

(12)

Patentschrift

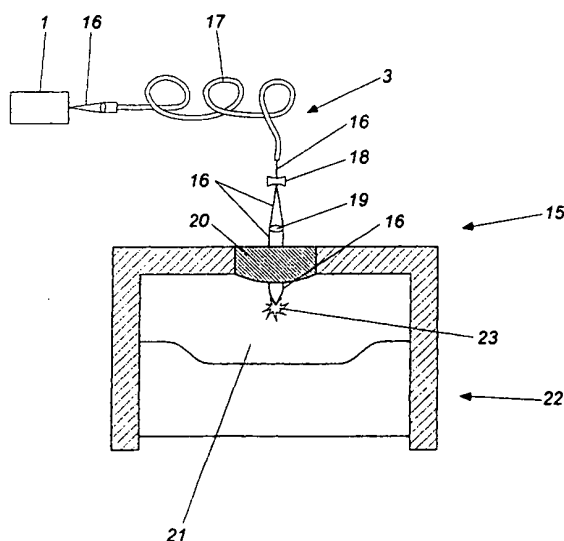
- (21) Anmeldenummer: A 1559/2005 (51) Int. Cl.⁸: **F02P 23/04** (2006.01)
(22) Anmeldetag: 2005-09-22
(43) Veröffentlicht am: 2008-05-15

(56) Entgegenhaltungen:
DE 19802745A1 JP 59070886A
HOLLOW CORE FIBERS FOR LASER
SPARK IGNITION IN NATURAL
GAS ENGINES, MORGAN DE FOORT,
MÄRZ 2005

(73) Patentanmelder:
GE JENBACHER GMBH & CO OHG
A-6200 JENBACH (AT)
(72) Erfinder:
KOPECEK HERBERT
HALLBERGMOOS (DE)
ISKRA KURT
KUMBERG (AT)
WEINROTTER MARTIN
VÖCKLABRUCK (AT)
GRAF JOSEF
GROSSPETERSDORF (AT)
KLAUSNER JOHANN
ST. JAKOB I.H. (AT)

(54) VERBRENNUNGSMOTOR MIT EINER LASERLICHTERZEUGUNGSVORRICHTUNG

- (57) Verbrennungsmotor (15) mit einer Laserlichterzeugungs-
vorrichtung (1), wobei die Laserlichterzeugungs-
vorrichtung (1) derart ausgebildet ist, dass sie
dazu geeignet ist, Laserlicht (16) mit einer sich
zeitlich verändernden transversalen Modenstruktur
abzugeben.



Die vorliegende Erfindung betrifft einen Verbrennungsmotor mit einer Laserlichterzeugungsvorrichtung.

Herkömmliche Laserlichterzeugungsvorrichtungen, welche im Bereich der Laserzündung von Verbrennungsmotoren eingesetzt werden, weisen in der Regel einen Laserresonator auf, welcher derart ausgebildet ist, dass das von der Laserlichterzeugungsvorrichtung abgegebene Laserlicht ein Gauß'sches Profil (TEM_{00} -Modenstruktur) aufweist, das heißt, die Intensitätsverteilung fällt transversal mit einem exponentiellen Verlauf ab. Weiters werden insbesondere bei gepulsten Lasern häufig auch Laserlichterzeugungsvorrichtungen mit instabilem Laserresonator verwendet. Auch bei diesem Resonatorkonzept tritt eine sich transversal verändernde Intensitätsverteilung über den Strahlquerschnitt auf.

Ein wesentliches Hindernis für den massentauglichen Einsatz lasergezündeter Verbrennungsmotoren besteht in der geringen Effizienz, mit der das Laserlicht in das zur sicheren Zündung des Kraftstoff-Luft-Gemisches aufzuheizende Plasmavolumen eingebracht wird. Diese Verluste resultieren einerseits aus den Transmissionsverlusten der Laserstrahlung, die vor dem laserinduzierten Plasmadurchbruch das Zündvolumen passiert, andererseits aus Verlusten, die durch seitliches Passieren der Laserstrahlung des Plasmavolumens aufgrund zu geringer Plasmagröße oder seitlich zu weit ausgedehnter Fokusgeometrie entstehen. Aus dem Stand der Technik in Hollow Core Fibers for Laser Spark Ignition in Natural Gas Engines. Morgan DeFoort, März 2005, abrufbar auf: www.energetics.com/meetings/recipe05/pdfs/presentations/defoort.pdf ist beispielsweise ein Faserlaser, umfassend einen Kern sowie eine innere und äußere Beschichtung bekannt. Über in der inneren Beschichtung geführtes Pumplicht, das verschiedene Moden aufweist, wird der Kern gepumpt. Das vom Faserlaser abgegebene Laserlicht weist anschließend nur eine einzige Mode auf. In der JP 59070886 A wird eine hochfrequente elektromagnetische Welle mittels einer Antenne in einen Zylinder zum Zünden eingebracht. In der DE 198 02 745 A1 wird die Verwendung von Mikrowellenpulsen zur Zündung eines Luftkraftstoffgemisches gezeigt.

