



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2006 014 996 A1** 2007.10.04

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2006 014 996.3**

(22) Anmeldetag: **31.03.2006**

(43) Offenlegungstag: **04.10.2007**

(51) Int Cl.⁸: **F02D 21/08** (2006.01)

F02D 13/02 (2006.01)

F02D 45/00 (2006.01)

(71) Anmelder:

Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE

(72) Erfinder:

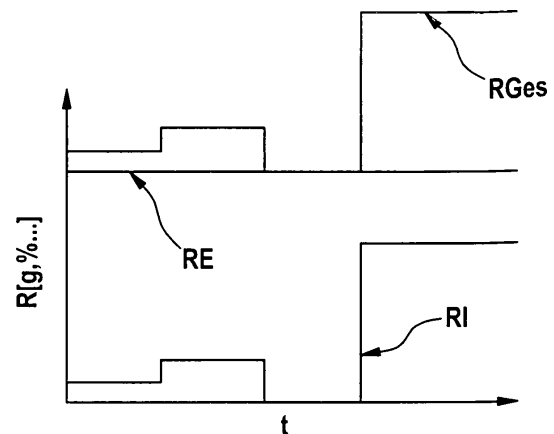
Casal Kulzer, Andre-Francisco, 71032 Böblingen, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Betrieb einer Brennkraftmaschine**

(57) Zusammenfassung: Verfahren zum Betrieb einer Brennkraftmaschine, insbesondere eine Ottomotors mit Benzindirekteinspritzung, in kontrollierter Selbstzündung, wobei die Brennkraftmaschine (1) einen Brennraum (2), mindestens ein Einlassventil (EV) und mindestens ein Auslassventil (AV), deren Öffnungszeiten veränderbar sind, umfasst sowie eine regelbare Abgasrückführung (9, 10) umfasst und ein zündfähiges Gasgemisch, das Restgas enthält, in dem Brennraum (2) in einem Verdichtungstakt (V) verdichtet wird, wobei das Gasgemisch gegen Ende des Verdichtungstaktes (V) selbstzündet.

Das Restgas (R_{ges}) gelangt bzw. verbleibt durch interne und externe Abgasrückführung (R_E , R_I) in den (dem) Brennraum (2).



Beschreibung

Stand der Technik

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betrieb einer Brennkraftmaschine, insbesondere eines Ottomotors mit Benzindirekteinspritzung, in kontrollierter Selbstzündung. Die Erfindung betrifft des Weiteren ein Steuergerät zur Durchführung des Verfahrens.

[0002] Beim Betrieb einer Brennkraftmaschine im HCCI-Modus (Homogenous Charge Compression Ignition), der manchmal auch als CAI (Controlled Auto Ignition), ATAC (Active Thermo Atmosphere Combustion) oder TS (Toyota Soken) bezeichnet wird, erfolgt die Entzündung des Luft/Kraftstoff-Gemisches nicht durch Fremdzündung, sondern durch kontrollierte Selbstzündung. Der HCCI-Verbrennungsprozess kann beispielsweise durch einen hohen Anteil an heißen Restgasen und/oder durch eine hohe Verdichtung und/oder eine hohe Eintrittslufttemperatur hervorgerufen werden. Voraussetzung für die Selbstzündung ist ein ausreichend hohes Energieniveau im Zylinder. Im HCCI-Modus betreibbare Brennkraftmaschinen, bei denen es sich sowohl um Otto- als auch Dieselmotoren handeln kann, sind bekannt, siehe z.B. US 6,260,520, US 6.390,054, DE 199 27 479 und WO 98/10179.

[0003] Die HCCI-Verbrennung hat gegenüber einer herkömmlichen fremdgezündeten Verbrennung den Vorteil eines reduzierten Kraftstoffverbrauchs und geringerer Schadstoffemissionen. Allerdings ist die Regelung des Verbrennungsprozesses und insbesondere die Steuerung der Selbstzündung des Gemisches nicht einfach. So bedarf es einer Regelung von den Verbrennungsprozess beeinflussenden Stellgrößen für z.B. die Kraftstoffeinspritzung (Einspritzmenge bzw. Einspritzzeitpunkt und -dauer), interne oder externe Abgasrückführung, Einlass- und Auslassventile (variable Ventilsteuerung), Abgasgegendruck (Abgasklappe), ggf. eine Zündunterstützung, Lufteintrittstemperatur, Kraftstoffqualität und Verdichtungsverhältnis (bei Brennkraftmaschinen mit veränderlichem Verdichtungsverhältnis).

[0004] Aus dem Stand der Technik sind für Brennkraftmaschinen mit Saugrohreinspritzung Ansätze zum Erzeugen einer selbstzündfähigen Benzin-Luft-Gemischladung bekannt, bei denen ein Benzin-Luft-Gemisch von dem Kolben der Brennkraftmaschine angesaugt wird und unter Einbeziehung von Zusatzmassnahmen, die der Aufheizung des Gemisches in dem Brennraum dienen, zur Selbstzündung zu bringen.

