

(12)

Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 215/2007

(22) Anmeldetag: 09.02.2007

(45) Veröffentlicht am: 15.09.2009

(51) Int. Cl.⁸: **F02P 23/04**

(2006.01)

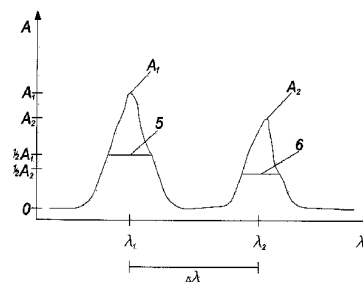
(56) Entgegenhaltungen:
WO 0169136A1

(73) Patentinhaber:
GE JENBACHER GMBH & CO OHG
A-6200 JENBACH (AT)

(54) ZÜNDEINRICHTUNG FÜR EINE BRENNKRAFTMASCHINE

(57) Zündeinrichtung für eine Brennkraftmaschine, insbesondere einen Gasmotor, mit einer Laserlichterzeugungsvorrichtung (1) zur Einkopplung von, insbesondere zündfähigem, Laserlicht (2) in einen Brennraum (4) der Brennkraftmaschine, wobei die Laserlichterzeugungsvorrichtung (1) dazu ausgebildet ist, zumindest dichromatisches Laserlicht (2), vorzugsweise auf einen gemeinsamen Fokusbereich (3), in den Brennraum (4) einzukoppeln.

Fig. 1



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine Zündeinrichtung für eine Brennkraftmaschine, insbesondere einen Gasmotor, mit einer Laserlichterzeugungsvorrichtung zur Einkopplung von, insbesondere zündfähigem, Laserlicht in einen Brennraum der Brennkraftmaschine, wobei die Laserlichterzeugungsvorrichtung dazu ausgebildet ist, zumindest dichromatisches Laserlicht, vorzugsweise auf einen gemeinsamen Fokusbereich, in den Brennraum einzukoppeln. Darüber hinaus betrifft die Erfindung eine Brennkraftmaschine, insbesondere einen Gasmotor, mit einer solchen Zündeinrichtung.

[0002] Bei der Laserzündung von brennbaren Gemischen erzeugt beim Stand der Technik ein meist gepulster Laserstrahl eine derart hohe Feldstärke im Fokus einer strahlbündelnden Linse, dass die gasförmigen Moleküle ionisiert werden und ein Plasma entsteht. Die beiden maßgeblich daran beteiligten physikalischen Effekte werden in der Fachliteratur als Multiphotonenionisation und inverser Bremsstrahlungseffekt bezeichnet. Beide Effekte führen zur Ionisation von Materie. In der WO 01/69136 A1 wird eine Zündeinrichtung mit zwei getrennten Laserlichterzeugungsvorrichtungen beschrieben.

[0003] Die beim Stand der Technik bekannten gattungsgemäßen Zündeinrichtungen kämpfen jedoch immer noch mit dem Problem, dass es technisch schwierig ist, ausreichend Energie zur Entzündung des Plasmas kostengünstig und einfach im Fokusbereich zur Verfügung zu stellen.

[0004] Aufgabe der Erfindung ist es, eine gattungsgemäße Zündeinrichtung zu schaffen, die kosten- und energieeffizient, bei gleichzeitig einfachem Aufbau der Zündeinrichtung, im Fokus die zur Zündung benötigte Energie zur Verfügung stellt.

[0005] Dies wird erfindungsgemäß erreicht, indem die Laserlichterzeugungsvorrichtung (1) zur Erzeugung des dichromatischen Laserlichtes (2) zumindest ein Medium (16) mit nichtlinearen optischen Eigenschaften, vorzugsweise zur Frequenzvervielfachung oder parametrischen Frequenzkonversion, aufweist.

[0006] Bevorzugt ist vorgesehen, dass das zumindest dichromatische Laserlicht in seinem Leistungsspektrum zumindest zwei bezüglich ihrer Wellenlänge voneinander getrennte lokale Maxima aufweist.

[0007] Die Erfindung beruht unter anderem auf der Erkenntnis, dass die Multiphotonenionisation und der inverse Bremsstrahlungseffekt eine deutlich unterschiedliche Abhängigkeit von der Wellenlänge der ursächlichen Laserstrahlung aufweisen. Während die Multiphotonenionisation bei kurzen Wellenlängen stärker in Erscheinung tritt, da diese von der höheren Photonenenergie profitiert, dominiert der inverse Bremsstrahlungseffekt bei größeren Wellenlängen. Darüber hinaus ist auch die Druckabhängigkeit der Plasmabildung bei beiden Effekten unterschiedlich. Beides hat zur Folge, dass die zur Erzeugung eines Zündfunken benötigte Laserenergie signifikant von der Emissionswellenlänge der Laserlichterzeugungsvorrichtung abhängt. Darüber hinaus ist zu beachten, dass kurzwelliges Licht sich besser fokussieren lässt als langwelliges Licht. Was für die konkrete Anwendung bedeutet, dass bei kurzwelligerem Licht bei Verwendung der gleichen Fokussierungsoptik geringere Pulsenergien zum Erreichen der Durchbruchschwelle und damit zur Erzeugung des Laserfunken ausreichen. Dem bisherigen Erkenntnisstand nach, reicht ein Plasma noch nicht unbedingt aus, um das Brennstoffluftgemisch im Brennraum auch erfolgreich zu zünden. Hierzu bedarf es, abhängig von der Gemischzusammensetzung, den Druck- und Temperaturverhältnissen im Gemisch als auch vom Strömungszustand, zusätzlicher Laserenergie die dem Plasma zugeführt werden muss. Eine Grundidee der Erfindung ist es nun, Laserstrahlung zur Zündung einzusetzen, die aus mindestens zwei Strahlungsanteilen mit unterschiedlichen Wellenlängen besteht. Hierbei ist die kurzwellige Strahlung zunächst einmal aus den oben genannten Gründen hauptsächlich für die Erzeugung des Initialplasmas verantwortlich, während die langwellige Strahlung das Plasma mit weiterer Energie versorgt und somit die räumliche Ausdehnung des Plasmas vergrößert. Letzteres begünstigt das Entflammen des Brennstoffluftgemisches. Der Vorteil dieser Vorgehensweise bei der Zündung liegt darin, dass der Gesamtbedarf an Laserenergie erheblich kleiner ausfallen

