgemisches der Vorkammer 7 wird durch Initiieren eines Hauptzündfunkens HZ innerhalb eines Hauptzündfunkenzeitfensters HZF in der Vorkammer 7 eingeleitet.

Fig. 9 zeigt die Parameter Zündsignal Z und Einspritzsignal E für einen Arbeitszyklus der Brennkraftmaschine während der Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens, über dem Kurbelwinkel KW aufgetragen. Dargestellt sind der Einlasstakt ET, der Verdichtungstakt VT und der Arbeitstakt AT des Arbeitszyklus.

Das Vorzündfunkenzeitfenster VZF ist dem Verdichtungstakt VT zumindest eines Arbeitszyklus, beispielsweise einem Kurbelwinkelbereich zwischen 180° und 30° Kurbelwinkel KW vor dem oberen Totpunkt der Zündung OTC zugeordnet. Im Speziellen ist das Vorzündfunkenzeitfenster VZF einem Kurbelwinkelbereich zwischen 120° und 80° Kurbelwinkel KW vor dem oberen Totpunkt der Zündung OTC zugeordnet. Ein Vorzündfunke VZ kann beispielsweise in einem Kurbelwinkelbereich zwischen 100° und 80° Kurbelwinkel KW vor dem oberen Totpunkt der Zündung OTC initiiert werden. Ein weiterer Vorzündfunke VZ kann beispielsweise in einem Kurbelwinkelbereich zwischen 140° und 120° Kurbelwinkel KW vor dem oberen Totpunkt der Zündung OTC initiiert werden.

Das Hauptzündfunkenzeitfenster HZF ist einem Kurbelwinkelbereich zwischen -30° und $+30^\circ$ Kurbelwinkel KW, bezogen auf den oberen Totpunkt der Zündung OTC, zugeordnet. Zumindest ein Vorzündfunke VZ kann an ein Kraftstoffeinspritzereignis KE gekoppelt werden, wobei zumindest ein Vorzündfunke VZ nach einer definierten Verzögerungsdauer nach dem Kraftstoffeinspritzereignis KE initiiert wird. Die Verzögerungsdauer v_t kann beispielsweise zwischen 40° und 10° Kurbelwinkel KW betragen.

Zumindest ein Kraftstoffeinspritzereignis KE kann im Einlasstakt ET in einem Kurbelwinkelbereich zwischen 340° und 180° Kurbelwinkel KW vor dem oberen Totpunkt der Zündung OTC und/oder in einem Kurbelwinkelbereich zwischen 180°

und 30° Kurbelwinkel KW vor dem oberen Totpunkt der Zündung OTC durchgeführt werden.

In Fig. 9 ist weiters der Gehalt an Restgas RG und das Luftverhältnis λ für den Verdichtungstakt VT und das Hauptzündfenster HZF aufgetragen. Die Gestalt der Kurve des Luftverhältnisses λ kann durch die Einspritzstrategie in den Hauptbrennraum 5 beeinflusst werden. Die Gestalt der Kurve des Restgases RG kann durch konstruktive Parameter der Vorkammer 7 beeinflusst werden.

In Fig. 9 ist weiters die Wärmefreisetzungsrates $RoHR$ während der Verbrennung für Einzelvorzündung EZ und Mehrfachvorzündung MZ nach dem erfindungsgemäßen Verfahren dargestellt.

Weiters zeigt Fig. 10 ebenfalls einen Vergleich zwischen Einzelvorzündung EZ und Mehrfachvorzündung MZ beim erfindungsgemäßen Verfahren, wobei Zylinderdruck p , Zylindertemperatur T und Wärmefreisetzungsrates $RoHR$ über dem Kurbelwinkel KW aufgetragen sind. Deutlich ist zu erkennen, dass mit Mehrfachvorzündungen MZ eine schnellere Verbrennung erzielt werden kann.

Fig. 1 zeigt den in Richtung R sich nach oben bewegenden Kolben 2 in einer frühen Phase des Verdichtungstaktes. Fig. 2 und 3 zeigen die Zünderinheit 6 in dieser Phase. Während des Verdichtungstaktes VT wird das Restgas RG in der Vorkammer 7 durch das Kraftstoff-Luft-Gemisch aus dem Hauptbrennraum 5 verdichtet, wie durch die Pfeile S in Fig. 1, 2 und 3 angedeutet ist. Die Gesamtmasse in der Vorkammer 7 nimmt zu und die Luftzahl λ des Restgases RG sinkt. Die Konzentration des Restgases RG ist dabei abhängig vom Gesamtvolumen der Zünderinheit 6, welches sich aus dem Volumen der passiven Vorkammer 7 und dem Radikalspeichervolumens 10 zusammensetzt. Die Änderungsrate der Konzentration an Restgas RG wird durch die Größe und die Verteilung des Gesamtvolumens bestimmt.

Gleichzeitig nimmt der Kraftstoffstoffgehalt innerhalb der Zünderinheit 6 zu. Die Geschwindigkeit des Anstiegs des Kraftstoffgehaltes wird durch das Luft/Kraftstoff-Verhältnis des Gemisches beeinflusst, das aus dem Hauptbrennraum 5 in die Vorkammer 7 gelangt.