[0005] Als Zusatzmassnahmen zum Aufheizen des Gemisches sind bekannt:

1. Variation der Füllung des Brennraums über ei-

nen variablen Ventiltrieb. Ab einer definierten Luftmenge, die über die Öffnungszeiten der Einlassventile beeinflusst werden kann, erhitzt sich das komprimierte Benzin-Luftgemisch. Diese Massnahme weist jedoch Hub- zu-Hub Streuungen der jeweiligen Einzelzylinder auf, sowie zylinderindividuelle Abweichungen einer Brennkraftmaschine. Ausserdem können die Brennbeginne der jeweiligen Arbeitszyklen und der einzelnen Zylinder nur schwer kontrolliert werden.

2. Hohe Abgasrückführungsrate. Durch die Rückführung heisser Abgase in den Brennraum kann die Temperatur des in dem Brennraum eingeschlossenen Kraftstoff- Brennluft-Gemisches vor dem Einsetzen der Verbrennung deutlich erhöht werden. Die eigentliche Verbrennungstemperatur während der Verbrennung des Benzin-Luft-Gemisches wird durch die Abgasrückführung jedoch verringert, da durch das Abgas der Sauerstoffgehalt in dem Brennraum reduziert wird. Dadurch wird die Stickoxidemission verringert. Das Abgas dient als Inertgas, durch das die Temperatur der Brennluft erhöht wird und das sich zwar während der Verbrennung in dem Brennraum befindet, an der eigentlichen Verbrennungsreaktion jedoch kaum beteiligt ist. Der Nachteil dieser Massnahme besteht darin, dass die geeignete Abgasmenge nur schwer zu steuern ist. Es handelt sich um eine träges System, das Hubzu-Hub Streuungen und eine ungleichmässige Verteilung auf die Brennräume aller Zylinder aufweist.

3. Aufladung der Brennluft. Durch die Aufladung wird die Brennluft verdichtet und ihre Temperatur erhöht. Nachteilig ist jedoch auch bei dieser Massnahme, dass es sich um ein relativ träges System handelt, das Füllungsunterschiede in den Brennräumen der einzelnen Zylinder aufweist.

[0006] Nachteilig an bekannten Verfahren nach Stand der Technik ist, dass sich die Parameter für die kontrollierte Selbstzündung, insbesondere die Gastemperatur im Brennraum, während des Verdichtungstaktes nur unzureichend steuern und regeln lassen.

Offenbarung der Erfindung

[0007] Dieses Problem wird gelöst durch ein Verfahren zum Betrieb einer Brennkraftmaschine, insbesondere eines Ottomotors mit Benzindirekteinspritzung, in kontrollierter Selbstzündung, wobei die Brennkraftmaschine einen Brennraum, mindestens ein Einlaßventil und mindestens ein Auslaßventil, deren Öffnungszeiten veränderbar sind, umfasst, sowie eine regelbare Abgasrückführung umfasst und wobei ein zündfähiges Gemisch, das Restgas enthält, in dem Brennraum in einem Verdichtungstakt verdichtet wird, wobei das Gasgemisch gegen Ende des Verdichtungstaktes selbstzündet, wobei das Restgas durch interne und externe Abgasrückführung in den

Brennraum gelangt bzw. dort verbleibt. Das zündfähige Gemisch ist üblicherweise ein Kraftstoff-Restgas-Luft-Gemisch. Die Veränderbarkeit der Öffnungszeiten des Einlaßventils und des Auslaßventils werden insbesondere durch eine so genannte elektrohydraulische Ventilsteuerung (EHVS) ermöglicht. Hier sind aber auch andere Verstellungen der Ventilsteuerzeiten, z.B. durch verstellbare Nockenwellen, möglich. Unter Restgas wird hier Gas verstanden, das aus einem vorangegangenen Arbeitszyklus in dem Brennraum verbleibt bzw. wieder in diesen zurückbefördert wird. Es handelt sich hier also um verbranntes Kraftstoff-Luft-Gemisch. Vorzugsweise ist vorgesehen, dass die Temperatur des Gasgemisches durch die Anteile von Restgas aus externer und von Restgas aus interner Abgasrückführung an der gesamten Abgasrückführung gesteuert wird. Das Restgas aus interner Abgasrückführung ist in der Regel deutlich heißer als das Restgas aus externer Abgasrückführung. Durch eine entsprechende Mischung beider Restgase lässt sich die Temperatur über weite Bereiche steuern. Mit Hilfe dieser Steuerung wird eine für die kontrollierte Selbstzündung optimale Temperatur des Gasgemisches in dem Brennraum während des Verdichtungstaktes eingestellt. Dabei ist vorzugsweise vorgesehen, dass durch die externe Abgasrückführung eine Grundrate der Abgasrückführung, die über mehr als einen Arbeitszyklus unverändert bleibt, bereitgestellt wird. Die Grundrate wird nur langsam verändert, es handelt sich dabei also um eine träge Regelung der Temperatur des Gasgemisches in dem Verbrennungsraum. Vorzugsweise ist des Weiteren vorgesehen, dass zu der Grundrate eine Zusatzrate an Restgas aus interner Abgasrückführung addiert wird. Die Zusatzrate ist schnell regelbar und kann daher vorzugsweise zyklustreu gesteuert werden. Mit zyklustreu ist hier gemeint, dass für jeden Arbeitszyklus eine unterschiedliche Zusatzrate an Restgas eingestellt wird.

