



(10) **DE 10 2017 120 512 B4** 2022.09.29

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2017 120 512.8**
 (22) Anmeldetag: **06.09.2017**
 (43) Offenlegungstag: **07.03.2019**
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **29.09.2022**

(51) Int Cl.: **F02B 43/12 (2006.01)**
F02D 19/02 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
KEYOU GmbH, 85716 Unterschleißheim, DE

(74) Vertreter:
**Hofstetter, Schurack & Partner - Patent- und
 Rechtsanwaltskanzlei, PartG mbB, 81541
 München, DE**

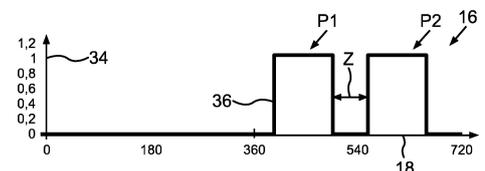
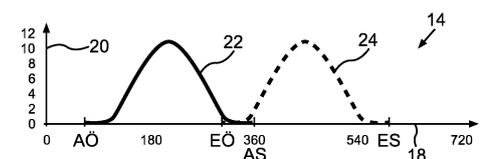
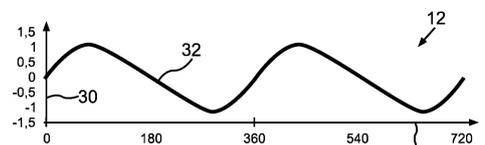
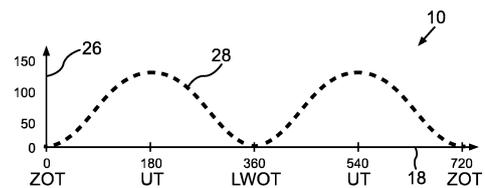
(72) Erfinder:
Prümm, Franz Werner, 56077 Koblenz, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	103 21 794	A1
DE	103 41 089	A1
DE	103 59 445	A1
DE	10 2013 013 755	A1
DE	10 2013 016 503	A1
DE	10 2015 009 898	A1
DE	60 2004 004 211	T2
EP	1 431 564	A2

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Betreiben eines Wasserstoffmotors für ein Kraftfahrzeug**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zum Betreiben eines wenigstens einen Brennraum aufweisenden Wasserstoffmotors für ein Kraftfahrzeug, bei welchem Wasserstoff als gasförmiger Kraftstoff zum Betreiben des Wasserstoffmotors direkt in den Brennraum eingeblasen wird, wobei der Wasserstoff innerhalb eines Arbeitsspiels des Wasserstoffmotors während wenigstens zweier zeitlich voneinander beabstandeter Phasen (P1, P2) direkt in den Brennraum eingeblasen wird dadurch gekennzeichnet, dass die wenigstens zwei Phasen (P1, P2) zeitlich vor der ersten innerhalb des Arbeitsspiels stattfindenden Zündung beginnen und enden, wobei sich die erste Phase (P1) von 400 Grad Kurbelwinkel nach dem oberen Zündtotpunkt (ZOT) des Kolbens bis 500 Grad Kurbelwinkel nach dem oberen Zündtotpunkt (ZOT) erstreckt.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben eines Wasserstoffmotors für ein Kraftfahrzeug gemäß dem Oberbegriff von Patentanspruch 1.

[0002] Ein solches Verfahren zum Betreiben eines wenigstens einen Brennraum aufweisenden und beispielsweise als Wasserstoffmotor ausgebildeten Gasmotors, insbesondere für ein Kraftfahrzeug, ist beispielsweise bereits der DE 103 59 445 A1 als bekannt zu entnehmen. Bei dem Verfahren wird ein gasförmiger Kraftstoff, insbesondere Wasserstoff, zum Betreiben des Gasmotors, insbesondere in seinem befeuerten Betrieb, direkt in den Brennraum eingeblasen, wobei der gasförmige Kraftstoff innerhalb eines Arbeitsspiels des Gasmotors während wenigstens zweier zeitlich voneinander beabstandeter Phasen direkt in den Brennraum eingeblasen wird.