[0008] Beim Stand der Technik gemäß WO 01/69136 A1 ist vorgesehen, die dichromatische Laserstrahlung mittels zweier unabhängiger Laserlichterzeugungsvorrichtungen zu erzeugen, was aber gewisse Nachteile aufgrund der sehr exakten Anforderung an die räumliche und zeitliche Synchronisation der beiden Laserlichterzeugungsvorrichtungen aufweist. Auf Grund der höheren Komplexität und den damit verbundenen Kosten sowie der Anfälligkeiten des Zündsystems ist diese Ausgestaltungsmöglichkeit daher nachteilig. Erfindungsgemäß ist daher vorgesehen, von der beim Stand der Technik an sich bekannten Frequenzvervielfachung, insbesondere Frequenzverdopplung, bzw. parametrischen Frequenzkonversion Gebrauch zu machen. Hierbei kann ein Medium mit stark ausgeprägten nicht linearen optischen Eigenschaften, wie zum Beispiel Nd: YAG verwendet werden, um Laserlicht durch optische Frequenzvervielfachung oder parametrische Konversion in ein kurzwelligeres oder langwelligeres Licht umzuwandeln. Ein Beispiel hierfür wäre die Umwandlung von infrarotem Licht mit einer Wellenlänge von 1064 Nm in ein grünes Laserlicht mit 532 Nm. Da diese Wellenlängenkonvertierungsprozesse beim Einsatz konventioneller Technik in ihrer Effizienz mit etwa 50 % limitiert sind, bleibt ca. die Hälfte der Strahlungsenergie in ihrer ursprünglichen Wellenlänge im Laserlicht vorhanden, sodass das insgesamt eingestrahlte Laserlicht zumindest dichromatisch ist. Bei der parametrischen Konversion kann das Wellenlängenverhältnis insbesondere durch Kristallorientierung und/oder Anlegen von gewissen Temperaturen und/oder elektrischen Feldern und/oder Drücken an das Medium mit den stark ausgeprägten nicht linearen optischen Eigenschaften eingestellt werden. Eine Ausführungsform der Erfindung ist es somit, einen solchen frequenzvervielfachten, insbesondere frequenzverdoppelten, bzw. parametrisch konvertierten Laserlichtstrahl gegebenenfalls gemeinsam mit dem ursprünglichen Strahl zur Zündung zu verwenden. Um dichromatisches Licht zu erhalten, wird in der Laserlichterzeugungsvorrichtung der Anteil des Laserstrahls mit der ursprünglichen Wellenlänge nicht geblockt sondern gemeinsam mit dem neu generierten Anteil in den Brennraum des Motors eingeleitet. Da beide Anteile bei dieser Ausführungsform aus derselben Quelle stammen, laufen beide Strahlen exakt entlang derselben optischen Achse, womit eine externe, immer mit zusätzlichem Aufwand behaftete Kolinearisierung beider Strahlungsanteile entfallen kann. Das hierfür benötigte, meist als Kristall ausgebildete Medium mit stark ausgeprägten nicht linearen optischen Eigenschaften erhöht die Systemkomplexität in nur geringem Masse, zumal dieses Medium sowohl innerhalb als auch außerhalb eines Laserresonators der Laserlichterzeugungsvorrichtung angeordnet werden kann und damit ein monolithischer Aufbau des Resonators weiterhin möglich ist. Auch die gesamte Energiebilanz sieht bei Laserlichterzeugungsvorrichtungen für dichromatisches Laserlicht nicht ungünstiger als für den bisher verwendeten monochromatischen Laser aus, da, wie bereits erwähnt, sowohl die konvertierten als auch unkonvertierten Wellenlängenanteile des Laserlichts in den Brennraum geleitet werden. Zusätzliche Verluste sind gering und im Regelfall vernachlässigbar.