[0008] Das eingangs genannte Problem wird auch gelöst durch ein Steuergerät für eine Brennkraftmaschine, insbesondere einen Ottomotor mit Benzindirekteinspritzung, wobei die Brennkraftmaschine einen Brennraum, mindestens ein Einlaßventil und mindestens ein Auslaßventil, deren Öffnungszeiten veränderbar sind, umfasst, sowie eine regelbare Abgasrückführung und ein zündfähiges Gasgemisch, das Restgas enthält, in dem Brennraum in einem Verdichtungstakt verdichtet wird, wobei das Gasgemisch gegen Ende des Verdichtungstaktes selbstzündet, wobei das Restgas durch interne und externe Abgasrückführung in dem Brennraum gelangt bzw. verbleibt.

[0009] Nachfolgend wird ein Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung anhand der beiliegenden Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigen:

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0010] [Fig. 1](#) eine Skizze eines Zylinders einer Brennkraftmaschine;

[0011] [Fig. 2](#) ein Diagramm des Brennraumdruckes über dem Kurbelwellenwinkel;

[0012] [Fig. 3](#) Öffnungs- und Schließzeiten der Gaswechselventile;

[0013] [Fig. 4](#) Restgasanteile aus innerer und äußerer Abgasrückführung über der Zeit.

Ausführungsformen der Erfindung

[0014] Anhand der [Fig. 1](#) wird zunächst das technologische Umfeld der Erfindung beschrieben. Dargestellt ist ein Zylinder **1** einer ansonsten nicht näher dargestellten Brennkraftmaschine, die in der Regel aus mehreren Zylindern besteht. Der Zylinder **1** umfasst einen Brennraum **2**, in dem ein Kolben **3** mit einem Pleuel **4** verschiebbar angeordnet ist. Das Pleuel **4** ist mit einer nicht dargestellten Kurbelwelle verbunden. In den Brennraum **2** mündet ein Einlaß **5** mit einem Einlaßventil **6**. Des Weiteren mündet in den Brennraum **2** ein Auslaß **7** mit einem Auslaßventil AV. Sowohl das Einlaßventil EV als auch das Auslaßventil AV werden elektrohydraulisch angesteuert, die Brennkraftmaschine ist also mit einer so genannten elektrohydraulischen Ventilsteuerung (EHVS) ausgestattet. Eine elektrohydraulische Ventilsteuerung ermöglicht eine Ansteuerung der Ventile unabhängig von der Kurbelwellenstellung. Über den Einlaß **5** wird Luft aus der Umgebung in den Brennraum **2** angesaugt. Die Verbrennungsabgase werden über den Auslaß **7** wieder an die Umgebung abgegeben. Eine Abgasrückführung **9** mit einem Regelventil **10** ermöglicht eine Rückführung der Abgase aus dem Auslaß **7** zurück zum Einlaß **5**. Eine derartige Rückführung wird als äußere Abgasrückführung bezeichnet. Durch eine geeignete Öffnungszeit des Auslaßventils AV, z.B. ein Öffnen des Auslaßventils AV während des Ansaugtaktes der Brennkraftmaschine, kann eine so genannte innere Abgasrückführung realisiert werden, indem nämlich im Ansaugtakt des Zylinders **1** Abgas aus dem Auslaß **7** in den Brennraum zurückströmt bzw. zurückgesaugt wird.

[0015] In den Brennraum münden in bekannter Art und Weise eine Zündkerze **11** sowie ein Injektor **12**. Der Injektor **12** ist vorzugsweise ein piezoelektrischer Injektor oder ein elektrohydraulischer Injektor. Der Injektor **12** ist über eine Hochdruckleitung **13** mit einem nicht dargestellten Hochdruck-Rail der Brennkraftmaschine verbunden. Die Hochdruckleitung **13** führt Kraftstoff zu dem Injektor **12**. Der Injektor **12** wird elektrisch durch ein Steuergerät **14** angesteuert, entsprechend werden durch das Steuergerät **14** auch die Zündkerze **11** sowie das Einlaßventil EV und das

Auslaßventil AV gesteuert. Statt eines Einlaßventils EV und eines Auslaßventils AV können hier auch mehrere Einlaßventile EV und mehrere Auslaßventile AV vorgesehen sein.

[0016] Bei elektrohydraulischen, nockenwellenlosen Ventilsteuerungen (EHVS), wie sie z.B. aus der DE 10127205 und der DE 10134644 bekannt sind, können Hub- und Steuerzeiten der Gaswechselventile einer Brennkraftmaschine prinzipiell frei programmiert werden. Die Gaswechselventile sind hier das Einlaßventil EV und das Auslaßventil AV.