[0003] Des Weiteren offenbart die EP 1 431 564 A2 ein Verfahren für eine mit Gas betriebene Brennkraftmaschine, wobei das Gas über eine Einblasevorrichtung in einen Brennraum eingeblasen und eine Schichtladung erzeugt wird.

[0004] Des Weiteren ist aus der DE 103 21 794 A1 ein Verfahren zum Betreiben einer gasbetriebenen, insbesondere wasserstoffbetriebenen, Brennkraftmaschine bekannt.

[0005] Die DE 103 41 089 A1 offenbart ein Verfahren zur Steuerung der Direkteinspritzung von Autogas, insbesondere CNG-Gas, in einen Zylinder einer Brennkraftmaschine. Mittels einer Steuereinheit wird das Autogas in Abhängigkeit von Öffnungs- und/oder Verschlusszeiten eines Einlassventils in den mit Frischluft gefüllten Zylinder eingespritzt. Dabei ist es vorgesehen, dass die Gaseinspritzung frühestens dann gestartet wird, wenn im Zylinder wenigstens annähernd die maximale Füllmenge Frischluft erreicht ist.

[0006] Der DE 10 2013 016 503 A1 ist ein Verfahren zum Betreiben einer zumindest mit einem gasförmigen Kraftstoff betreibbaren, eine Kurbelwelle, wenigstens einen Zylinder und einen in dem Zylinder aufgenommenen und an die Kurbelwelle gekoppelten Kolben umfassenden Hubkolben-Verbrennungskraftmaschine als bekannt zu entnehmen. Bei dem Verfahren wird mittels eines Injektors innerhalb eines Arbeitsspiels des Kolbens eine vorgebbare Menge des gasförmigen Kraftstoffs durch wenigstens zwei zeitlich voneinander beabstandete Einblasungen in den Zylinder direkt eingeblasen. Außerdem ist es vorgesehen, dass die Einblasung innerhalb eines Bereichs von einschließlich 420 Grad Kurbelwinkel bis einschließlich 90 Grad Kurbelwinkel vor dem oberen Zündtotpunkt des Kolbens durchgeführt wird.

[0007] Aus der DE 10 2015 009 898 A1 ist ein Verfahren zum Betreiben einer zumindest mit einem gasförmigen Kraftstoff betreibbaren und wenigstens einem Brennraum aufweisenden Hubkolben-Verbrennungskraftmaschine bekannt. Bei dem Verfahren wird innerhalb eines Arbeitsspiels der Hubkolben-Verbrennungskraftmaschine mittels eines Injektors eine vorgebbare Menge des gasförmigen Kraftstoffs durch wenigstens zwei zeitlich voneinander beabstandete Einblasungen in den Brennraum direkt eingeblasen. Dabei ist es vorgesehen, dass die Hubkolben-Verbrennungskraftmaschine zumindest in einem Betriebsbereich nach dem Miller-Betrieb betrieben wird.

[0008] Die DE 10 2013 013 755 A1 offenbart ein Verfahren zum Betreiben einer wenigstens einen Zylinder und einen in dem Zylinder relativ zu diesem translatorisch bewegbar aufgenommenen Kolben aufweisenden, als Vier-Takt-Motor ausgebildeten und mit einem Hauptkraftstoff, welcher mittels einer Einspritzeinrichtung in den Zylinder einbringbar ist, betreibbaren Hubkolben-Verbrennungskraftmaschine. Bei dem Verfahren wird wenigstens ein von dem Hauptkraftstoff unterschiedliches Zusatzmedium mittels der Einspritzeinrichtung der Hubkolben-Verbrennungskraftmaschine in den Zylinder durch wenigstens zwei zeitlich voneinander beabstandete Einspritzungen eingebracht, welche innerhalb eines Arbeitsspiels der Hubkolben-Verbrennungskraftmaschine durchgeführt werden. Dabei ist es vorgesehen, dass die Einspritzungen jeweils zumindest teilweise in einem Bereich von einschließlich 280 Grad Kurbelwinkel vor dem oberen Zündtotpunkt des Kolbens bis einschließlich 80 Grad Kurbelwinkel nach dem oberen Zündtotpunkt des Kolbens durchgeführt werden.