Durch gezielte ein oder mehrere Vorzündungen während des Verdichtungstakts kann der Kraftstoff, der bis zu diesem Zeitpunkt in die Vorkammer 7 gelangt ist, zu ersten chemischen Prozessen angeregt werden, die zu einer teilweisen Zersetzung der Moleküle und zur Bildung von freien Radikalen OH und damit von hochreaktiven Molekülen führen, jedoch nicht zu einer vollständigen Verbrennung an diesem Punkt des Zyklus. Solche vorgelagerten Funken können mit den Kraftstoffeinspritzungen im Hauptbrennraum 5 gekoppelt werden, um genau auf jene Kraftstoffportion einzuwirken, die sich aus dem Einspritzimpuls unter Berücksichtigung der Wegstrecke und Wegzeit zwischen der Düse der Kraftstoffeinspritzeinrichtung 11 und dem Volumen der Vorkammer 7, insbesondere den Elektroden 8a, 8b der Zündeinrichtung 8 ergibt.

Beim Verdichtungstakt der Brennkraftmaschine wird ein bestimmter Teil des radikalhaltigen Gases in das Radikalspeichervolumen 10 gedrückt (siehe Pfeile S in Fig. 3), wobei bei der Bildung von Radikalen OH die Elektroden 8a, 8b der Zündeinrichtung 8 in dem durch den Kreis B angedeuteten Bereich auf das in die Vorkammer 7 eingetretene frische Kraftstoff/Luftgemisch einwirken.

Die entstandenen freien Radikale OH verbleiben in der Vorkammer 7 und vermischen sich mit dem Restgas RG. Eine hohe Temperatur des Restgases RG kann den Prozess der Radikalbildung, der durch den oder die vorangegangenen Funken eingeleitet wurde, verstärken. Ein Teil des Gemisches aus Restgas RG und Radikalen OH wird beim Verdichtungstakt in das Radikalspeichervolumen 10 gedrückt, wie in Fig. 3 ersichtlich ist

Fig. 4 zeigt den Kolben 2 am Ende des Verdichtungstaktes VT im oberen Totpunkt OTC, Fig. 5 die Zündeinheit 6 in dieser Phase. Der Druck zwischen Hauptbrennraum 5, Vorkammer 7 und Radikalspeichervolumen 10 ist weitgehend ausgeglichen, wie in den Fig. 4 und 5 durch die Dotierung veranschaulicht ist.

In Fig. 6 ist der Kolben 2 nach dem Zünden im Arbeitstakt gezeigt. Fig. 7 zeigt dazu die Zündeinheit 6 in dieser Phase. Zum Zeitpunkt des Beginns der Hauptverbrennung, die durch den Hauptzündfunken HZF der pro Zylinder 1 einzigen Zündeinrichtung 8 ausgelöst wird, befindet sich das durch die Vorzündfunken VZ voraktivierte Gemisch in der Vorkammer 7 und initiiert durch die enthaltenen Radikale OH einen raschen Brennverlauf. Wie durch die Pfeile S in Fig. 7 angedeutet ist, gelangt die Mischung aus brennbarem Gas, Fackeln und Radikalen

OH von der Vorkammer 7 in den Hauptbrennraum 5 und stabilisiert im Hauptbrennraum 5 die Zündung bzw. Verbrennung. Das im Radikalspeichervolumen 10 gespeicherte Gemisch aus Restgas RG gelangt während des Arbeitstaktes AT in die Vorkammer 7 und schiebt das in der Vorkammer 7 enthaltene Gemisch aus teilweise unverbrannten Kraftstoff/Luft und Radikalen OH in den Hauptbrennraum 5, wodurch die Verbrennung im Hauptbrennraum 5 beschleunigt und weiter stabilisiert wird.

Durch das Radikalspeichervolumen 10 kann somit im Vergleich zu aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren eine schnellere und stabilere Verbrennung erzielt werden.

Die Energiemenge des/der Vorzündfunken(s) VZ wird durch die Ladezeit der Zündspule eingestellt. Die Kombination von geometrischen Parametern und Betriebsparametern kann zu einer optimalen Mischung und räumlichen Verteilung des unverbrannten frischen Kraftstoffs, der Radikale OH und des Restgases RG eingesetzt werden, was zum Zeitpunkt des Hauptzündfunken HZ zu einer stabilen Zündung, einer schnellen Flammenausbreitung in der Vorkammer 7 und einer raschen Ausdehnung in Richtung des Hauptbrennraumes 5 führt. Dadurch kann eine stabile und schnelle Verbrennung im Hauptbrennraum 5 erreicht werden.