[0017] [Fig. 2](#) zeigt ein Diagramm des Brennraumdruckes in dem Brennraum **2** der Brennkraftmaschine über dem Kurbelwellenwinkel in grad Kurbelwelle ($^{\circ}$ KW). Über der Ordinate dargestellt ist ein Kurbelwellenwinkel von -180° bis 540° , über der Abszisse ist der Brennraumdruck in bar aufgetragen. Mit 0° ist hier willkürlich der Obere Totpunkt im Ladungswechsel L-OT gewählt. Der Ladungswechsel dient in bekannter Weise dem Ausstoßen verbrannter Abgase, dies findet hier zwischen -180° und 0° Kurbelwelle statt, und dem Ansaugen frischer Umgebungsluft bzw. eines Kraftstoff-Luft-Gemisches, dies findet hier im Kurbelwellenwinkelbereich von $0-180^{\circ}$ statt. Eine Kurbelwellenumdrehung weiter, bei 360° Kurbelwelle, ist der Obere Totpunkt der Zündung (Zündungs-OT) erreicht. Zwischen 180° Kurbelwelle und 360° Kurbelwellenwinkel findet der Verdichtungstakt statt, zwischen 360° Kurbelwellenwinkel und 540° Kurbelwellenwinkel findet die Expansion der verbrennenden Gase statt. Die einzelnen Takte sind in [Fig. 2](#) bezeichnet mit Ausstoßen AU von -180° bis 0° , Ansaugen AN von 0° bis 180° , Verdichtungstakt (Kompression) V von 180° bis 360° und Expansion (Verbrennung) E von 360° bis 540° . Im Verdichtungstakt V wird das Luft- bzw. Kraftstoff-Luft-Gemisch oder Kraftstoff-Luft-Abgas-Gemisch verdichtet und dabei erhitzt. Das Gemisch wird in der Regel kurz vor Erreichen des Zündungs-OTs gezündet. Dies kann wie beim Ottomotor üblich durch Fremdzündung oder gemäß der erfindungsgemäßen Betriebsart durch eine kontrollierte Selbstzündung erfolgen. Die Zündung des Gemisches führt in bekannter Art und Weise zu einer Druckerhöhung, die im sich daran anschließenden Arbeitstakt der Expansion E in mechanische Energie umgewandelt wird.

[0018] In [Fig. 3](#) ist das Öffnen und Schließen jeweils des Einlaßventiles IV sowie des Auslaßventiles EV dargestellt. Das Auslaßventil EV wird wie bei einem 4-Takt-Motor üblich im Ausstoßtakt zwischen -180° bis 0° Kurbelwelle geöffnet, entsprechend wird das Einlaßventil IV im Bereich des Ansaugtaktes zwischen 0° Kurbelwelle und 180° Kurbelwellenwinkel geöffnet. In [Fig. 3](#) sind vier Fälle dargestellt, die jeweils unterschiedliche Ventilöffnungsstrategien repräsentieren. In [Fig. 3.1](#) ist die übliche Ventilöffnungsstrategie dargestellt, bei der das Auslaßventil

EV kurz vor Erreichen des Unteren Totpunktes UT geöffnet wird und in etwa bis -90° Kurbelwelle geöffnet bleibt. Dadurch verbleibt ein Teil der verbrannten Abgase im Brennraum **26**. Das Einlaßventil IV wird erst etwa bei 90° Kurbelwellenwinkel geöffnet sobald Druckgleichgewicht zwischen Brennraum **26** und Ansaugtrakt besteht und verbleibt geöffnet in etwa bis zum Erreichen des Unteren Totpunktes. Auf diese Art und Weise wird eine so genannte negative Ventilüberlappung bewirkt, die dafür sorgt, dass ein Teil der verbrannten Abgase im Brennraum **26** verbleibt und zur Erwärmung des im Ansaugtakt in den Brennraum eingebrachten Kraftstoff-Luft-Gemisches dient. Auf diese Art und Weise wird im Brennraum **26** ein Kraftstoff-Luft-Abgas-Gemisch erzeugt.

[0019] [Fig. 3.2](#) zeigt eine Alternative Ansteuerstrategie für die Einlaß- und Auslaßventile. In diesem Fall bleibt das Auslaßventil EV zwischen Unterem Totpunkt UT und Oberem Totpunkt OT geöffnet, das Einlaßventil bleibt entsprechend zwischen Oberem Totpunkt und Unterem Totpunkt geöffnet. Es findet eine sehr kurze Ventilüberschneidung im Bereich des Oberen Totpunktes statt. Während der Öffnung des Einlaßventiles IV wird zusätzlich im Bereich von etwa 90° Kurbelwellenwinkel bis kurz vor Erreichen des Unteren Totpunktes UT zusätzlich das Auslaßventil EV geöffnet. Dadurch sind in diesem Bereich sowohl Einlaßventil als auch Auslaßventil geöffnet, so dass ein Teil der ausgestoßenen Abgase über das Auslaßventil wieder in den Brennraum zurückbefördert wird.