[0009] Außerdem ist aus der DE 60 2004 004 211 T2 ein Verfahren zum Betrieb eines Viertakt-Verbrennungsmotors mit Direkteinspritzung bekannt.

[0010] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein Verfahren der eingangs genannten Art derart weiterzuentwickeln, dass ein besonders vorteilhafter Betrieb des Wasserstoffmotors realisierbar ist.

[0011] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen mit zweckmäßigen Weiterbildungen der Erfindung sind in den übrigen Ansprüchen angegeben.

[0012] Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zum Betreiben eines wenigstens einen Brennraum aufweisenden, als Wasserstoffmotor ausgebildeten Gasmotors für ein Kraftfahrzeug wird Wasserstoff als gasförmiger Kraftstoff zum Betreiben des Gasmotors, insbesondere in seinem befeuerten Betrieb, direkt in den Brennraum eingeblasen, wobei der

Wasserstoff (gasförmiger Kraftstoff) innerhalb eines Arbeitsspiels des Wasserstoffmotors während wenigstens zweier zeitlich voneinander beabstandeter Phasen direkt in den Brennraum eingeblasen wird. Der Wasserstoff wird in dem beispielsweise als Zylinder ausgebildeten Brennraum zumindest zusammen mit Luft verbrannt, wodurch der Wasserstoffmotor (Gasmotor), insbesondere in seinem befeuerten Betrieb, betrieben wird. Mit anderen Worten wird durch die Verbrennung des Wasserstoffes mit Luft der befeuerte Betrieb des Wasserstoffmotors bewirkt, wobei im Rahmen des befeuerten Betriebs des Wasserstoffmotors Verbrennungsvorgänge in dem Brennraum ablaufen. Dabei befindet sich beispielsweise der Wasserstoffmotor in seinem Zugbetrieb, in welchem beispielsweise das Kraftfahrzeug, welches beispielsweise als Nutzfahrzeug ausgebildet ist, mittels des Wasserstoffmotors antreibbar ist beziehungsweise angetrieben wird.

[0013] Vorzugsweise ist der Wasserstoffmotor (Gasmotor) als 4-Takt-Motor ausgebildet, sodass das Arbeitsspiel, insbesondere genau, vier Takte aufweist. Die vier Takte sind: Ansaugen beziehungsweise Ansaugtakt; Verdichten und Zünden beziehungsweise Kompressions- oder Verdichtungstakt; Arbeiten beziehungsweise Arbeitstakt; Ausstoßen beziehungsweise Ausstoßtakt. Im Rahmen der Erfindung wird das Arbeitsspiel des Gasmotors insbesondere derart betrachtet, dass der erste, innerhalb des Arbeitsspiels auftretende Takt der Arbeitstakt ist. Der zweite innerhalb des Arbeitsspiels auftretende und sich an den Arbeitstakt anschließende Takt ist der Ausstoßtakt. Der dritte innerhalb des Arbeitsspiels auftretende und sich an den Ausstoßtakt anschließende Takt ist der Ansaugtakt, sodass der vierte innerhalb des Arbeitsspiels auftretende und sich an den Ansaugtakt anschließende Takt der Verdichtungstakt ist.