Aufgabe der Erfindung ist es, einen gattungsgemäßen Verbrennungsmotor derart weiter zu entwickeln, dass die Effizienz, mit der das Laserlicht für die Zündung verwendet wird, erhöht wird.

Diese Aufgabe wird durch einen Verbrennungsmotor mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst.

Bei einem derartigen Verbrennungsmotor ist es möglich, die zur Erzeugung eines Plasmakernes notwendige Minimalenergie durch Laserstrahlung, welche eine TEM_{00} -Modenstruktur aufweist, in den Brennraum einzubringen. Diese Laserstrahlung weist ideale Fokussierungseigenschaften auf.

Im Weiteren wird die zur Erzeugung eines zündfähigen Flammenkernes notwendige Gesamtenergie in Form eines sich später ausbildenden energiereicheren Laserlichts mit einer Modenstruktur höherer transversaler Ordnung in den Brennraum eingebracht. Dies geschieht erst bei Ausbildung eines genügend großen Plasmavolumens, sodass Verluste aus zeitlich vorab oder räumlich das Plasma seitlich passierender Strahlung minimiert werden.

Im Sinne dieser Offenbarung wird unter einer transversalen Modenstruktur das Intensitätsmuster eines elektromagnetischen Strahls in einer Ebene senkrecht (d. h. transversal) zur Ausbreitungsrichtung des Strahls verstanden. Die durch einen Laserresonator erzeugbaren Modenstrukturen sind vom transversalen elektromagnetischen Typ (TEM).

Je nach Symmetrie des Laserresonators ist die Struktur der TEM-Moden unterschiedlich.

Bei einem Laserresonator mit zylindrischer Symmetrie (r radiale Koordinate, Φ tangentialer Winkel)

Koordinate, $\rho = 2r^2/w^2$, w Spot-Size der Mode) wird das Intensitätsprofil I_{pl} der transversalen Modenstrukturen durch eine Kombination eines Gauß'schen Profils mit einem Laguerre-Polynom beschrieben:

$$I_{pl}(r, \phi) = I_0 \rho^l [L_p^l(\rho)]^2 \cos^2(l\phi) e^{-\rho}$$

Die einzelnen Moden werden mit TEM_{pl} bezeichnet, wobei p und l ganze Zahlen sind, welche die radiale bzw. tangentielle Ordnung der Mode charakterisieren. Jede Mode mit $p \geq 1$ und/oder $l \geq 1$ ist eine Mode höherer transversaler Ordnung im Sinne dieser Offenbarung.

Bei vielen Laserresonatoren wird die Symmetrie durch optische Elemente, wie beispielsweise Polarisationsfiltern eingeschränkt. In diesem Fall werden die transversalen Modenstrukturen durch ein Produkt von Hermitschen Polynomen beschrieben und mit TEM_{mn} bezeichnet.

$$I_{mn}(x, y) = I_0 \left[H_m \left(\frac{\sqrt{2}x}{\omega} \right) \exp \left(\frac{-x^2}{\omega^2} \right) \right]^2 \left[H_n \left(\frac{\sqrt{2}y}{\omega} \right) \exp \left(\frac{-y^2}{\omega^2} \right) \right]^2$$

m und n sind ganze Zahlen, welche die Ordnung der Mode entlang der orthogonalen Richtungen x und y charakterisieren. Jede Mode mit $m \geq 1$ und/oder $n \geq 1$ ist eine Mode höherer transversaler Ordnung im Sinne dieser Offenbarung.

In beiden Fällen ist die TEM_{00} -Mode die Grundmode mit Gauß'schem Profil.

Vorzugsweise werden sowohl das Laserlicht mit TEM_{00} -Modenstruktur als auch das eine Modenstruktur höherer transversaler Ordnung aufweisende Laserlicht in Form von Pulsen abgegeben.

Vorzugsweise werden sowohl das Laserlicht mit TEM_{00} -Modenstruktur als auch das eine Modenstruktur höherer transversaler Ordnung aufweisende Laserlicht mit derselben Laserlichterzeugungsvorrichtung erzeugt. Hierfür muss vorgesehen sein, dass die Laserlichterzeugungsvorrichtung einen Laserresonator aufweist, der derart ausgebildet ist, dass er in Bezug auf wenigstens zwei Moden verschiedener transversaler Ordnung des abgebbaren Laserlichtes stabil betreibbar ist.

Vorzugsweise wird bei der Erfindung ein Laserresonator vom Fabry-Perot-Typ eingesetzt.

Aus der Literatur ist bekannt, dass bei Lasersystemen mit passiver Güteschaltung durch sättigbare Absorber eine sequentielle Abfolge der Ausbildung unterschiedlicher Modenstrukturen auftreten kann (R. Wu, T.L. Chen, J.D. Myers, M.J. Myers, C. Hardy, Multi-Pulses Behavior in a Erbium Glass laser Q Switched by Cobalt Spinal, AeroSense 2003, SPIE Vol. 5086, Orlando, Floride, April 21-25, 2003).