[0020] In [Fig. 3.3](#) ist eine weitere Ventilsteuerstrategie dargestellt, bei dieser bleibt das Auslaßventil EV zwischen dem Unteren Totpunkt UT über dem Oberen Totpunkt OT bis nahe an den Unteren Totpunkt bei etwa 180° Kurbelwellenwinkel geöffnet. Zusätzlich wird das Einlaßventil IV in etwa zwischen 90° Kurbelwellenwinkel und dem Unteren Totpunkt UT bei 180° Kurbelwellenwinkel geöffnet. Dadurch wird zwischen Unterem Totpunkt bei -180° Kurbelwellenwinkel und Erreichen des Oberen Totpunktes bei 0° Kurbelwellenwinkel verbranntes Abgas aus dem Brennraum **26** ausgestoßen und sodann zwischen 0° Kurbelwellenwinkel und dem Schließen des Auslaßventils EV hier bei etwa 120° Kurbelwellenwinkel wieder aus der Abgasanlage in dem Brennraum **26** angesaugt. Das Einlaßventil IV ist hier zwischen etwa 90° Kurbelwellenwinkel und dem Erreichen des Unteren Totpunktes bei 180° Kurbelwellenwinkel geöffnet, so dass in dieser Zeit Frischluft angesaugt werden kann. Auch hier tritt eine Ventilüberlappung auf, in diesem Fall etwa zwischen 90° Kurbelwellenwinkel und 120° Kurbelwellenwinkel.

[0021] [Fig. 3.4](#) zeigt eine weitere Variante einer Ventilsteuerstrategie, bei dieser ist das Auslaßventil EV zwischen dem Unteren Totpunkt bei -180° Kurbelwelle und dem Oberen Totpunkt bei 180° Kurbel-

welle geöffnet, das Einlaßventil IV ist etwa zwischen -60° Kurbelwellenwinkel über dem Oberen Totpunkt bei 0° Kurbelwellenwinkel bis zum Unteren Totpunkt bei 180° Kurbelwellenwinkel geöffnet. Es tritt hier also eine Ventilüberschneidung in etwa zwischen -60° Kurbelwellenwinkel und dem Erreichen des Oberen Totpunktes bei 0° Kurbelwellenwinkel auf. Dadurch wird ein Teil des Abgases in den Ansaugtakt gedrückt und während der Öffnungszeit des Einlaßventiles zwischen Oberem Totpunkt bei 0° Kurbelwellenwinkel und Unteren Totpunkt bei 180° Kurbelwellenwinkel wieder in den Brennraum **26** zurück transportiert.

[0022] Die Ventilsteuerung im Ausführungsbeispiel der [Fig. 3.1](#) bewirkt eine heiße Restgasmenge im Brennraum **26** und ermöglicht eine geschichtete Einspritzung. Diese Ventilsteuerstrategie ist also für den Schichtbetrieb ideal. Demgegenüber ist die anhand der [Fig. 3.4](#) dargestellte Ventilsteuerung mit einer warmen Restgasmenge im Brennraum **26** verbunden und ermöglicht eine homogene Ladung des Brennraumes **26** und damit einen homogenen Betrieb der Brennkraftmaschine. Die Ventilsteuerung entsprechend der Ausführungsbeispiele nach [Fig. 3.2](#) und [Fig. 3.3](#) sind jeweils Übergangs-Lösungen zwischen den in [Fig. 3.1](#) und [Fig. 3.4](#) dargestellt Extremen.

[0023] In unterschiedlichen Lastpunkten werden unterschiedliche Ventil- und Einspritzstrategien benötigt. Bei sehr niedrigen Lasten ist eine hohe Restgasrate notwendig um die benötigte Selbstzündtemperatur bereitzustellen. An diesem Betriebspunkt wird die Restgasspeicherung gemäß [Fig. 3.1](#) im Brennraum **26** verwendet, wobei das Auslaßventil deutlich vor dem Gaswechsel-OT geschlossen wird. Die Verdichtung der im Zylinder befindlichen Restgasmasse führt zu einer weiteren Temperaturerhöhung. Die Einspritzung erfolgt, sobald der Kolben sich im Bereich des Gaswechsel-OTs befindet. Aufgrund der hohen Temperaturen kommt es zu Zerfallsreaktionen des Kraftstoffes in reaktivere Zwischenprodukte, die den Selbstzündzeitpunkt maßgeblich beeinflussen und hier den Selbstzündzeitpunkt reduzieren. Das Einlaßventil wird geöffnet, sobald Druckgleichgewicht zwischen Saugrohr und Brennraum herrscht, um Strömungsverluste zu vermeiden.

[0024] Hin zu höheren Lasten besteht die Gefahr, dass sich die Zylinderladung aufgrund der hohen Temperaturen zu früh entzündet und die darauf folgende sehr schnelle Verbrennung zu Klopfen führt, da hier kleinere Mengen an Restgas vorhanden sind. Daher kommt mit steigender Last die positive Ventilüberschneidung zum Einsatz, wie diese in den Ausführungsbeispielen zur Ventilsteuerung gemäß der [Fig. 3.2](#), [Fig. 3.3](#) sowie [Fig. 3.4](#) dargestellt sind. Dabei wird die benötigte Restgasmenge entweder aus dem Abgas- oder dem Einlaßkanal zurückgesaugt. Die Einspritzung erfolgt dann im Ansaugtakt, wobei

der Zeitpunkt der Einspritzung Einfluss auf die Homogenität der Zylinderladung nimmt. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, eine weitere Einspritzung im Kompressionstakt abzusetzen. Hier bewirkt die Verdampfungsenthalpie des Kraftstoffes eine Kühlung der Zylinderladung, was einer zu frühen Selbstzündung und klopfenden Verbrennung entgegenwirkt. Die Einspritzung während des Kompressionstaktes kann auch mit einer Einspritzung in die verdichtete Restgasmenge kombiniert werden, sofern die Ventilsteuerstrategie der Restgasspeicherung gemäß [Fig. 3.1](#) verwendet wird. Dabei ist auch die Kombination von mehreren Einspritzungen beginnend im Bereich des Gaswechsel-OT über den Ansaugtakt bis in den Kompressionstakt wie dies in [Fig. 3](#) dargestellt ist möglich.