P A T E N T A N S P R Ü C H E

1. Verfahren zum Betreiben einer fremdgezündeten Viertakt-Brennkraftmaschine, bei der während eines Arbeitstaktes (AT) zumindest eines Arbeitszyklus Kraftstoff durch zumindest ein Kraftstoffeinspritzereignis (KE) direkt in einen Hauptbrennraum (5) eingespritzt wird, wobei vor der Verbrennung eines Kraftstoff/Luftgemisches Radikale (OH) durch zumindest einen Vorzündfunken (VZF) in einer Vorkammer (7) gebildet werden und das Kraftstoff/Luftgemisch durch zumindest einen Hauptzündfunken (HZF) in der Vorkammer (7) gezündet wird, dadurch gekennzeichnet, dass während eines Verdichtungstaktes (VT) des Arbeitszyklus Restgas in der als passive Vorkammer ausgebildeten Vorkammer (7) durch Einleiten von Kraftstoff/Luftgemisch aus dem Hauptbrennraum (5) verdichtet und die Luftzahl (λ) innerhalb der Vorkammer (7) verringert wird, dass während eines Vorzündfunkenzeitfensters (VZF) mindestens ein Vorzündfunke (VZ) in der passiven Vorkammer (7) initiiert und Radikale (OH) innerhalb der Vorkammer (7) erzeugt werden, dass eine Radikale (OH) enthaltende Gasteilmenge aus der Vorkammer (7) in ein mit der Vorkammer (7) strömungsverbundenes Radikalspeichervolumen (10) bewegt wird, und dass die Verbrennung des Radikale (OH) enthaltenden Kraftstoff/Luftgemisches durch Initiieren eines Hauptzündfunken (HZ) innerhalb eines Hauptzündfunkenzeitfensters (HZF) in der Vorkammer (7) eingeleitet wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Vorzündfunkenzeitfenster (VZF) einem Verdichtungstakt (VT) zumindest eines Arbeitszyklus, vorzugsweise einem Kurbelwinkelbereich zwischen 180° und 30° Kurbelwinkel (KW) vor dem oberen Totpunkt der Zündung (OTC), besonders vorzugsweise einem Kurbelwinkelbereich zwischen 120° und 80° Kurbelwinkel (KW) vor dem oberen Totpunkt der Zündung (OTC) - zugeordnet wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass das Hauptzündfunkenzeitfenster (HZF) einem Kurbelwinkelbereich zwischen -30° und $+30^\circ$ Kurbelwinkel (KW), bezogen auf den oberen Totpunkt der Zündung (OTC), zugeordnet wird.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest ein Vorzündfunke (VZ) an ein Kraftstoffeinspritzereignis (KE) gekoppelt wird, wobei zumindest ein Vorzündfunke (VZ) nach einer definierten Verzögerungsdauer (t_v) nach dem Kraftstoffeinspritzereignis (KE) initiiert wird, wobei vorzugsweise die Verzögerungsdauer (t_v) zwischen 40° und 10° Kurbelwinkel beträgt.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest ein Kraftstoffeinspritzereignis (KE) im Einlasstakt (ET) in einem Kurbelwinkelbereich zwischen 340° und 180° Kurbelwinkel (KW) vor dem oberen Totpunkt der Zündung (OTC) erfolgt.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest ein Kraftstoffeinspritzereignis (KE) im Verdichtungstakt (VT) in einem Kurbelwinkelbereich zwischen 180° und 30° Kurbelwinkel (KW) vor dem oberen Totpunkt der Zündung (OTC) erfolgt.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass ein erster Vorzündfunke (VZ) in einem Kurbelwinkelbereich zwischen 140° und 120° Kurbelwinkel (KW) vor dem oberen Totpunkt der Zündung (OTC) initiiert wird.
8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass ein zweiter Vorzündfunke in einem Kurbelwinkelbereich zwischen 100° und 80° Kurbelwinkel (KW) vor dem oberen Totpunkt der Zündung (OTC) initiiert wird.
9. Fremdgezündete Viertakt-Brennkraftmaschine mit zumindest einem Hauptbrennraum (5), in welchen zumindest eine Kraftstoffeinspritzeinrichtung (11) zur direkten Kraftstoffeinspritzung einmündet, und mit einer Zündeinheit (6) mit einer mit dem Hauptbrennraum (5) strömungsverbundenen passiven Vorkammer (7), in welche eine Zündeinrichtung (8) einmündet, zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Zündeinheit (6) ein mit der Vorkammer (7) strömungsverbundenes und/oder ein in dieses integriertes Radikalspeichervolumen (10) aufweist.

10. Brennkraftmaschine nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Zündeinheit (6) mit einem Hochspannungszündstromkreis verbunden ist, welcher ausgebildet ist, um mehrere Zündfunken (VZ, HZ) pro Arbeitszyklus zu erzeugen.
11. Brennkraftmaschine nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest zwei Kraftstoffeinspritzeinrichtungen (11) in den Hauptbrennraum (5) einmünden, wobei die Kraftstoffeinspritzeinrichtungen (11) mit unterschiedlichen Einspritzparametern und/oder unabhängig voneinander betreibbar sind.
12. Brennkraftmaschine nach einem der Ansprüche 9 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorkammer (7) über mehrere – vorzugsweise vier bis zwölf – Überströmkanäle (9) mit dem Hauptbrennraum (5) strömungsverbunden ist.
13. Brennkraftmaschine nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Überströmkanäle (9) jeweils einen Kreisquerschnitt mit einem Durchmesser zwischen 0,4 mm und 3,0 mm oder einen äquivalenten Querschnitt mit einer diesem Kreisquerschnitt entsprechenden Querschnittsfläche aufweisen.
14. Brennkraftmaschine nach einem der Ansprüche 9 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass das Radikalspeichervolumen (10) von den Überströmkanälen (9) weiter entfernt, ist als die Elektroden (8a, 8b) der Zündeinrichtung (8).
15. Brennkraftmaschine nach einem der Ansprüche 9 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass der Radikalspeichervolumen (10) mit der Vorkammer (7) über zumindest einen, vorzugsweise zwei bis acht Verbindungskanäle (12) strömungsverbunden ist.
16. Brennkraftmaschine nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Verbindungskanäle (12) jeweils einen Kreisquerschnitt mit einem Durchmesser zwischen 0,4 mm und 3,0 mm oder einen äquivalenten Querschnitt mit einer diesem Kreisquerschnitt entsprechenden Querschnittsfläche aufweisen.