Es handelt sich hierbei jedoch um nicht geplante, in unterschiedlicher Modenstruktur und mit unbeabsichtigter zeitlicher Reihenfolge auftretende Effekte, deren Ausprägung darüber hinaus nicht auf die für die Erzeugung und Nachheizung eines laserinduzierten zündfähigen Plasmas optimiert ist.

Für die bevorzugte Ausführungsform der Erfindung wird eine Laserlichterzeugungsvorrichtung vorgeschlagen, deren Konfiguration des Laserresonators durch eine geeignete Ausbildung der optischen Oberflächen eine Variabilität der Stabilitätsbedingung des Laserresonators ermöglicht. Diesbezüglich ist vorgesehen, dass die optischen Oberflächen des Laserresonators derart ausgebildet und zueinander angeordnet sind, dass der Strahldurchmesser eines in den Laserresonator eingebrachten Lichtstrahls veränderbar ist. Ein solcher Laserresonator ist auch unter

der Bezeichnung "Teleskopresonator" bekannt.

Im Laserresonator einer derartigen Laserlichterzeugungsvorrichtung sind ein Lasermedium und ein passiver sättigbarer Absorber angeordnet, wobei vorzugsweise jeweils eine Oberfläche des Lasermediums und des Absorbers derart ausgebildet und angeordnet ist, dass sie einen Spiegel des Laserresonators bildet. Ganz generell kann vorgesehen sein, dass die optischen Oberflächen des Laserresonators durch die Oberflächen des Lasermediums und des Absorbers gebildet werden.

Alternativ kann natürlich auch eine gesonderte Optik, insbesondere gesonderte Spiegel, vorgesehen sein.

Die Gestaltung der Oberflächen des aktiven Lasermediums und/oder des passiven sättigbaren Absorbers bei der bevorzugten Ausführungsform hat dabei zum einen die Funktion, die für die einzustellende Stabilität des Laserresonators notwendige geometrische Variabilität der Modenausbildung zu bestimmen.

Zum anderen soll eine transversale Variabilität des passiven sättigbaren Absorbers dahingehend gewährleistet werden, dass eine sichere Ausbildung einer TEM_{00} -Mode in einem ersten Schritt erfolgen kann. Mit einer der zeitlichen Entwicklung des Plasmakernes entsprechenden Verzögerung kann dann eine energiereichere Strahlung mit einer Modenstruktur höherer transversaler Ordnung mit dem Ziel erzeugt werden, durch effizientere Einkopplung des Laserlichts und des Vermeidens von zeitlichen oder räumlichen Passageverlusten eine gesteigerte Aufheizung des Plasmas auf die für eine sichere Zündung eines Kraftstoff-Luft-Gemisches notwendigen Temperaturen zu gewährleisten.

Die Ausbildung von sequentiellen Pulsen durch das Anschwingen unterschiedlicher Moden und das daraus resultierende unterschiedliche zeitliche Verhalten des sättigbaren Absorbers zielt speziell darauf ab, die für eine ideale Fokussierbarkeit notwendige TEM_{00} -Mode im Lasermedium zuerst zur Ausbildung anzuregen, um die Plasmabildung im Laserfokus zu gewährleisten. Danach sollen gezielt Moden höherer Ordnung zur Ausbildung angeregt werden, um ein weiteres Aufheizen des bereits gebildeten Plasmas zu ermöglichen. Die Ausbildung von Moden höherer transversaler Ordnung ermöglicht dabei zusätzlich eine effizientere Ausnützung des gesamten Volumens des aktiven Lasermediums.

Die gezielte Ausbildung der TEM_{00} -Mode kann in der bevorzugten Ausführungsform (Teleskopresonator) durch die im Folgenden dargestellten konstruktiven Maßnahmen erreicht werden.

Durch die Ausbildung der gekrümmten Oberflächen des Lasermediums und des sättigbaren Absorbers wird ein Strahlengang im Laserresonator erzwungen, der dazu ist geeignet, die Stabilitätsbedingung der im Laserresonator umlaufenden Strahlung zu verändern. Dies wird durch geeignete Auswahl der Werte für die Krümmung und den Abstand der optischen Flächen, die das Teleskop bilden, erreicht. Die Stabilität des Laserresonators soll dabei so eingestellt werden, dass die Ausbildung von Strahlung in höheren transversalen Moden nicht unterdrückt wird, die prinzipielle Konfiguration des Laserresonators als hemispärisch stabiler Resonator jedoch die Ausbildung einer TEM_{00} -Mode erlaubt.