[0009] Im Fall der Frequenzvervielfachung unterscheiden sich die beiden, in den Brennraum gelangenden Wellenlängen naturgemäß um den Vervielfachungsfaktor, bei Frequenzverdopplung also um den Faktor 2. Im Fall der parametrischen optischen Konversion entstehen aus einem Photon zumindest zwei langwelligere Photonen. Im Rahmen dessen ist der Konversionsfaktor prinzipiell frei wählbar. Um die erwähnten wellenlängenabhängigen Effekte signifikant zur Wirkung zu bringen, ist es jedoch günstig, ein Verhältnis der beteiligten Wellenlängen von mindestens 1 zu 1,25, vorzugsweise in Nanometer (nm) gemessen, anzustreben. Der spektrale Abstand der beiden Maxima bzw. Anteile sollte günstigerweise größer als die größte Linienbreite der Maxima bei der jeweils halben Maximalamplitude sein. Diese Linienbreite wird beim Stand der Technik als FWHM (full width at half maximum) - Linienbreite bezeichnet.

[0010] Besonders bevorzugt ist vorgesehen, wenn ein erstes der zumindest zwei Maxima in einem Wellenlängenbereich zwischen 1 μm und 0,2 μm , vorzugsweise zwischen 0,6 μm und 0,2 μm , liegt und/oder ein zweites der zumindest zwei Maxima in einem Wellenlängenbereich

zwischen 10 μm und 1 μm , vorzugsweise zwischen 2, 5 μm und 1 μm , liegt.

[0011] Grundsätzlich ist es denkbar, eine Laserlichterzeugungsvorrichtung erfindungsgemäß vorzusehen, die kontinuierlich oder quasi kontinuierlich dichromatisches Laserlicht in den Brennraum einkoppelt. Bevorzugt ist es jedoch, wenn die Laserlichterzeugungsvorrichtung dazu ausgebildet ist, das zumindest dichromatische Laserlicht in Form zumindest eines zeitlich begrenzten Laserlichtpulses abzugeben.

[0012] Darüber hinaus kann auch vorgesehen sein, dass die Laserlichterzeugungsvorrichtung dazu ausgebildet ist, zumindest zwei zeitlich voneinander getrennte in sich zeitlich begrenzte Laserlichtpulse abzugeben, wobei beide Laserlichtpulse zumindest dichromatisches Laserlicht aufweisen oder der zeitlich zweite Laserlichtpuls in seinem Leistungsspektrum zumindest ein bei einer anderen, vorzugsweise größeren, Wellenlänge auftretendes Maximum aufweist als der zeitlich erste Laserlichtpuls.

[0013] Für die optimale Ausnützung der Laserenergie der nachfolgenden Pulse sollte der zeitliche Abstand (Delay), gerechnet zwischen dem Maximum des vorhergehenden Pulses und dem Maximum des nachfolgenden Pulses, zwischen den Pulsen 10 ns bis 200 ns (Nanosekunden), vorzugsweise 30 ns bis 70 ns betragen. Innerhalb dieses Delays koppelt die Strahlung nachfolgender Pulse effizient an das vorhandene Plasma des vorhergehenden Pulses an, ohne selbst die für die Plasmabildung notwendige hohe Schwellintensität erreichen zu müssen. Bei längeren Delays über 200 ns ist das Plasma so weit abgekühlt, dass die Laserstrahlung nicht mehr ankoppelt und durch das entstehende heiße Gasvolumen ohne Plasmabildung hindurchtritt. In diesem Fall ist die für die Plasmabildung notwendige Schwellintensität sogar höher als im Normalfall.

[0014] Die Laserlichtpulse haben günstiger Weise eine relativ kurze Dauer. Bevorzugt ist dabei, dass der zumindest eine Laserlichtpuls oder zumindest einer, vorzugsweise jeder, der zumindest zwei zeitlich voneinander getrennten Laserlichtpulse eine Dauer zwischen 0, 1 ns und 3 ns, vorzugsweise zwischen 0, 1 ns und 0, 1 ns, aufweist (aufweisen).

[0015] Im folgendem werden weitere Einzelheiten und Merkmale der Erfindung anhand von verschiedenen erfindungsgemäßen Ausführungsbeispielen erläutert. Dabei zeigen:

[0016] Fig. 1 beispielhaft ein Leistungsspektrum von dichromatischem Laserlicht,

[0017] Fig. 2 schematisch die wesentlichen Elemente einer erfindungsgemäßen Laserlichterzeugungsvorrichtung,

[0018] Fig. 3 und 4 verschiedene, zur Erzeugung von dichromatischem Laserlicht geeignete Resonatoren und

[0019] Fig. 5 und 6 Ausführungsbeispiele zur Erzeugung zweier zeitlich voneinander beabstandeter Laserlichtpulse gemäß der Erfindung.

[0020] In Fig. 1 ist beispielhaft, das - wie an sich bekannt berechnete - Leistungsspektrum A eines erfindungsgemäßen dichromatischen Laserlichtpulses gegen seine Wellenlänge λ aufgetragen. Im Spektrum sind zwei voneinander getrennte, lokale Maxima A_1 und A_2 zu erkennen. Das Maximum A_1 tritt bei der Wellenlänge λ_1 das Maximum A_2 bei der Wellenlänge λ_2 auf. Ein-gezeichnet sind auch die Linienbreiten 5 und 6 bei der jeweils halben Maximalamplitude ($\frac{1}{2} A_1$ bzw. $\frac{1}{2} A_2$). Die Linienbreiten 5 und 6 sind damit die so genannten FWHM (full width at half maximum) - Linienbreiten. Der Wellenlängenabstand $\Delta\lambda$ zwischen den Maxima A_1 und A_2 ist dabei sowohl größer als die Linienbreite 5 des ersten Maximums A_1 als auch die Linienbreite 6 des zweiten Maximums A_2 .