17. Brennkraftmaschine nach einem der Ansprüche 1 bis 16, dadurch gekennzeichnet, dass das Radikalspeichervolumen (10) 10% bis 75%, vorzugsweise 20% bis 40%, des Volumens der Vorkammer (7) beträgt.

29.09.2022

FU/iv

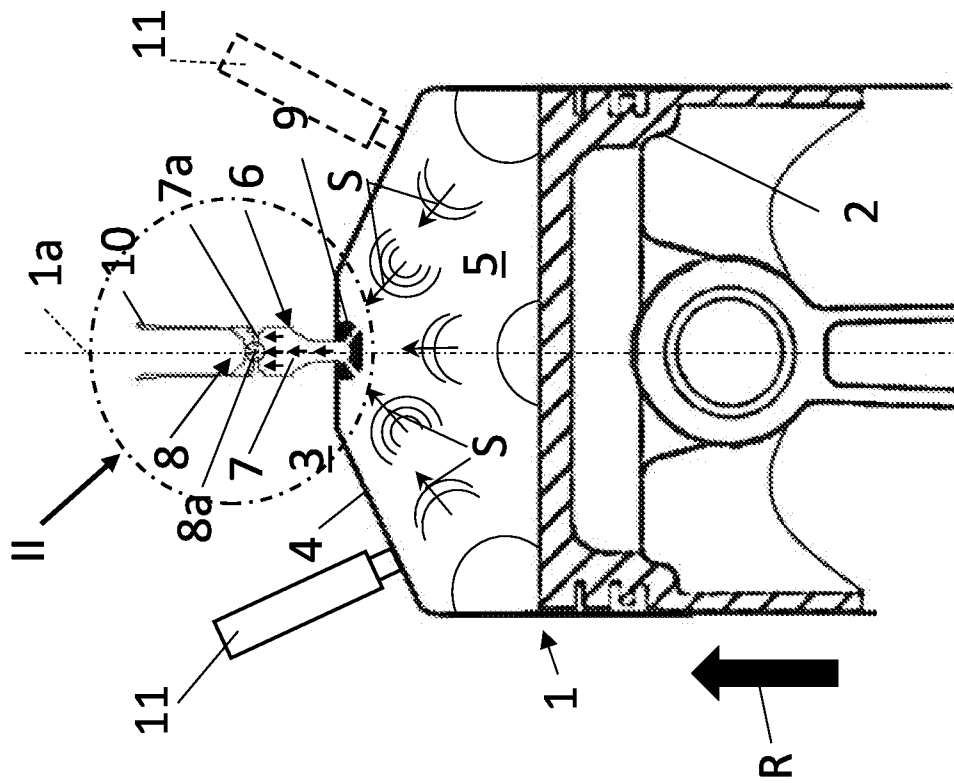


Fig. 1

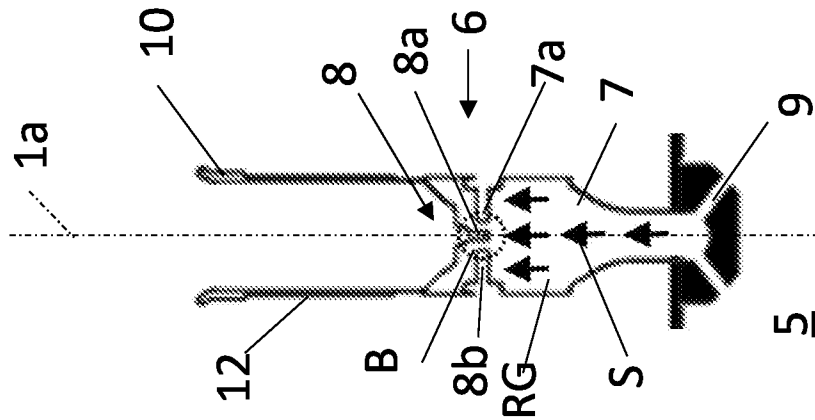


Fig. 2

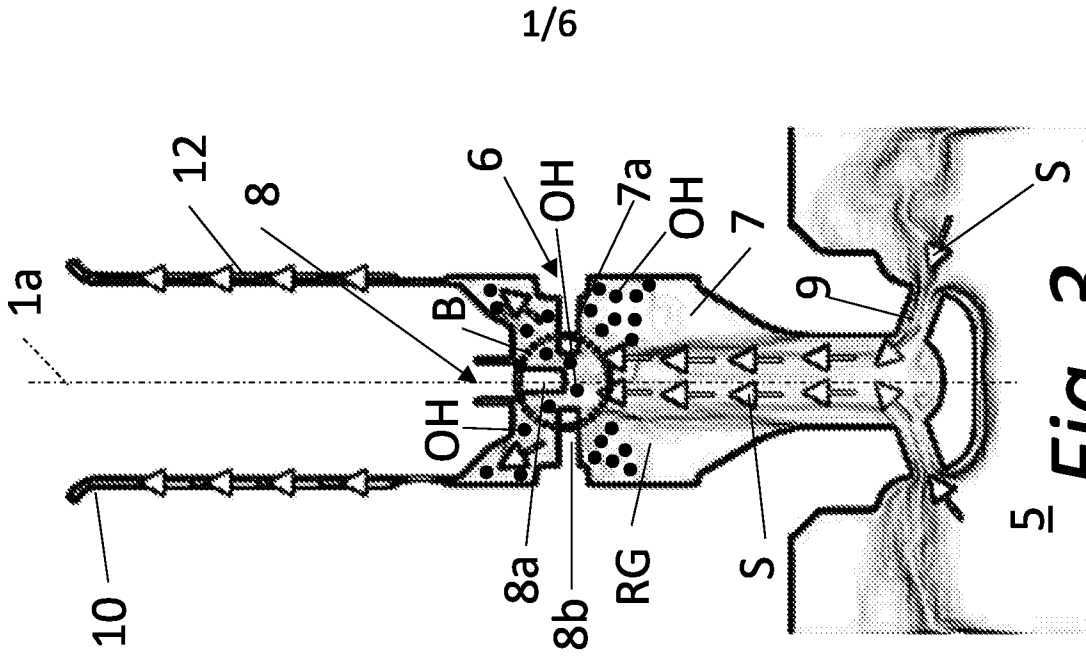


Fig. 3

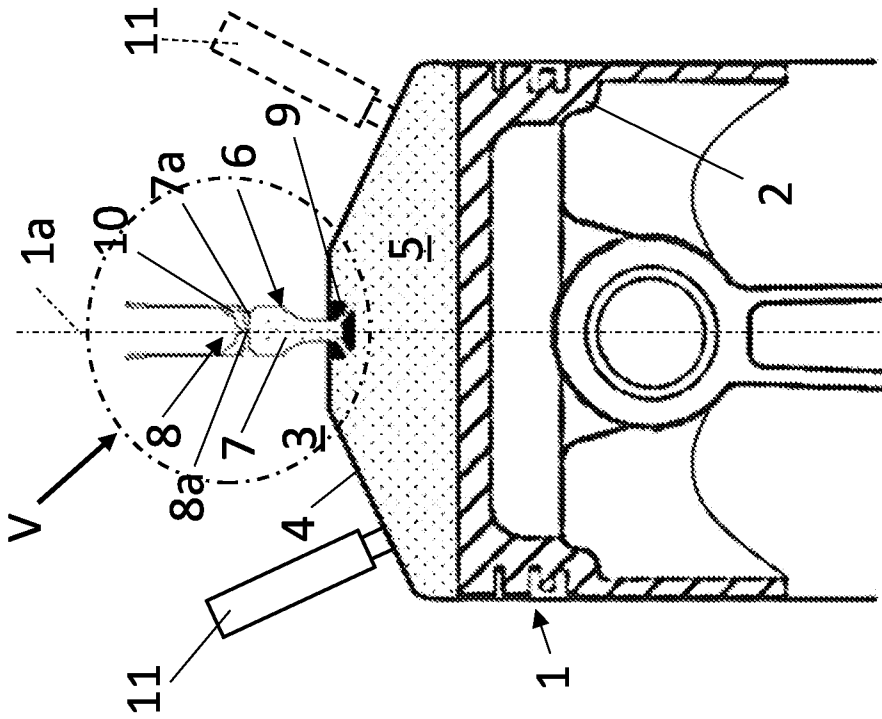


Fig. 4

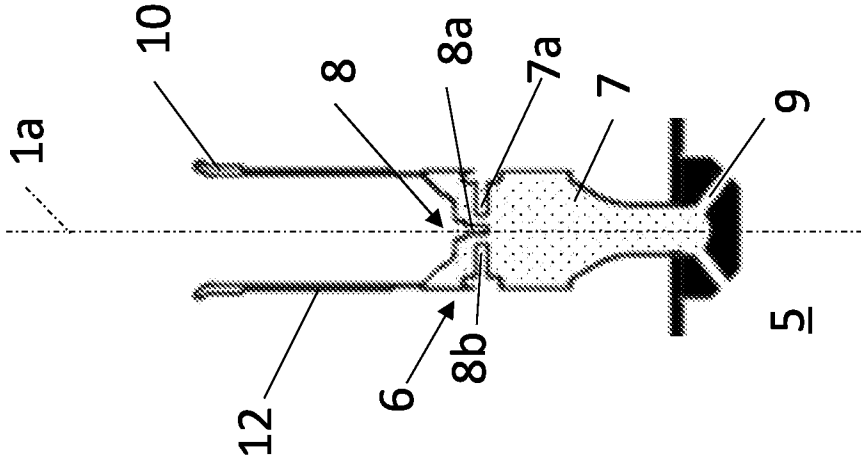


Fig. 5

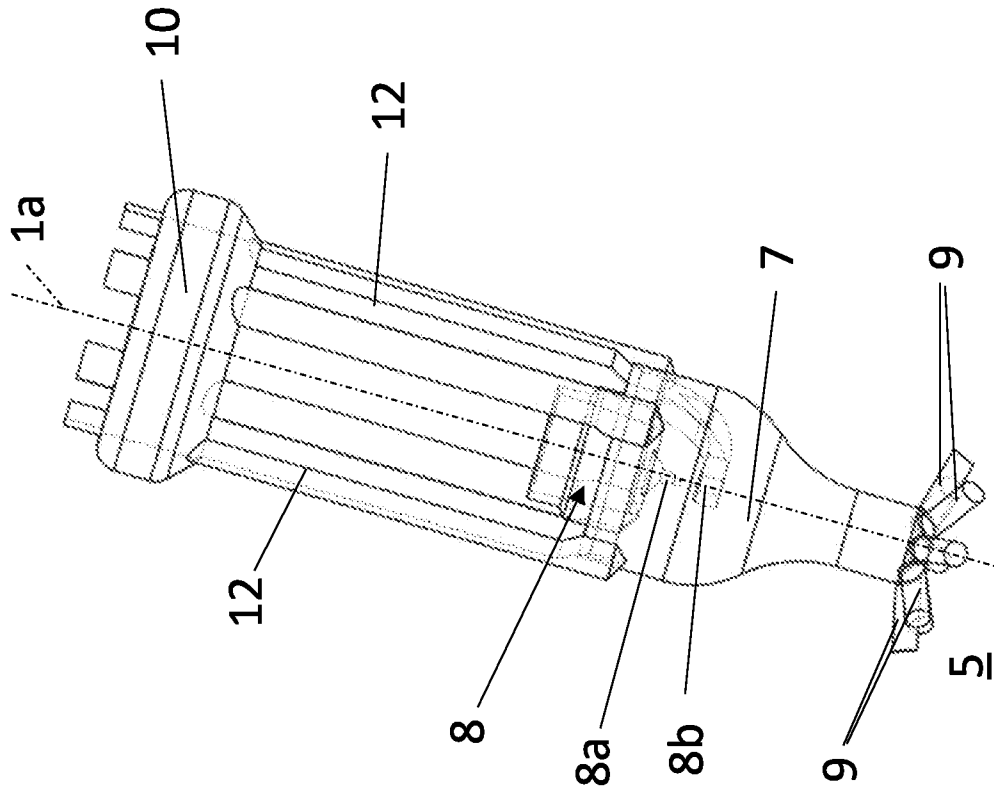


Fig. 8

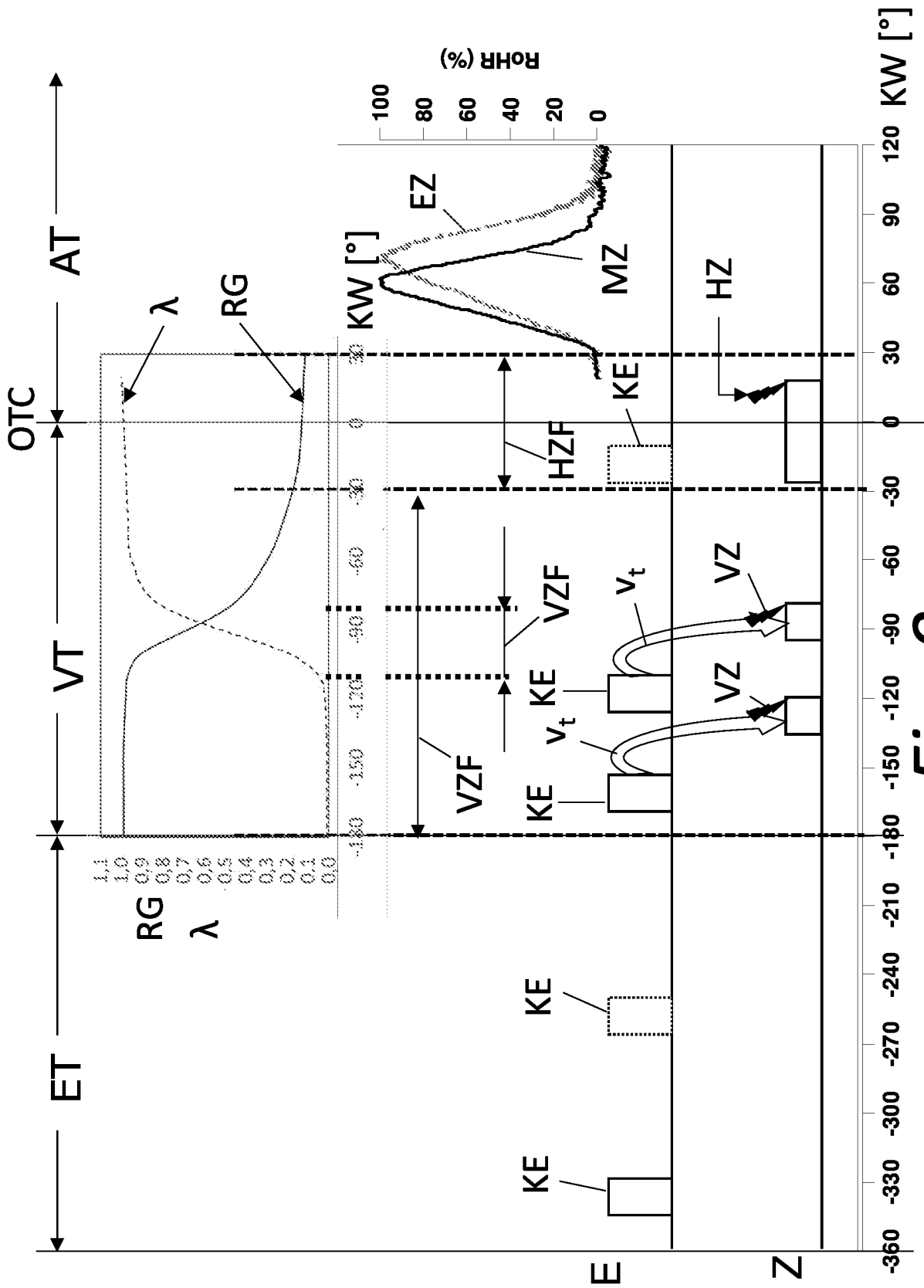


Fig. 9

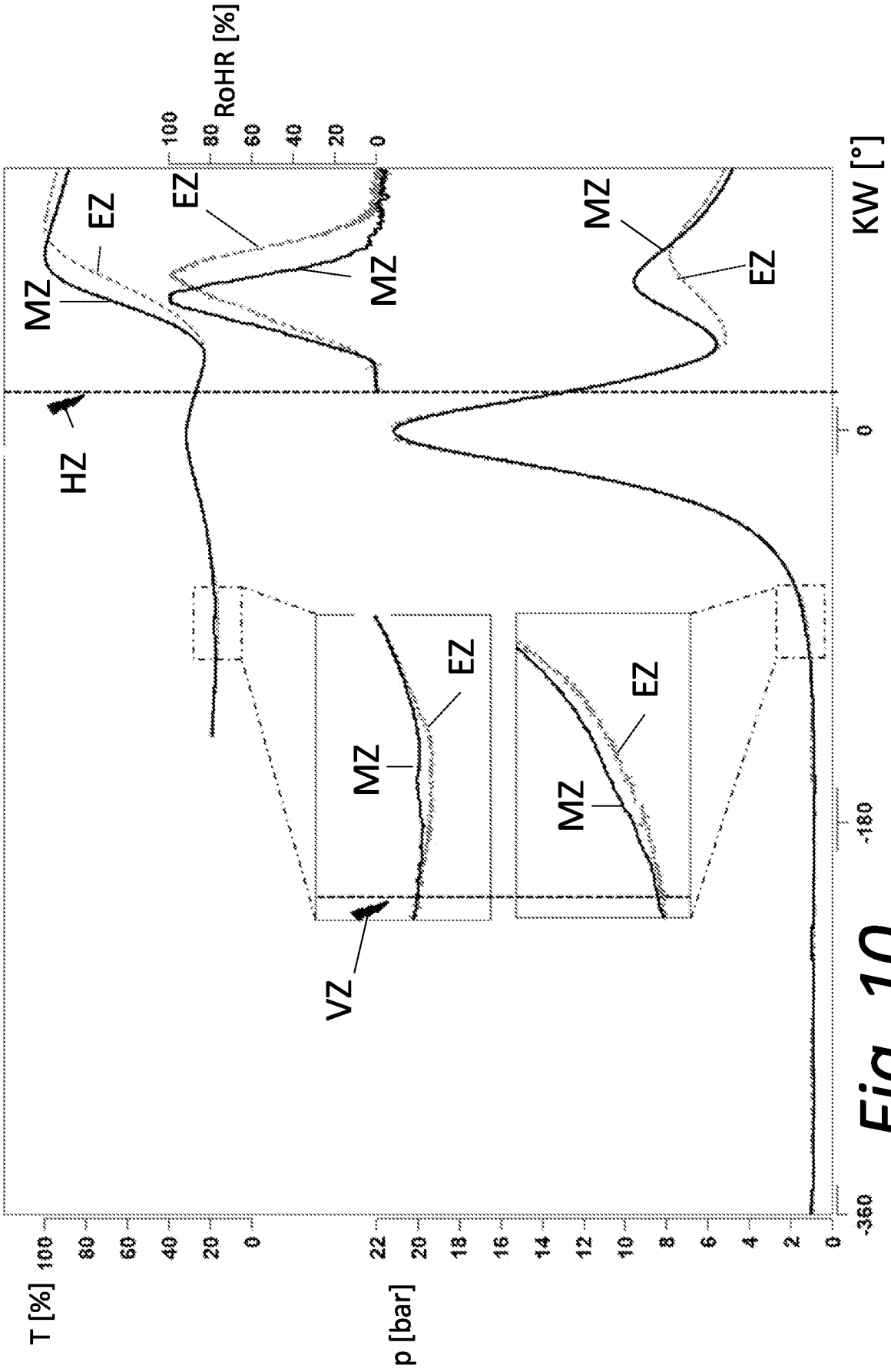


Fig. 10

(neue) P A T E N T A N S P R Ü C H E

1. Verfahren zum Betreiben einer fremdgezündeten Viertakt-Brennkraftmaschine, bei der während eines Arbeitstaktes (AT) zumindest eines Arbeitszyklus Kraftstoff durch zumindest ein Kraftstoffeinspritzereignis (KE) direkt in einen Hauptbrennraum (5) eingespritzt wird, wobei vor der Verbrennung eines Kraftstoff/Luftgemisches Radikale (OH) durch zumindest einen Vorzündfunken (VZF) in einer Vorkammer (7) gebildet werden und das Kraftstoff/Luftgemisch durch zumindest einen Hauptzündfunken (HZF) in der Vorkammer (7) gezündet wird, dadurch gekennzeichnet, dass während eines Verdichtungstaktes (VT) des Arbeitszyklus Restgas in der als