Um die Ausbildung der TEM_{00} -Mode gezielt vor der Ausbildung einer Modenstruktur höherer transversaler Ordnung zu erreichen, können Modifikationen am Lasermedium (Modulation der Verstärkung) und/oder am sättigbaren Absorber (Modulation der Verluste) vorgenommen werden:

In einer Ausführungsform wird das Lasermedium, so ausgebildet, dass durch Variation der Konzentration der laseraktiven Materialien die Absorption der Pumpstrahlung eine Anregungsenergieverteilung in der Art ausbildet, dass eine Anregung sowohl der TEM_{00} -Grundmode als

auch Moden höherer transversaler Ordnung gewährleistet ist. Folglich ist die Geometrie des Laseresonators so auszulegen, dass die Ausbildung sowohl der TEM_{00} -Grundmode als auch von Moden höherer transversaler Ordnung gewährleistet ist.

In einer weiteren Ausführungsform wird der sättigbare Absorber dergestalt ausgebildet, dass die Anfangstransmission in den Bereichen, die durch die TEM_{00} -Mode überstrichen werden, höher gehalten wird, als in den Bereichen, die bei Ausbildung von Moden höherer transversaler Ordnung durchlaufen werden. Die erhöhte Anfangstransmission in diesen Raumbereichen kann durch spezielles Design des sättigbaren Absorbers erreicht werden, wie zum Beispiel durch eine Verringerung der optischen Weglänge im sättigbaren Absorber oder durch eine Verringerung der Konzentration der für die Funktion des sättigbaren Absorbers notwendigen Dotierungen in Form eines Gradientenprofils. Hierdurch wird jeweils eine in transversaler Richtung variierende Sättigungsintensität des Absorbers erreicht.

Eine vereinfachte Möglichkeit, den Wirkungsquerschnitt im Absorber entlang der Radialkoordinate - also in transversaler Richtung - zu verändern, wird durch Ineinanderfügen von sättigbaren Absorbern mit unterschiedlicher Dotation erreicht (Stufenprofil). Lasermode, die sich im äußeren Bereich des Absorbers ausbreiten, durchlaufen demnach räumliche Bereiche anderer Sättigungsintensität und schwingen daher zeitversetzt an.

Um die Zeitverzögerung der Abgabe des Laserlichts mit unterschiedlicher Modenstruktur, vorzugsweise zwischen den Pulsen auf ein für eine sichere Zündung notwendigen Abstand einzustellen, kann es notwendig sein, das Anschwingverhalten der Moden höherer transversaler Ordnung gezielt zeitlich zu steuern. Sollte daher die TEM_{00} -Mode zu früh im Vergleich zu höheren Moden anschwingen, ist die Ausbildung der Moden höherer transversaler Ordnung durch Modulation der Verstärkungs- bzw. Verlustquerschnitte auch in Richtung auf leichteres Anschwingen relativ zur TEM_{00} -Mode zu ermöglichen. Je nach Pumpgeometrie und Anregungsenergieverteilung im Lasermedium kann es daher notwendig sein, die Verlustmechanismen im sättigbaren Absorber für die TEM_{00} -Mode zu erhöhen. Dies geschieht sinngemäß durch Verlängerung des optischen Weges im sättigbaren Absorber oder durch höhere Konzentration der Absorberionen im Zentrum bei konstanter Geometrie.

Ein großer Vorteil der Variante der Laserlichterzeugungsvorrichtung, bei der das Laserlicht pulsweise abgegeben wird, liegt darin, dass erstens durch die Mehrpulsausbildung die Effizienz der Nutzung der Laserenergie deutlich erhöht wird (einem kurzen, gut fokussierbaren Puls zur Plasmaerzeugung folgt ein zweiter Puls, um den Energieinhalt des Plasmas zu erhöhen oder zumindest über einen längeren Zeitraum aufrechtzuerhalten), und zweitens durch die räumlich unterschiedliche Ausbreitung bzw. Form der Lasermode das Plasma in seinem Volumen deutlich vergrößert werden soll, was besonders bei der Zündung von Magergemischen von Vorteil ist.

Zusätzlich kann ein Laser dieser Bauart auf den unerwünschten Effekt der Ablagerungen am verwendeten Brennraumfenster positiven Einfluss nehmen da die Energiedichte am Fenster auf zwei oder mehrere Pulse aufgeteilt wird.

Beispielsweise könnte Laserlicht in den Brennraum des Verbrennungsmotors eingebracht werden, das in zeitlicher Abfolge eine TEM_{00} -Modenstruktur und eine $TEM_{p=0,l=8}$ -Modenstruktur aufweist. Licht mit einer $TEM_{p=0,l=8}$ -Modenstruktur weist annähernd die Struktur eines Hohlzylinders auf, wobei tangential mehrere Nullstellen vorhanden sind.

Schutz begehrt wird auch für ein Verfahren zur Zündung eines im Brennraum eines Verbrennungsmotors, insbesondere nach einem der Ansprüche 1 bis 11, befindlichen Kraftstoff-Luft-Gemisches durch das von einer Laserlichterzeugungsvorrichtung abgegebene Laserlicht, wobei die transversale Modenstruktur des Laserlichts zeitlich verändert wird.