[0021] Fig. 2 zeigt eine bevorzugte Ausführungsform einer Laserlichterzeugungsvorrichtung 1 gemäß der Erfindung. Diese weist zunächst - wie an sich bekannt - eine Pumplichtquelle 7 auf. Über den Lichtwellenleiter 8 oder über eine andere geeignete Optik wird das Pumplicht in den Resonator 9 eingespeist. Zur parametrischen Wellenlängenkonversion bzw. zur Frequenzvervielfachung und insbesondere Frequenzverdopplung ist dem Resonator ein Medium 16 mit nichtlinearen optischen Eigenschaften nachgeschaltet. Über die Linsenordnung 21 des

Brennraumfensters 10 sowie die Einkopplungsoptik 11 wird das so erzeugte dichromatische Laserlicht 2 dann auf den Fokusbereich 3 in den Brennraum 4 eingekoppelt. Dieser befindet sich - wie an sich bekannt - im Zylinder 22 und wird nach unten vom Kolben 23 begrenzt. Im Fokusbereich 3 wird bevorzugt durch den kurzwelligen Anteil des dichromatischen Laserlichts ein Initialplasma erzeugt, welches durch den langwelligen Laserlichtanteil vergrößert und weiter mit Energie gespeist wird, bis es zur Zündung kommt. Bei einer besonders bevorzugten Ausführungsvariante kann dann in einer letzten Phase wiederum kurzwelliges Laserlicht den Energiegehalt des Plasmas noch über den durch das langwellige Laserlicht erreichbaren Wert erhöhen, wobei ein dritter wellenlängenabhängiger Effekt berücksichtigt wird. Dieser ist die Reflexion des Laserlichts am Plasma, sobald dieses eine bestimmte, so genannte kritische Dichte (= Anzahl der freien Elektronen pro Volumen) überschreitet. In Folge dieser Reflexion kann keine weitere Laserenergie mehr dem Plasma zugeführt werden. Die kritische Plasmadichte ist jedoch von der Wellenlänge des Lichtes abhängig. So kann, wenn für eine bestimmte Wellenlänge die kritische Dichte erreicht ist, mit kürzerer Wellenlänge noch weiterhin Energie in das Plasma eingebracht werden. Nützt man dies, so wird der kurzwellige Anteil zunächst zur Erzeugung des Initialplasmas genutzt. Daraufhin erfolgt mit hoher Effizienz mittels des langwelligen Anteils das Aufheizen und Vergrößern des Plasmas. Diese Art des Energieeintrags in das Plasma endet mit dem Erreichen der für diese Wellenlänge kritischen Plasmadichte, woraufhin mittels des kurzwelligen Laserlichtanteils noch zusätzlich Energie eingebracht werden kann. Zur Optimierung dieses Prozesses kann der kurzwellige Anteil auch in zwei Teile aufgeteilt werden, von denen der eine zur Initialzündung des Plasmas und der andere nach einer geeigneten zeitlichen Verzögerung, z. B. durch eine Verzögerungsstrecke, deren Verzögerungsdauer etwa der Impulsdauer der Strahlung zu entsprechen hat, als Nachbrennerimpuls eingesetzt werden. Eine Variante, wie man Anteile des oder den gesamten dichromatischen Laserlichtpuls auf eine Verzögerungsstrecke 18 zunächst aus- und dann wieder einkoppeln kann, ist in Fig. 5 gezeigt und wird weiter unten erläutert.

[0022] Die Fig. 3 und 4 zeigen nun zunächst, wie Laserresonatoren 9 ausgebildet sein können, um dichromatisches Laserlicht gemäß der Erfindung zu erzeugen. Bei beiden Ausführungsvarianten handelt es sich um so genannte longitudinal gepumpte Laserresonatoren 9. Dies bedeutet aber nicht, dass erfindungsgemäß nicht auch andere, wie zum Beispiel so genannte transversal gepumpte, Laserresonatoren zum Einsatz gebracht werden könnten.

[0023] In den Fig. 3 und 4 wird das von der Pumplichtquelle 7 stammende Pumplicht mittels des Lichtwellenleiters 8 und der Linsenanordnung 21 über den Resonatoreinkoppelspiegel 12 in das laseraktive Medium 14 eingekoppelt. In beiden Ausführungsbeispielen ist dem laseraktiven Medium 14 dann ein Güteschalter 15 - wie an sich bekannt - nachgeschaltet. In dem Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 3 folgt auf den Güteschalter (Q-Switch) 15 wie auch sonst üblich der Resonatorauskoppelspiegel 13 und erst anschließend das zur parametrischen Wellenlängenkonversion oder Frequenzvervielfachung genutzte Medium 16 mit nichtlinearen optischen Eigenschaften. Beim Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 4 ist dieses Medium 16 zwischen dem Resonatorauskoppelspiegel 13 und dem Güteschalter 15, also integriert in den Resonator 9, angeordnet. In beiden Ausführungsbeispielen verlässt das Medium 16 mit nicht linearen optischen Eigenschaften ein dichromatischer Laserlichtstrahl 2, welcher eventuell aber nicht notwendigerweise räumlich unterschiedlich verteilte Anteile 2' und 2'' aufweist. Die Aufteilung des dichromatischen Laserlichts in die hier schematisch dargestellten Anteile 2' und 2'' entsteht durch die unterschiedlichen Fokussierungseigenschaften der beiden Anteile mit verschiedenen Wellenlängen. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass trotz der unterschiedlichen Fokussierungseffekte die optischen Übertragungseinrichtungen so ausgelegt sein sollten, dass im Fokusbereich 3, in dem das Plasma im Brennraum 4 gebildet wird, der stärker fokussierte Bereich günstiger Weise innerhalb des weniger fokussierten Laserlichtanteils liegt.