[0025] Durch (teilweises) Öffnen des Reglerventils **10** wird die externe Abgasführung realisiert. Das in den Auslaß **7** ausgestoßene Abgas wird dann über die Abgasrückführung **9** und das Regelventil **10**, das als Drosselventil in beliebige Zwischenstellung zwischen einer vollständig geschlossenen und einer vollständig geöffneten Stellung gebracht werden kann, zum Einlaß **5** rückgeführt. Je nach Öffnung des Regelventils **10** wird dabei mehr oder weniger Abgas aus dem Auslaß **7** zum Einlaß **5** rückgeführt.

[0026] In unterschiedlichen Lastpunkten der Brennkraftmaschine werden unterschiedliche Zusammensetzungen und Temperaturen zum Zeitpunkt Einlaßschluß der Einlaßventile für das selbstzündende Brennverfahren benötigt. Einlaßschluß ist der Zeitpunkt, zu dem das Einlaßventil **5** schließt. Bei sehr niedrigen Lasten ist eine hohe Restgasrate notwendig, um die benötigte Selbstzündtemperatur bereitzustellen. Unter Frischgas wird die aus der Umgebung angesaugte (frische) Luft verstanden, unter Restgas wird das durch interne oder externe Abgasrückführung in den Brennraum **2** zurückgebrachte bzw. dort verbleibende (verbrannte) Kraftstoff-Luftgemisch (Abgas) verstanden. Die Restgasrate ist der Anteil des Abgases, der durch interne oder externe Abgasrückführung in den Brennraum **2** zurückgeführt wird bzw. in diesem verbleibt. Dadurch ergeben sich drei grundsätzlich Restgassteuerungsstrategien:

1. eine reine externe Restgassteuerung durch die externe Abgasrückführung, die geregelt gekühlt (konditioniert) werden kann;
2. eine reine interne Restgassteuerung durch die interne Abgasrückführung mittels des variablen Ventiltriebes (negative oder positive Ventilüberschneidung); doppeltes Öffnen von Ein- und/oder Auslaßventilen und dergleichen;
3. eine Mischung aus interner und externer Restgassteuerung.

[0027] Die externe konditionierte Abgasrückführung gemäß **1**. ermöglicht eine langsame, aber gut definierte Restgaszumessung in Bezug auf die Tempera-

tur und die Menge des Restgases. Dazu werden Druck- und Temperatursensoren in dem Auslaß 7 und dem Einlaß 5 benötigt. Diese Temperatur- und Drucksensoren sind in [Fig. 1](#) nicht dargestellt, beispielsweise können diese im Auslaß vor und hinter der Abzweigung zur Abgasrückführung 9 angeordnet sein.

[0028] Die externe Abgasrückführung wird sehr gut homogenisiert, man erhält also eine homogene Durchmischung von Restgas und Frischgas im Brennraum 2.

[0029] Bei der zyklustreuen internen Restgassteuerung gemäß 2. ist die Zumessung der Restgasmenge sehr genau, da sich diese über die genau steuerbaren Öffnungszeiten des Auslaßventils 8 genau zumessen lässt. Die Temperatur ist sehr hoch, da wenige Wärmeverluste erzeugt werden. Die Temperatur kann variiert werden, indem unterschiedliche Ventilstrategien gefahren werden, wie z.B. negative Ventilüberschneidungen (dies ergibt die höchste Temperatur) oder positive Ventilüberschneidung mit oder ohne doppeltem Öffnen von Ein- und/oder Auslaßventil, was eine etwas niedrigere Temperatur als bei negativer Ventilüberschneidung ergibt.