Beispielsweise kann bei einem derartigen Verfahren vorgesehen sein, zuerst zur Erzeugung eines Plasmas im Kraftstoff-Luft-Gemisch Laserlicht mit einer TEM₀₀-Modenstruktur in den Brennraum einzubringen und anschließend zum Nachheizen des Plasmas Laserlicht mit einer Modenstruktur höherer transversaler Ordnung in den Brennraum einzubringen.

5

Weitere Vorteile und Einzelheiten der Verbindung ergeben sich anhand der nachfolgenden Figuren sowie der dazugehörigen Figurenbeschreibung. Dabei zeigen:

- Fig. 1a, 1b zwei verschiedene Ausführungsformen des bei einem erfindungsgemäßen Verbrennungsmotor einzusetzenden Laserresonators,
- Fig. 2a-d eine schematische Darstellung eines sättigbaren Absorbers, den Wirkungsquerschnitt des Absorbers in transversaler Richtung, die Intensität des abgegebenen Laserlichts in Abhängigkeit von der Zeit und die räumliche Struktur des abgegebenen Laserlichts in Abhängigkeit von der Zeit,
- Fig. 3a-d eine schematische Darstellung eines sättigbaren Absorbers, den Wirkungsquerschnitt des Absorbers in transversaler Richtung, die Intensität des abgegebenen Laserlichts in Abhängigkeit von der Zeit und die räumliche Struktur des abgegebenen Laserlichts in Abhängigkeit von der Zeit, für eine weitere Ausführungsform eines Absorbers und
- Fig. 4 ein Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Verbrennungsmotors.

Fig. 1a zeigt ein Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Laserlichterzeugungsvorrichtung 1 umfassend einen Laserresonator 2 der Länge L und eine Einkoppeloptik 3 für die Strahlung eines in Fig. 1 nicht dargestellten Pumplasers. Der Laserresonator 2 weist ein Lasermedium 4 sowie einen passiven sättigbaren Absorber 5 auf. Die optischen Oberflächen des Laserresonators 2 werden durch Oberflächen des Lasermediums 4 und des Absorbers 5 gebildet. So bilden die Oberflächen 6 und 7 die Spiegel des Laserresonators 2. Die Oberflächen 8 und 9 sind derart ausgebildet, dass sich der Strahlengang eines Teleskops ergibt, welcher in Fig. 1a mit einer Reduktion und in Fig. 1b mit einer Aufweitung des Strahldurchmessers verbunden ist.

In Fig. 1a wird das Lasermedium 4 durch über die Einkoppeloptik 3 eingekoppelte Strahlung homogen gepumpt. Der passive sättigbare Absorber 5 ist homogen dotiert. Der Absorber 5 ist dabei in transversaler Richtung derart ausgestaltet, dass die optische Weglänge mit zunehmendem Abstand von der optischen Achse 10 zunimmt. Mit anderen Worten weist der passive sättigbare Absorber 5 mit zunehmendem Abstand von der optischen Achse 10 mehr Substanz auf. Dies führt dazu, dass es im Bereich der optischen Achse 10, in welchem die TEM₀₀-Mode lokalisiert ist, zu einem früheren Durchbrechen kommt. In den Außenbereichen des sättigbaren Absorbers 5, in denen die Moden höherer transversaler Ordnung lokalisiert sind, kommt es hingegen zu einem späteren Durchbrechen. Dies führt insgesamt dazu, dass von der Laserlichterzeugungsvorrichtung 1 in zeitlicher Abfolge ein erster Puls mit einer TEM₀₀-Modenstruktur und ein zweiter Puls mit einer Modenstruktur höherer transversaler Ordnung abgegeben wird.

Die in Fig. 1b dargestellte Laserlichterzeugungsvorrichtung 1 unterscheidet sich von der Laserlichterzeugungsvorrichtung 1 der Fig. 1a dadurch, dass zum einen die Oberflächen 8 und 9 derart ausgebildet sind, dass eine Aufweitung des Strahldurchmessers erfolgt und zum anderen der passive sättigbare Absorber 5 derart ausgebildet ist, dass mit zunehmendem Abstand von der optischen Achse 10 eine Verringerung der optischen Weglänge erfolgt. Mit anderen Worten weist der passive sättigbare Absorber 5 mit zunehmendem Abstand von der optischen Achse 10 weniger Substanz auf. Diese Maßnahme wurde getroffen, um eine zeitliche Verzögerung des Anschwingens der TEM₀₀-Mode zu erzielen, um den zeitlichen Abstand zwischen dem ersten Puls mit TEM₀₀-Modenstruktur und dem zweiten Puls mit einer Modenstruktur höherer transversaler Ordnung zu verringern.