[0024] Fig. 5 zeigt nun eine bevorzugte Ausführungsvariante, wie aus einem, mittels des Laserresonators 9 gemäß Fig. 3 erzeugten dichromatischen Laserlichtpuls 2 zwei zeitlich verzögerte Laserlichtpulse erzeugt werden können. Hierfür ist eine optisch kürzere Wegstrecke 17, auf der ein Teil des Laserlichtpulses auf direktem Wege in den Brennraum 4 eingekoppelt wird, und

eine demgegenüber optisch längere Verzögerungswegstrecke 18 vorgesehen. Zum Auskoppeln eines Teils des Laserlichtpulses in die Verzögerungswegstrecke 18 ist ein zumindest bereichsweise semitransparenter Verzögerungsauskoppelspiegel 19 im Strahlenverlauf angeordnet. An diesem wird ein Teil des Laserlichtpulses reflektiert und über die Linsenanordnung 21 in den Lichtwellenleiter 8 eingekoppelt. In diesem durchläuft das Laserlicht eine optisch längere Wegstrecke, was zu der gewünschten Verzögerung führt. Um auch diesen Laserlichtanteil in den Fokusbereich 3 zu lenken, kann günstiger Weise vorgesehen sein, dass dieser verzögerte Laserlichtanteil über den ebenfalls semitransparenten Verzögerungseinkoppelspiegel 20 wieder auf die Wegstrecke 17 eingekoppelt wird. Natürlich wäre es auch möglich, in Abwandlung dieses Ausführungsbeispiels den verzögerten Laserlichtanteil über eigene - hier nicht dargestellte - Einkoppelungsoptiken direkt - also ohne Verzögerungseinkoppelspiegel 20 - in den Fokusbereich 3 einzukoppeln. Allerdings ist es grundsätzlich günstig, die Zahl der Brennraumfenster 10 so gering wie möglich zu halten, wodurch die hier gezeigte Variante bevorzugt ist.

[0025] Je nach Ausbildung des Verzögerungsauskoppelspiegels 19 und/oder des Verzögerungseinkoppelspiegels 20 ist es möglich, auf den beiden Wegstrecken jeweils dichromatisches Laserlicht zu führen oder mittels der beiden Wegstrecken Laserlichtanteile mit unterschiedlichen Wellenlängen zeitlich gegeneinander verzögert in den Brennraum 4 einzuspeisen. Ist zweiteres beabsichtigt, so kann zur Trennung der Lichtwellenlängenanteile die unterschiedliche Fokussierung des langwelligen und des kurzwelligen Lichtanteils 2' und 2" genutzt werden. Es könnte zum Beispiel vorgesehen sein, dass der Verzögerungsauskoppelspiegel 19 durch entsprechend unterschiedlich stark transmittierende bzw. reflektierende Bereich nur einen der beiden Lichtanteile 2' oder 2" über die Verzögerungswegstrecke 18 umleitet und damit zeitlich gegenüber dem anderen Lichtwellenanteil verzögert. Dasselbe ist über entsprechend ausgebildete Reflexionseigenschaften und Transmissionseigenschaften des Verzögerungseinkoppelspiegels 20 möglich. Hierdurch kann nahezu frei gestaltet werden, welcher Lichtwellenanteil zu welchem Zeitpunkt in den Fokusbereich 3 gelangt. Anstelle des Lichtwellenleiters 8 können natürlich auch geeignete Spiegelanordnungen oder dergleichen zur Erzeugung der Verzögerungswegstrecke 18 herangezogen werden. Darüber hinaus ist es natürlich auch möglich, mehrere Verzögerungswegstrecken 18 mit unterschiedlichen optischen Weglängen zu verwenden, um einer Abfolge von mehreren Laserlichtimpulsen zu generieren. Die Lichtwellenlängenanteile der einzelnen Pulse können dann wiederum über die gegebenenfalls bereichsweise unterschiedlichen Reflexions- und Transmissionseigenschaften der Spiegel 19 und 20 bzw. der entsprechend zusätzlich angeordneten Verzögerungsauskoppel- und einkoppelspiegel gesteuert werden.