passive Vorkammer ausgebildeten Vorkammer (7) durch Einleiten von Kraftstoff/Luftgemisch aus dem Hauptbrennraum (5) verdichtet und die Luftzahl (λ) innerhalb der Vorkammer (7) verringert wird, dass während eines Vorzündfunkenzeitfensters (VZF) mindestens ein Vorzündfunke (VZ) in der passiven Vorkammer (7) initiiert und Radikale (OH) innerhalb der Vorkammer (7) erzeugt werden, dass eine Radikale (OH) enthaltende Gasteilmenge aus der Vorkammer (7) in ein mit der Vorkammer (7) strömungsverbundenes Radikalspeichervolumen (10) bewegt wird, und dass die Verbrennung des Radikale (OH) enthaltenden Kraftstoff/Luftgemisches durch Initiieren eines Hauptzündfunkens (HZ) innerhalb eines Hauptzündfunkenzeitfensters (HZF) in der Vorkammer (7) eingeleitet wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Vorzündfunkenzeitfenster (VZF) einem Verdichtungstakt (VT) zumindest eines Arbeitszyklus, vorzugsweise einem Kurbelwinkelbereich zwischen 180° und 30° Kurbelwinkel (KW) vor dem oberen Totpunkt der Zündung (OTC), besonders vorzugsweise einem Kurbelwinkelbereich zwischen 120° und 80° Kurbelwinkel (KW) vor dem oberen Totpunkt der Zündung (OTC) - zugeordnet wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass das Hauptzündfunkenzeitfenster (HZF) einem Kurbelwinkelbereich zwischen -30° und $+30^\circ$ Kurbelwinkel (KW), bezogen auf den oberen Totpunkt der Zündung (OTC), zugeordnet wird.