Alternativ zu der in Fig. 1a und 1b gewählten Maßnahme eines homogen dotierten passiven

Absorbers 5 können auch Absorber 5 eingesetzt werden, welche eine in transversaler Richtung variierende Dotation aufweisen. Derartige Absorber sind in den Fig. 2a und 3a dargestellt.

In Fig. 2a ist die Ionenkonzentration des sättigbaren Absorbers 5 mit zunehmendem Abstand r in einer ersten Ausführungsform abfallend (Kurve 11 in Fig. 2b) und in einer zweiten Ausführungsform (Kurve 12 in Fig. 2b) ansteigend ausgebildet. Die hierdurch entstehende Intensität bzw. räumliche Ausbildung der abgegebenen Laserstrahlung ist in den Fig. 2c und 2d dargestellt.

In Fig. 3a wurde ein Stufenprofil in der Ionenkonzentration des sättigbaren Absorbers 5 gewählt. Es wurden sozusagen zwei homogen dotierte Materialien ineinander gesteckt. In einer ersten Ausführungsform wurde dabei eine im Zentrum des Absorbers 5 höhere Ionenkonzentration (Kurve 13 in Fig. 3b) gewählt. In einer zweiten Ausführungsform wurde im Gegensatz dazu eine niedrigere Ionenkonzentration gewählt (Kurve 14 in Fig. 3b). Die hierdurch entstehende Intensität bzw. räumliche Ausbildung der abgegebenen Laserstrahlung ist in den Fig. 3c und 3d dargestellt.

In Fig. 4 ist ein Verbrennungsmotor 15 mit einer erfindungsgemäßen Laserlichterzeugungsvorrichtung 1 dargestellt. Das von der Laserlichterzeugungsvorrichtung 1 abgegebene Laserlicht 16 wird über einen Lichtleiter 17, einer durch die Linsen 18 und 19 gebildeten Aufweiteoptik und ein Brennraumfenster 20 in den Brennraum 21 eines Zylinders 22 eingebracht. Das Brennraumfenster 20 ist dabei derart ausgebildet, dass das Laserlicht 16 im Brennraum 21 auf das Fokussvolumen 23 fokussiert wird.

Patentansprüche:

1. Verbrennungsmotor mit einer Laserlichterzeugungsvorrichtung, *dadurch gekennzeichnet*, dass die Laserlichterzeugungsvorrichtung (1) derart ausgebildet ist, dass sie dazu geeignet ist, Laserlicht (16) mit einer sich zeitlich verändernden transversalen Modenstruktur abzugeben.
2. Verbrennungsmotor nach Anspruch 1 mit einem Brennraum, in den ein Kraftstoff-Luft-Gemisch einbringbar ist, *dadurch gekennzeichnet*, dass die Laserlichterzeugungsvorrichtung (1) derart ausgebildet ist, dass sie dazu geeignet ist, Laserlicht (16) abzugeben, das in zeitlicher Abfolge eine TEM_{00} -Modenstruktur und eine Modenstruktur höherer transversaler Ordnung aufweist, wobei das eine TEM_{00} -Modenstruktur aufweisende Laserlicht (16) zur Erzeugung eines laserinduzierten Plasmas im Kraftstoff-Luft-Gemisch ausgebildet ist und wobei das eine Modenstruktur höherer transversaler Ordnung aufweisende Laserlicht (16) zum Nachheizen des Plasmas ausgebildet ist.
3. Verbrennungsmotor nach Anspruch 1 oder 2, *dadurch gekennzeichnet*, dass die Laserlichterzeugungsvorrichtung (1) einen Laserresonator (2) aufweist, der derart ausgebildet ist, dass er in Bezug auf wenigstens zwei Moden verschiedener transversaler Ordnung des abgebbaren Laserlichtes (16) stabil betreibbar ist.
4. Verbrennungsmotor nach Anspruch 3, *dadurch gekennzeichnet*, dass die optischen Oberflächen des Laserresonators (2) derart ausgebildet und zueinander angeordnet sind, dass der Strahldurchmesser eines in den Laserresonator (2) eingebrachten Lichtstrahls veränderbar ist.
5. Verbrennungsmotor nach Anspruch 3 oder 4, *dadurch gekennzeichnet*, dass im Laserresonator (2) ein Lasermedium (4) und ein passiver sättigbarer Absorber (5) angeordnet sind.
6. Verbrennungsmotor nach Anspruch 5, *dadurch gekennzeichnet*, dass jeweils eine Oberflä-

che (6, 7) des Lasermediums (4) und des Absorbers (5) derart ausgebildet und angeordnet ist, dass sie einen Spiegel des Laserresonators (2) bildet.