[0014] Dabei ist ferner beispielsweise in dem insbesondere als Zylinder ausgebildeten Brennraum ein Kolben bewegbar aufgenommen. Insbesondere ist der Kolben translatorisch bewegbar in dem Brennraum aufgenommen. Der Kolben ist, insbesondere gelenkig, mit einer beispielsweise als Kurbelwelle ausgebildeten Abtriebswelle gekoppelt, wobei beispielsweise der Gasmotor als Verbrennungskraftmaschine in Form einer Hubkolbenmaschine ausgebildet ist. Durch die beispielsweise gelenkige Kopplung des translatorisch in dem Brennraum aufgenommenen Kolbens mit der Abtriebswelle werden die translatorischen Bewegungen des Kolbens in eine rotatorische Bewegung der Abtriebswelle umgewandelt. Der gasförmige Kraftstoff und die Luft bilden in dem Brennraum ein Kraftstoff-Luft-Gemisch, welches auch einfach als Gemisch bezeichnet wird. Das Gemisch wird beispielsweise gezündet und anschließend verbrannt, wodurch sich das Gemisch beziehungsweise aus der Verbrennung resultierende Ver-

brennungsprodukte ausdehnt beziehungsweise ausdehnen. Hierdurch wird der Kolben angetrieben und dadurch beispielsweise aus seinem oberen Totpunkt in seinen unteren Totpunkt bewegt. Durch die Kopplung des Kolbens mit der Abtriebswelle wird die Abtriebswelle angetrieben, sodass der Gasmotor über die Abtriebswelle Drehmomente zum Antreiben des Kraftfahrzeugs bereitstellen kann.

[0015] Zum Verbrennen des Gemisches wird dieses, insbesondere durch Fremdzündung, gezündet und in der Folge verbrannt. Im Rahmen der Fremdzündung wird mittels einer beispielsweise als Zündkerze ausgebildeten Fremdzündeinrichtung innerhalb des Arbeitsspiels wenigstens ein Zündfunke, insbesondere in dem Brennraum, erzeugt. Mittels des Zündfunkens wird das Gemisch gezündet und in der Folge verbrannt. Durch das Verbrennen des Gemischs dehnt sich dieses beziehungsweise aus der Verbrennung resultierende Verbrennungsprodukte aus, wodurch der Kolben angetrieben wird.

[0016] Bei der oben beschriebenen Betrachtung des Arbeitsspiels bewegt sich der Kolben beispielsweise ausgehend von seinem oberen Totpunkt beziehungsweise von seinem oberen Totpunkt kommend in seinen unteren Totpunkt, dann wieder in seinen oberen Totpunkt, dann in seinen unteren Totpunkt und dann wieder in seinen oberen Totpunkt. Der obere Totpunkt des Kolbens tritt somit innerhalb des Arbeitsspiels genau dreimal auf, während der untere Totpunkt des Kolbens innerhalb des Arbeitsspiels genau zweimal auftritt.

[0017] Des Weiteren wird zwischen genau zwei Arten von oberen Totpunkten unterschieden. Eine erste der Arten ist der sogenannte obere Zündtotpunkt (ZOT), in dessen Bereich das Gemisch gezündet wird. Die zweite Art ist der sogenannte obere Ladungswechseltotpunkt (LWOT), in dessen Rahmen der Kolben den Ausstoßtakt und den Ansaugtakt durchführt und dabei im Rahmen des Ausstoßtakts Abgas, welches aus der Verbrennung des Gemisches resultiert, aus dem Brennraum auschiebt und im Rahmen des Ansaugtakts Frischgas, das heißt insbesondere die zuvor genannte Luft, in den Brennraum einsaugt. Bei der oben beschriebenen Betrachtung des Arbeitsspiels liegt dabei der obere Ladungswechseltotpunkt (LWOT) zwischen den innerhalb des Arbeitsspiels auftretenden unteren Totpunkten, sodass der erste innerhalb des Arbeitsspiels auftretende untere Totpunkt des Kolbens zwischen dem oberen Zündtotpunkt (ZOT) und dem oberen Ladungswechseltotpunkt (LWOT) liegt. Mit anderen Worten schließt sich der erste innerhalb des Arbeitsspiels auftretende untere Totpunkt unmittelbar an den oberen Zündtotpunkt an, wobei sich der obere Ladungswechseltotpunkt unmittelbar an den ersten innerhalb des Arbeitsspiels auftretenden unteren Totpunkt anschließt.