[0030] Die gemischte Restgasstrategie gemäß 3., mithin eine Kombination aus interner und externer Abgasrückführung, bietet die Möglichkeit, die Gemischtemperatur sehr genau zu steuern. Dabei gibt es einerseits den relativ langsam steuerbaren Pfad der externen, kühleren Restgassteuerung, die eine Basis-Abgasrückführung darstellt, und andererseits die (zyklustreue), interne Restgaszumessung zur feineren (schnelleren) Regelung des Brennverfahrens. Es wird daher über die Abgasrückführung 9, genauer gesagt über die Stellung des Regelventils 10, eine Abgasrückführung eingestellt, die mittels der internen Abgasrückführung „moduliert“ wird. Die externe Abgasrückführung verhält sich dabei relativ träge bezüglich Veränderungen der Ventilstellung des Regelventils 10. Daher wird die externe Abgasrückführung möglichst über mehrere Arbeitszyklen des Zylinders 1 konstant gehalten. Mit Hilfe der externen Abgasrückführung über die Abgasrückführung 9 wird eine Grundrate R_E gemäß [Fig. 4](#) erzeugt. Über die interne Abgasführung, wie diese in [Fig. 3](#) dargestellt ist, wird nun eine Zusatzrate an Restgas rückgeführt. Damit wird eine feine Regelung der Abgasrückführung vorgenommen. Durch Variation der aus der internen Abgasrückführung stammenden Restgasmenge R_I und der aus der externen Abgasrückführung stammenden Restgasmenge R_E kann insbesondere die Temperatur des Restgas-Luft-Kraftstoffgemisches in dem Brennraum 2 eingestellt werden. Dies ist in [Fig. 4](#) als Beispiel für zwei Fälle dargestellt. Aufgetragen in [Fig. 4](#) ist die Restgasmenge, diese kann als Masse- oder als Prozentangabe der Masse bzw. des Volumens im Brennraum 2 angegeben werden über der

Zeit t . Durch die externe Abgasrückführung wird dabei eine Restgasmenge R_E zurückgeführt, die über der Zeit im Wesentlichen konstant gehalten wird. Selbstverständlich erfolgt auch hier eine Veränderung der Restgasmenge über die Regelung der Abgasrückführung, es handelt sich hier aber um eine träge Regelung, die also nur zur Anpassung, z.B. an unterschiedliche Lastverhältnisse eingreift. Zusätzlich findet eine interne Abgasrückführung R_I statt, die relativ schnell regelbar ist, hier kann für jeden Arbeitstakt eine unterschiedliche Restgasmenge eingestellt werden. Die externe Abgasrückführung R_E und die interne Abgasrückführung R_I zusammen ergeben die gesamte Abgasrückführung R_{GES} . Über das Verhältnis der internen Abgasrückführung R_I und der externen Abgasrückführung R_E kann zudem die Temperatur des Restgas-Luft-Gemisches in dem Brennraum 2 eingestellt werden. Je höher der Anteil des Restgases aus der internen Abgasrückführung, desto höher ist die Temperatur des Restgas-Luftgemisches während des Verdichtungstaktes in dem Brennraum 2.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Betrieb einer Brennkraftmaschine, insbesondere eines Ottomotors mit Benzindirekteinspritzung, in kontrollierter Selbstzündung, wobei die Brennkraftmaschine (1) einen Brennraum (2), mindestens ein Einlassventil (EV) und mindestens ein Auslassventil (AV), deren Öffnungszeiten veränderbar sind, umfasst sowie eine regelbare Abgasrückführung (9, 10) umfasst und ein zündfähiges Gasgemisch, das Restgas enthält, in dem Brennraum (2) in einem Verdichtungstakt (V) verdichtet wird, wobei das Gasgemisch gegen Ende des Verdichtungstaktes (V) selbstzündet, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Restgas (R_{ges}) durch interne und externe Abgasrückführung (R_E , R_I) in den Brennraum (2) gelangt bzw. verbleibt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Temperatur des Gasgemisches durch die Anteile von Restgas aus externer Abgasrückführung (R_E) und von Restgas aus interner Abgasrückführung (R_I) an der gesamten Abgasrückführung (R_{ges}) gesteuert wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass durch die externe Abgasrückführung eine Grundrate der Abgasrückführung, die über mehr als einen Arbeitszyklus unverändert bleibt, bereitgestellt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass zu der Grundrate eine Zusatzrate an Restgas aus interner Abgasrückführung addiert wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Zusatzrate zyklustreu gesteuert

wird.

6. Steuergerät für eine Brennkraftmaschine, insbesondere einen Ottomotor mit Benzindirekteinspritzung, wobei die Brennkraftmaschine (**1**) einen Brennraum, mindestens ein Einlassventil (EV) und mindestens ein Auslassventil (AV), deren Öffnungszeiten veränderbar sind, umfasst sowie eine regelbare Abgasrückführung (**9, 10**) umfasst und ein zündfähiges Gasgemisch, das Restgas enthält (Kraftstoff-Restgas-Luft-Gemisch), in dem Brennraum (**2**) in einem Verdichtungstakt (V) verdichtet wird, wobei das Gasgemisch gegen Ende des Verdichtungstaktes (V) selbstzündet, dadurch gekennzeichnet, dass das Restgas durch interne und externe Abgasrückführung in den Brennraum gelangt bzw. verbleibt