- 5 7. Verbrennungsmotor nach Anspruch 5 oder 6, *dadurch gekennzeichnet*, dass die optischen Oberflächen des Laserresonators (2) durch die Oberflächen (6, 7, 8, 9) des Lasermediums (4) und des Absorbers (5) gebildet werden.
- 10 8. Verbrennungsmotor nach einem der Ansprüche 5 bis 7, *dadurch gekennzeichnet*, dass der sättigbare Absorber (5) derart ausgebildet ist, dass er in transversaler Richtung (r) eine variierende Sättigungsintensität aufweist.
- 15 9. Verbrennungsmotor nach Anspruch 8, *dadurch gekennzeichnet*, dass der sättigbare Absorber (5) derart ausgebildet ist, dass er in transversaler Richtung (r) wenigstens zwei Bereiche unterschiedlicher Sättigungsintensität aufweist.
- 20 10. Verbrennungsmotor nach Anspruch 8, *dadurch gekennzeichnet*, dass der sättigbare Absorber (5) in transversaler Richtung (r) eine variierende optische Weglänge aufweist.
- 25 11. Verbrennungsmotor nach Anspruch 8 oder 10, *dadurch gekennzeichnet*, dass der sättigbare Absorber (5) in transversaler Richtung (r) eine variierende Dotation aufweist.
- 30 12. Verfahren zur Zündung eines im Brennraum eines Verbrennungsmotors, insbesondere nach einem der Ansprüche 1 bis 11, befindlichen Kraftstoff-Luft-Gemisches durch das von einer Laserlichterzeugungsvorrichtung abgegebene Laserlicht, *dadurch gekennzeichnet*, die transversale Modenstruktur des Laserlichts (16) zeitlich verändert wird.
- 35 13. Verfahren nach Anspruch 12, *dadurch gekennzeichnet*, dass zuerst zur Erzeugung eines Plasmas im Kraftstoff-Luft-Gemisch Laserlicht (16) mit einer TEM₀₀-Modenstruktur in den Brennraum (21) eingebracht wird und anschließend zum Nachheizen des Plasmas Laserlicht (16) mit einer Modenstruktur höherer transversaler Ordnung in den Brennraum (21) eingebracht wird.