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest ein Vorzündfunke (VZ) an ein Kraftstoffeinspritzereignis (KE) gekoppelt wird, wobei zumindest ein Vorzündfunke (VZ) nach einer definierten Verzögerungsdauer (t_v) nach dem Kraftstoffeinspritzereignis (KE) initiiert wird, wobei vorzugsweise die Verzögerungsdauer (t_v) zwischen 40° und 10° Kurbelwinkel beträgt.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest ein Kraftstoffeinspritzereignis (KE) im Einlasstakt (ET) in einem Kurbelwinkelbereich zwischen 340° und 180° Kurbelwinkel (KW) vor dem oberen Totpunkt der Zündung (OTC) erfolgt.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest ein Kraftstoffeinspritzereignis (KE) im Verdichtungstakt (VT) in einem Kurbelwinkelbereich zwischen 180° und 30° Kurbelwinkel (KW) vor dem oberen Totpunkt der Zündung (OTC) erfolgt.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass ein erster Vorzündfunke (VZ) in einem Kurbelwinkelbereich zwischen 140° und 120° Kurbelwinkel (KW) vor dem oberen Totpunkt der Zündung (OTC) initiiert wird.
8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass ein zweiter Vorzündfunke in einem Kurbelwinkelbereich zwischen 100° und 80° Kurbelwinkel (KW) vor dem oberen Totpunkt der Zündung (OTC) initiiert wird.