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

Fig. 1

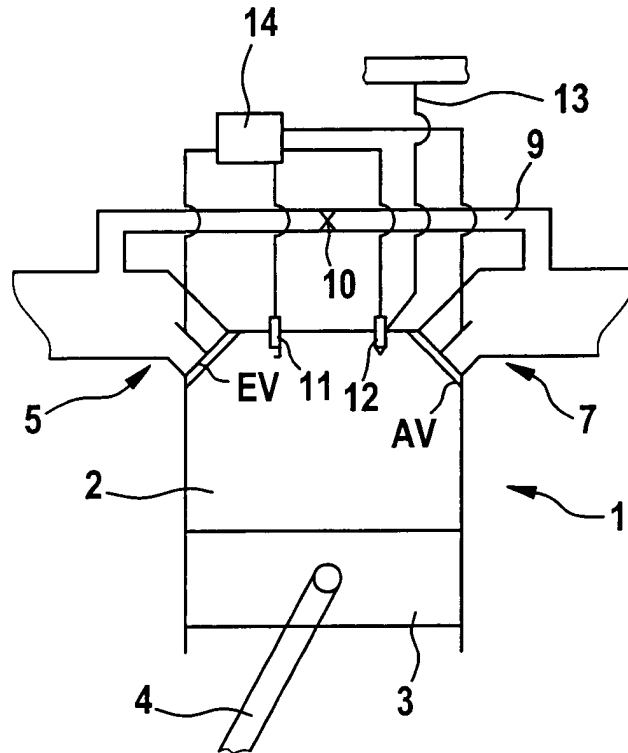
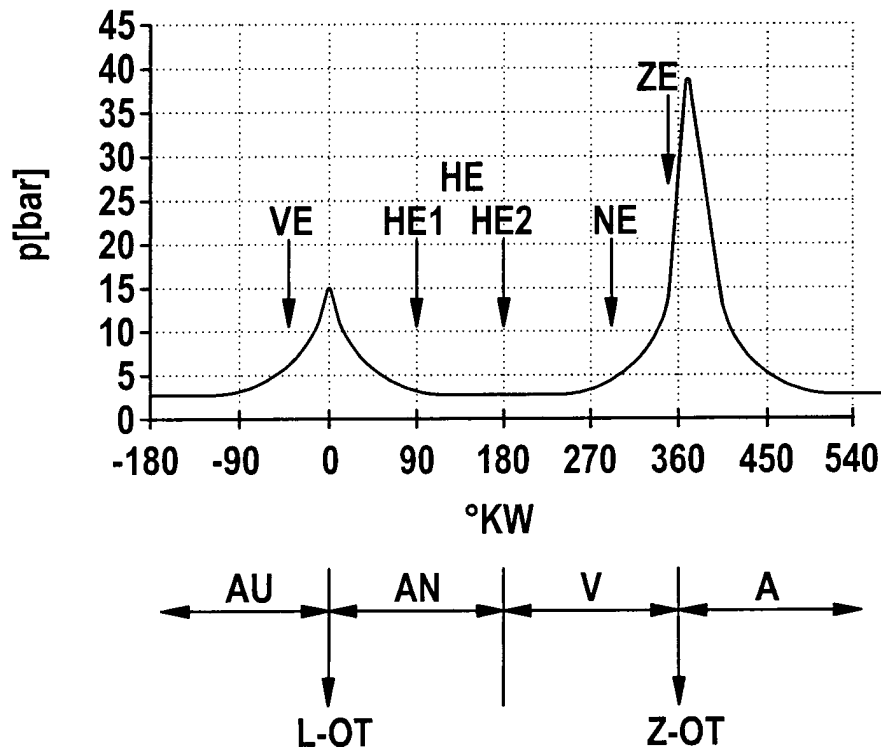


Fig. 2



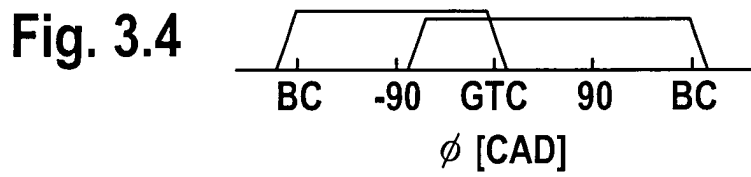
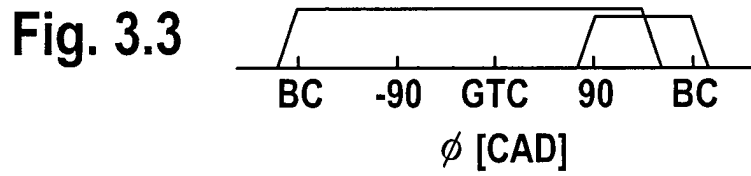
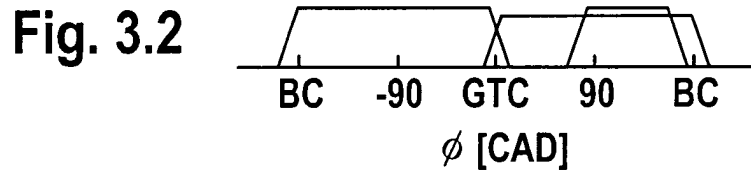
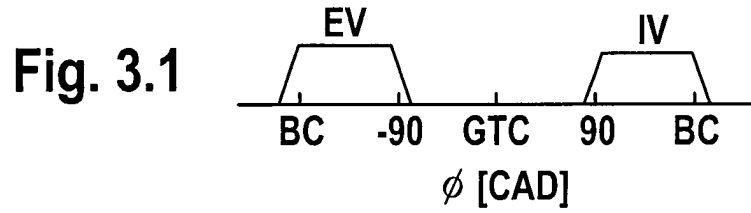


Fig. 4