Hiezu 5 Blatt Zeichnungen



Fig. 1a

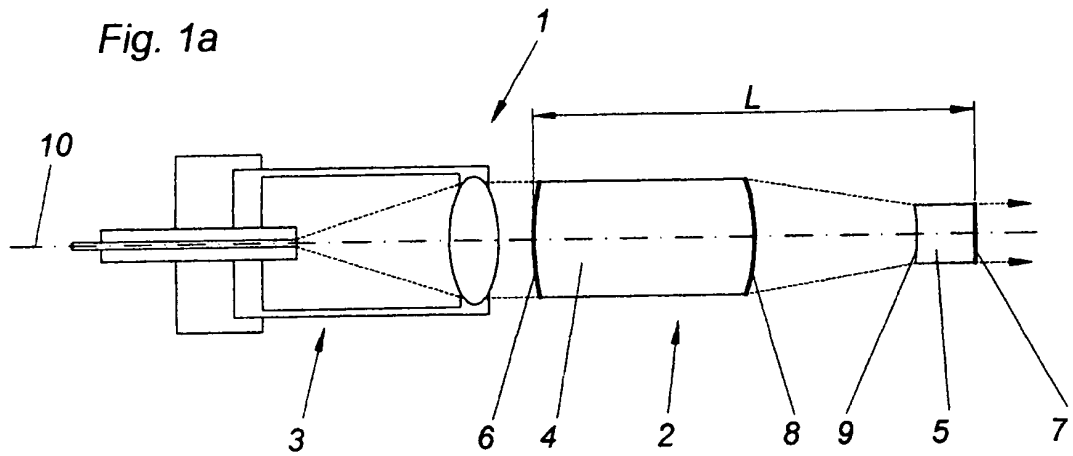


Fig. 1b

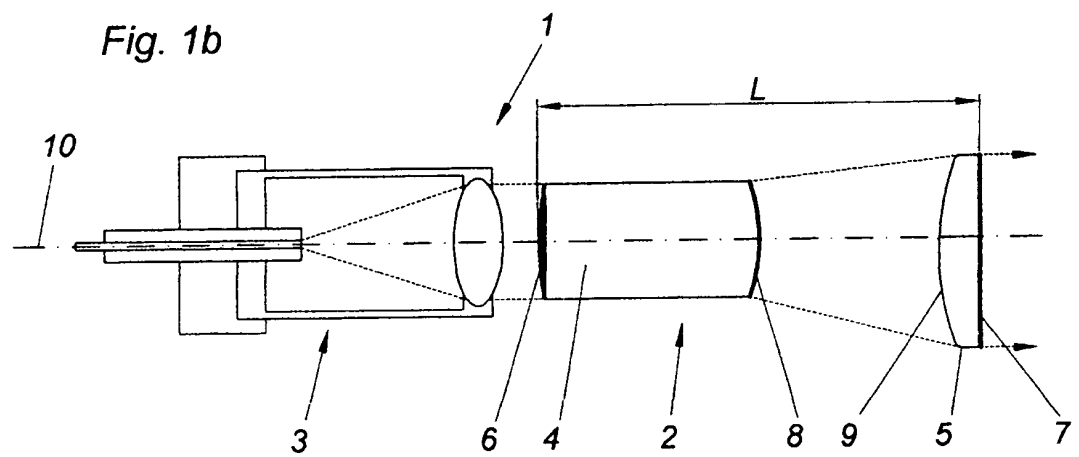




Fig. 2a

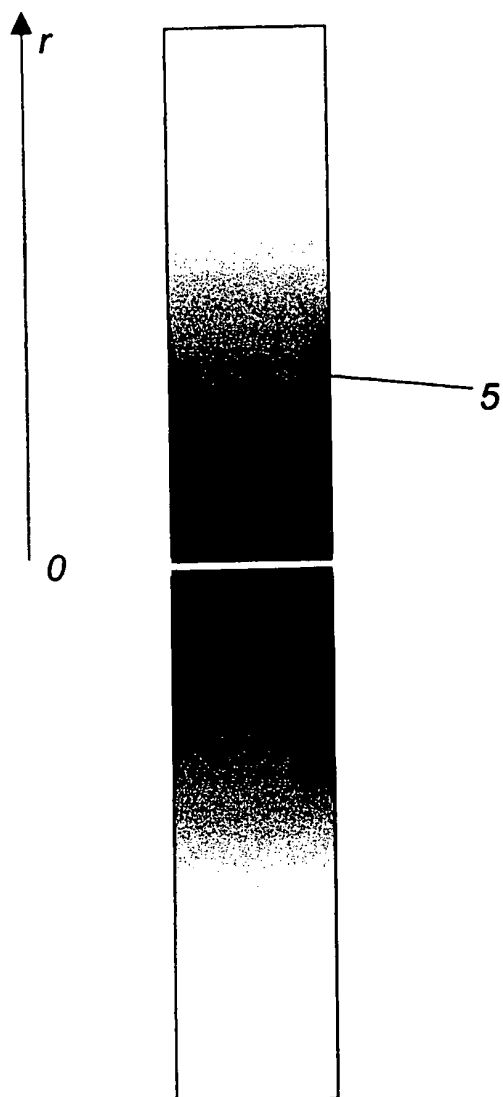




Fig. 2b

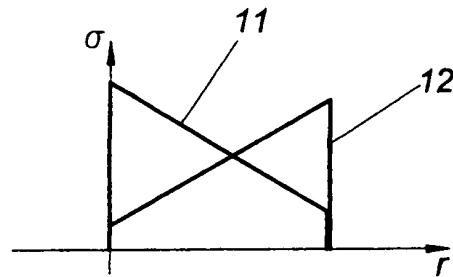


Fig. 2c

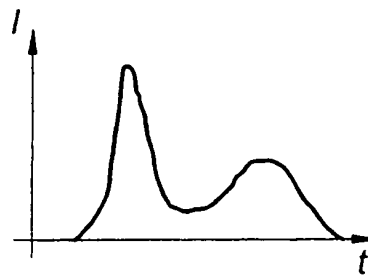


Fig. 2d

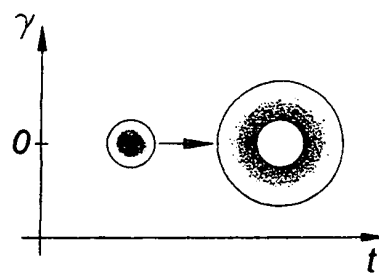




Fig. 3a

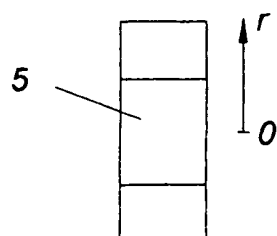


Fig. 3b

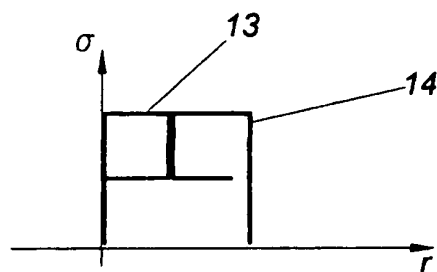


Fig. 3c

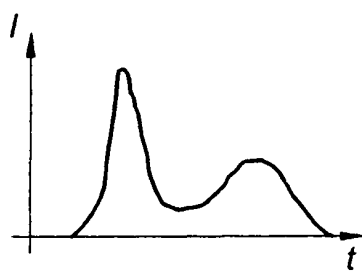


Fig. 3d

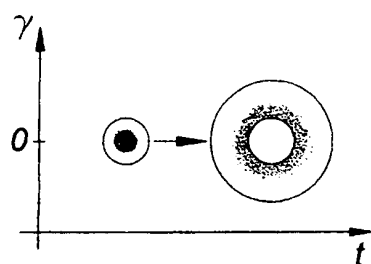




Fig. 4