[0018] Demzufolge liegt der zweite innerhalb des Arbeitsspiels auftretende untere Totpunkt des Kolbens zwischen dem oberen Ladungswechseltotpunkt und dem oberen Zündtotpunkt, sodass sich der zweite innerhalb des Arbeitsspiels auftretende untere Totpunkt unmittelbar beziehungsweise direkt an den oberen Ladungswechseltotpunkt anschließt, und sodass sich innerhalb des Arbeitsspiels der obere Zündtotpunkt unmittelbar beziehungsweise direkt an den zweiten innerhalb des Arbeitsspiels auftretenden unteren Totpunkt anschließt. Somit ist beispielsweise der erste innerhalb des Arbeitsspiels auftretende obere Totpunkt, bei welchem - vor dem Hintergrund der oben beschriebenen Betrachtung des Arbeitsspiels - das Arbeitsspiel beginnt, der obere Zündtotpunkt. Der dritte innerhalb des Arbeitsspiels auftretende obere Totpunkt, bei welchem das Arbeitsspiel vor dem Hintergrund der oben beschriebenen Betrachtung endet, ist ebenfalls der obere Zündtotpunkt, sodass der zweite innerhalb des Arbeitsspiels auftretende obere Totpunkt des Kolbens zwischen den oberen Zündtotpunkten liegt und somit der obere Ladungswechseltotpunkt (LWOT) ist.

[0019] Um nun einen besonders vorteilhaften Betrieb des vorzugsweise als Wasserstoffmotor ausgebildeten Gasmotors realisieren zu können, ist es vorgesehen, dass die wenigstens zwei Phasen zeitlich vor der beziehungsweise einer ersten innerhalb des Arbeitsspiels stattfindenden Zündung beginnen und enden. Mit anderen Worten wird, insbesondere im Bereich des oberen Zündtotpunkts, innerhalb des Arbeitsspiels wenigstens oder genau eine Zündung bewirkt, in deren Rahmen - insbesondere auf die beschriebene Weise - beispielsweise wenigstens ein Zündfunke erzeugt wird. Wird innerhalb des Arbeitsspiels lediglich beziehungsweise genau eine Zündung bewirkt, so ist diese genau eine Zündung die erste innerhalb des Arbeitsspiels stattfindende beziehungsweise auftretende Zündung, da keine weiteren Zündungen stattfinden beziehungsweise auftreten. Werden beispielsweise innerhalb des Arbeitsspiels mehrere Zündungen durchgeführt beziehungsweise finden innerhalb des Arbeitsspiels mehrere Zündungen statt, wobei diese mehreren Zündungen zeitlich aufeinanderfolgend und dabei insbesondere zeitlich voneinander beabstandet sind, so ist die erste innerhalb des Arbeitsspiels stattfindende Zündung diejenige der mehreren Zündungen, die zeitlich als allererste Zündung innerhalb des beschriebenen Arbeitsspiels stattfinden. Dabei beginnen und enden die wenigstens zwei beziehungsweise beide Phasen zeitlich vor der ersten innerhalb des Arbeitsspiels stattfindenden Zündung.