[0026] Fig. 6. zeigt schematisch wie die Auskopplung eines Teils 2" des Laserlichtes in eine Verzögerungswegstrecke 18 unter Ausnutzung von unterschiedlichen Polarisierungen der Lichtanteile 2' und 2" mittels eines Polarisations-Strahlteilers möglich ist. Dabei ist - im hier gezeigten Beispiel - der Anteil des Lichtanteils 2' im Wesentlichen senkrecht zum Lichtanteil 2" polarisiert. Diese unterschiedlichen Polarisierungen können durch die nicht linearen optischen Prozesse im Medium 16 oder durch wellenlängenabhängige doppelbrechende Platten erzeugt werden. Die Aufteilung in die Anteile 2' und 2" erfolgt jedenfalls an dem Verzögerungsauskoppelspiegel bzw. Polarisations-Strahlteiler 19, wobei der Anteil 2' transmittiert und der Anteil 2" reflektiert wird. Mittels des Verzögerungseinkoppelspiegels 20' werden die beiden Lichtanteile 2' und 2" wieder auf dieselbe Wegstrecke zusammengeführt. Der restliche Aufbau entspricht dann im Wesentlichen dem in Fig. 5 gezeigten.

Patentansprüche

1. Zündeinrichtung für eine Brennkraftmaschine, insbesondere einen Gasmotor, mit einer Laserlichterzeugungsvorrichtung zur Einkopplung von, insbesondere zündfähigem, Laserlicht in einen Brennraum der Brennkraftmaschine, wobei die Laserlichterzeugungsvorrichtung dazu ausgebildet ist, zumindest dichromatisches Laserlicht, vorzugsweise auf einen gemeinsamen Fokusbereich, in den Brennraum einzukoppeln, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Laserlichterzeugungsvorrichtung (1) zur Erzeugung des dichromatischen Laserlichtes (2) zumindest ein Medium (16) mit nichtlinearen optischen Eigenschaften, vorzugsweise zur Frequenzvervielfachung oder parametrischen Frequenzkonversion, aufweist.
2. Zündeinrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das zumindest dichromatische Laserlicht (2) in seinem Leistungsspektrum (A) zumindest zwei bezüglich ihrer Wellenlänge (λ_1 λ_2) voneinander getrennte, lokale Maxima (A_1 A_2) aufweist.
3. Zündeinrichtung nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass das zweite Maximum (A_2) im Leistungsspektrum (A) bei einer mindestens 1, 25 fachen, vorzugsweise bei einer mindestens 2 fachen, Wellenlänge (λ_2), vorzugsweise gemessen in Nanometer, bezogen auf die Wellenlänge (λ_1) des ersten Maximums (A_1) auftritt.
4. Zündeinrichtung nach Anspruch 2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Wellenlängenabstand ($\Delta\lambda$) zwischen den zumindest zwei voneinander getrennten Maxima (A_1 A_2) im Leistungsspektrum (A) zumindest größer als die größte Linienbreite (5, 6) der Maxima (A_1 A_2) bei der jeweils halben Maximalamplitude ($\frac{1}{2} A_1$ $\frac{1}{2} A_2$) des jeweiligen Maximums (A_1 A_2) ist.
5. Zündeinrichtung nach einem der Ansprüche 2 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein erstes der zumindest zwei Maxima (A_1 A_2) in einem Wellenlängenbereich zwischen 1 μm und 0, 2 μm , vorzugsweise zwischen 0, 6 μm und 0, 2 μm , liegt und/oder ein zweites der zumindest zwei Maxima (A_1 A_2) in einem Wellenlängenbereich zwischen 10 μm und 1 μm , vorzugsweise zwischen 2, 5 μm und 1 μm , liegt.
6. Zündeinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Laserlichterzeugungsvorrichtung (1) dazu ausgebildet ist, das zumindest dichromatische Laserlicht (2) in Form zumindest eines zeitlich begrenzten Laserlichtpulses abzugeben.
7. Zündeinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Laserlichterzeugungsvorrichtung (1) dazu ausgebildet ist, zumindest zwei zeitlich voneinander getrennte in sich zeitlich begrenzte Laserlichtpulse abzugeben, wobei beide Laserlichtpulse zumindest dichromatisches Laserlicht aufweisen oder der zeitlich zweite Laserlichtpuls in seinem Leistungsspektrum (A) zumindest ein bei einer anderen, vorzugsweise größerer, Wellenlänge (λ_2) auftretendes Maximum (A_2) aufweist als der zeitlich erste Laserlichtpuls.
8. Zündeinrichtung nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass zwischen dem ersten und dem zweiten der zumindest zwei zeitlich voneinander getrennten Laserlichtpulse ein zeitlicher Abstand zwischen 10 ns und 200 ns, vorzugsweise zwischen 30 ns und 70 ns, vorgesehen ist.
9. Zündeinrichtung nach einem der Ansprüche 6 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass der zumindest ein Laserlichtpuls oder zumindest einer, vorzugsweise jeder, der zumindest zwei zeitlich voneinander getrennten Laserlichtpulse eine Dauer zwischen 0, 1 ns und 3 ns, vorzugsweise zwischen 0, 1 ns und 1 ns, aufweist (aufweisen).
10. Zündeinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Laserlichterzeugungsvorrichtung (1) zumindest eine Pumplichtquelle (7), vorzugsweise Laserdioden, und zumindest einen mit Pumplicht dieser Pumplichtquelle (7) speisbaren Laserresonator (9) sowie zumindest ein Brennraumfenster (10) bzw. eine Einkopplungsoptik (11) für den Brennraum (4) aufweist.