9. Fremdgezündete Viertakt-Brennkraftmaschine mit zumindest einem Hauptbrennraum (5), in welchen zumindest eine Kraftstoffeinspritzeinrichtung (11) zur direkten Kraftstoffeinspritzung einmündet, und mit einer Zündeinheit (6) mit einer mit dem Hauptbrennraum (5) strömungsverbundenen passiven Vorkammer (7), in welche eine Zündeinrichtung (8) einmündet, wobei die Zündeinheit (6) ein mit der Vorkammer (7) strömungsverbundenes und/oder ein in dieses integriertes Radikalspeichervolumen (10) aufweist, zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Zündeinheit (6) mit einem Hochspannungszündstromkreis verbunden ist, welcher ausgebildet ist, um mehrere Zündfunken (VZ, HZ) pro Arbeitszyklus zu erzeugen.

10. Brennkraftmaschine nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest zwei Kraftstoffeinspritzeinrichtungen (11) in den Hauptbrennraum (5) einmünden, wobei die Kraftstoffeinspritzeinrichtungen (11) mit unterschiedlichen Einspritzparametern und/oder unabhängig voneinander betreibbar sind.
11. Brennkraftmaschine nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorkammer (7) über mehrere – vorzugsweise vier bis zwölf – Überströmkanäle (9) mit dem Hauptbrennraum (5) strömungsverbunden ist.