11. Zündeinrichtung nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass der oder die Laserresonator(en) (9) longitudinal gepumpt ist (sind).
12. Zündeinrichtung nach Anspruch 10 oder 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Laserresonator (9) einen Resonatoreinkoppelspiegel (12) und einen Resonatorauskoppelspiegel (13) und dazwischen angeordnet ein laseraktives Medium (14) und einen Güteschalter (15) aufweist.
13. Zündeinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Medium (16) mit nichtlinearen optischen Eigenschaften einem Laserresonator (9) der Laserlichterzeugungsvorrichtung (1) in Strahlrichtung des Laserlichtes (2) nachgeschaltet ist.
14. Zündeinrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Medium (16) mit nichtlinearen optischen Eigenschaften, vorzugsweise zwischen dem Resonatorauskoppelspiegel (13) und dem Güteschalter (15), im Laserresonator (9) angeordnet ist.
15. Zündeinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Laserlichterzeugungsvorrichtung (1) zur Erzeugung von zumindest zwei zeitlich voneinander getrennten Laserlichtpulsen eine, vorzugsweise dem Medium (16) mit nichtlinearen Eigenschaften nachgeschaltete, optisch kürzere Wegstrecke (17) für einen Anteil des Laserlichts (2) und zumindest eine demgegenüber optisch längere Verzögerungswegstrecke (18) für einen anderen Anteil des Laserlichts (2) aufweist.
16. Zündeinrichtung nach Anspruch 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass sie zur Verzögerungsauskopplung des Laserlichts (2) in die Verzögerungswegstrecke (18) zumindest einen, vorzugsweise zumindest bereichsweise für Laserlicht (2) semitransparenten, Verzögerungsauskopplungsspiegel (19) und gegebenenfalls zur Wiedereinkopplung in die optisch kürzere Wegstrecke einen, vorzugsweise zumindest bereichsweise für Laserlicht (2) semitransparenten, Verzögerungseinkoppelspiegel (20) aufweist.
17. Zündeinrichtung nach Anspruch 15 oder 16, **dadurch gekennzeichnet**, dass sie zur Verzögerungsauskopplung des Laserlichts (2) in die Verzögerungswegstrecke (18) einen Polarisations-Strahlteiler aufweist.
18. Brennkraftmaschine, insbesondere Gasmotor, mit einer Zündeinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 17.