12. Brennkraftmaschine nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Überströmkanäle (9) jeweils einen Kreisquerschnitt mit einem Durchmesser zwischen 0,4 mm und 3,0 mm oder einen äquivalenten Querschnitt mit einer diesem Kreisquerschnitt entsprechenden Querschnittsfläche aufweisen.
13. Brennkraftmaschine nach einem der Ansprüche 9 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass das Radikalspeichervolumen (10) von den Überströmkanälen (9) weiter entfernt, ist als die Elektroden (8a, 8b) der Zündeinrichtung (8).
14. Brennkraftmaschine nach einem der Ansprüche 9 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass der Radikalspeichervolumen (10) mit der Vorkammer (7) über zumindest einen, vorzugsweise zwei bis acht Verbindungskanäle (12) strömungsverbunden ist.
15. Brennkraftmaschine nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass die Verbindungskanäle (12) jeweils einen Kreisquerschnitt mit einem Durchmesser zwischen 0,4 mm und 3,0 mm oder einen äquivalenten Querschnitt mit einer diesem Kreisquerschnitt entsprechenden Querschnittsfläche aufweisen.
16. Brennkraftmaschine nach einem der Ansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass das Radikalspeichervolumen (10) 10% bis 75%, vorzugsweise 20% bis 40%, des Volumens der Vorkammer (7) beträgt.

16.05.2023
FU/iv