Hierzu 5 Blatt Zeichnungen

Fig. 1

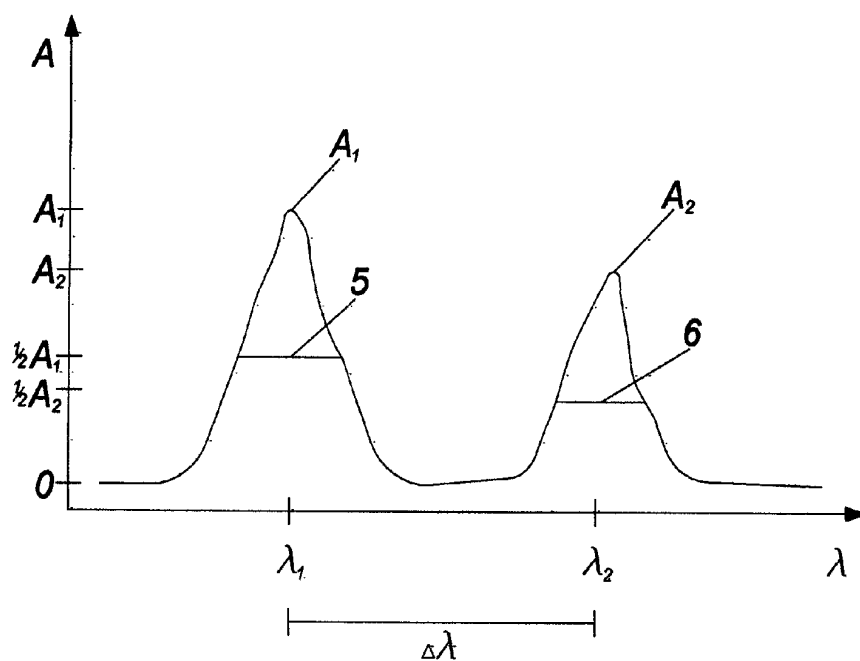


Fig. 2

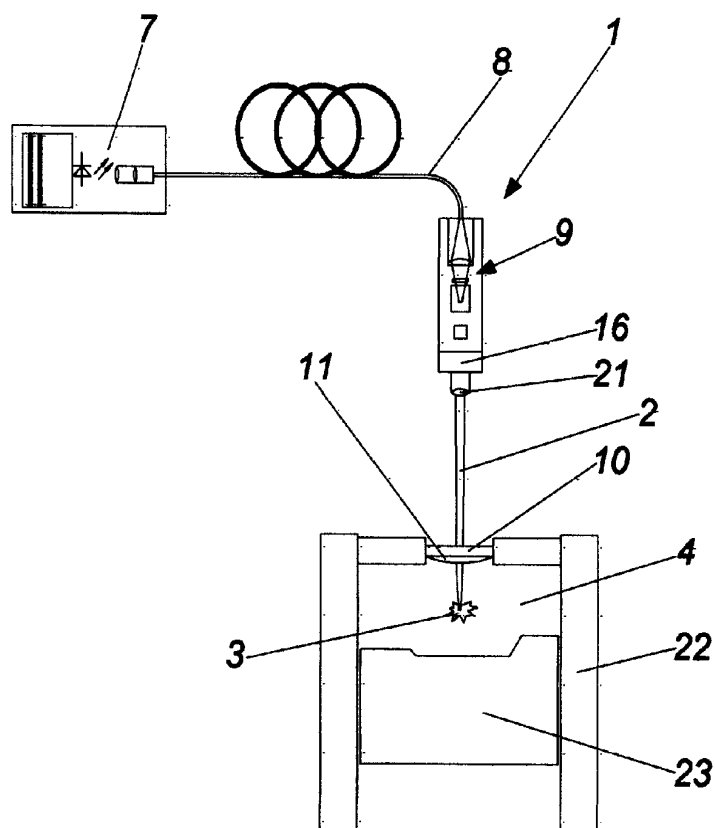


Fig. 3

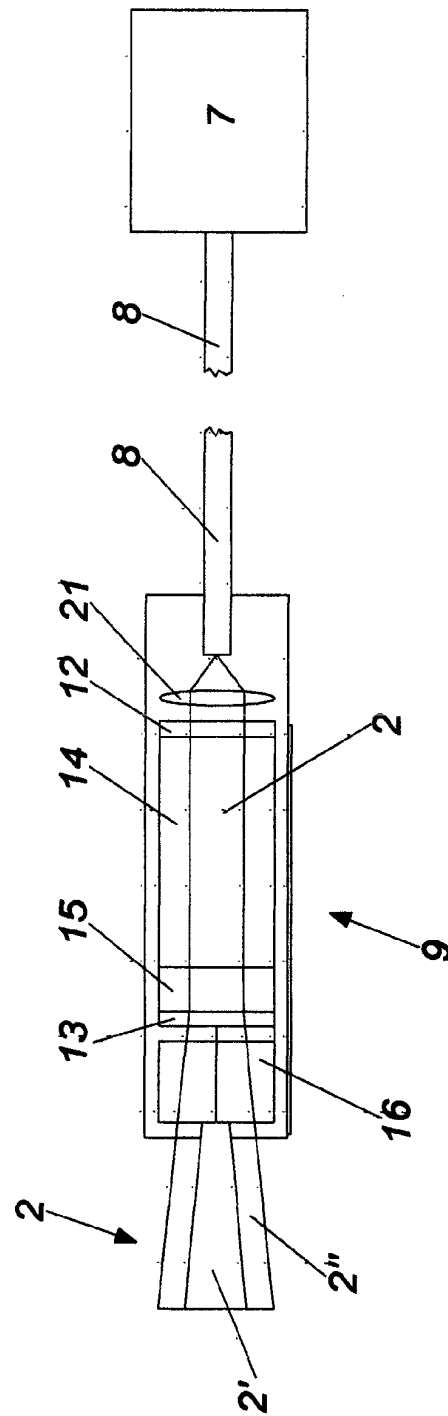


Fig. 4

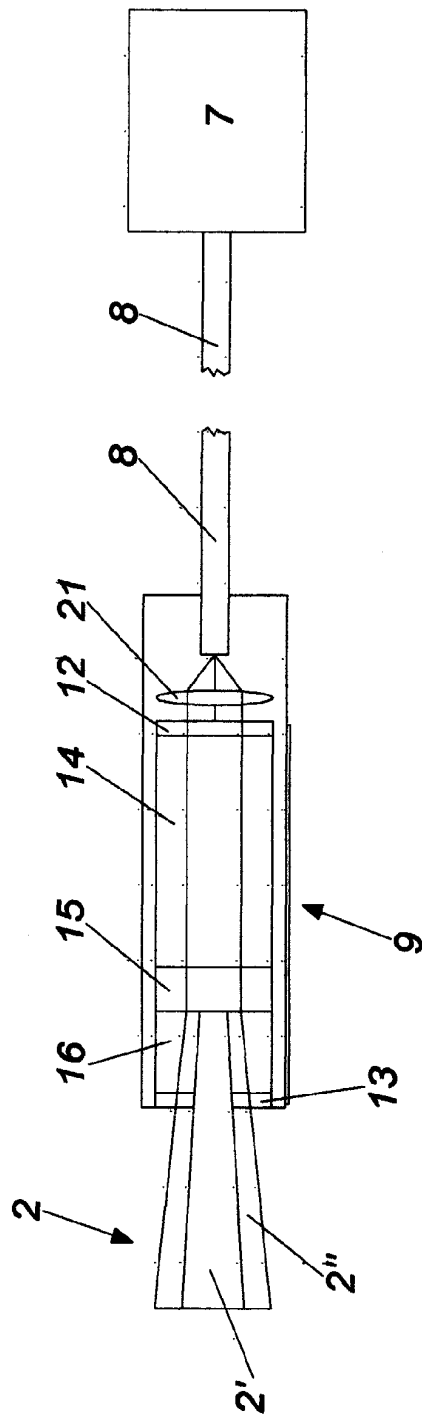


Fig. 6