[0020] Während einer ersten der Phasen wird beispielsweise eine erste Menge beziehungsweise eine erste Teilmenge des gasförmigen Kraftstoffs direkt in den Brennraum eingeblasen. Während der

zeitlich auf die erste Phase folgenden und von der ersten Phase zeitlich beabstandeten zweiten Phase wird eine zweite Menge beziehungsweise eine zweite Teilmenge des gasförmigen Kraftstoffs direkt in den Brennraum eingeblasen. Da nun beide Phasen vor der ersten Zündung beginnen und enden, werden beide Teilmengen, insbesondere gemeinsam, mittels der ersten Zündung beziehungsweise mittels einer durch die erste Zündung bewirkten Verbrennung in dem Brennraum verbrannt. Im Gegensatz zum Stand der Technik ist es somit nicht vorgesehen, dass je Phase beziehungsweise je Teilmenge wenigstens eine eigene, separate Zündung und somit Verbrennung durchgeführt wird, sodass es im Rahmen des erfindungsgemäßen Verfahrens im Gegensatz zum Stand der Technik nicht vorgesehen ist, dass die jeweilige Teilmenge für sich beziehungsweise eigenständig verbrannt wird. Mit anderen Worten ist es im Rahmen des erfindungsgemäßen Verfahrens und im Gegensatz zum Stand der Technik nicht vorgesehen, dass zunächst die erste Teilmenge und daraufhin die zweite Teilmenge jeweils eigenständig verbrannt werden, sondern die Teilmengen werden gemeinsam beziehungsweise gleichzeitig verbrannt und werden beispielsweise gemeinsam durch die erste innerhalb des Arbeitsspiels stattfindende Zündung gezündet. Hierdurch kann ein besonders vorteilhafter, insbesondere befeuerter, Betrieb des Gasmotors realisiert werden.

[0021] Unter dem Merkmal, dass die Phasen zeitlich voneinander beabstandet sind, ist insbesondere zu verstehen, dass innerhalb des Arbeitsspiels zwischen den Phasen eine Zeitspanne vorgesehen ist, in welcher eine Einblasung beziehungsweise Einbringung des gasförmigen Kraftstoffs in den Brennraum unterbleibt. Somit endet die erste Phase, bevor die zweite Phase beginnt.

[0022] Unter dem Merkmal, dass der gasförmige Kraftstoff direkt in den Brennraum eingeblasen wird, ist insbesondere zu verstehen, dass eine innere Gemischbildung vorgesehen ist beziehungsweise dass der Gasmotor mit einer inneren Gemischbildung betrieben wird, in deren Rahmen die Luft, welche beispielsweise mittels des Kolbens in den Brennraum eingesaugt wird, erst innerhalb des Brennraums und nicht bereits stromauf des Brennraums, beispielsweise in einem Ansaugtrakt des Gasmotors, mit dem gasförmigen Kraftstoff vermischt wird.

[0023] Der Erfindung liegt insbesondere die folgende Erkenntnis zugrunde: Wasserstoff ist der einzige Kraftstoff für Verbrennungsmotoren, der keine Kohlenstoffmoleküle aufweist. Dadurch entstehen bei der Verbrennung von Wasserstoff keine, oder, beispielsweise durch Schmierölverbrennung bedingt, nur sehr geringe Schadstoffemissionen der Schadstoffgruppen Kohlenmonoxid, Kohlendioxid,

Kohlenwasserstoffverbindungen und Partikel. Somit eignet sich das erfindungsgemäße Verfahren besonders vorteilhaft zum Betreiben eines Wasserstoffmotors. Der Gasmotor wird beispielsweise als Ottomotor betrieben, sodass das Gemisch vorzugsweise durch Fremdzündung gezündet wird.

[0024] Im Vergleich zu herkömmlichen Ottomotoren, die beispielsweise mittels fossiler Brennstoffe, das heißt mittels Benzin, betrieben werden, hat ein gasförmiger Kraftstoff, insbesondere Wasserstoff, einige physikalische Eigenschaften, die eine Anpassung eines herkömmlichen Ottomotors an den Betrieb mit Wasserstoff erschweren können. Eine dieser Eigenschaften ist die geringe Dichte des Wasserstoffes im Vergleich zu flüssigem Kraftstoff wie beispielsweise Benzin. Durch die geringe Dichte nimmt der Wasserstoff einen hohen Volumenanteil des Verbrennungsgemisches ein, welches zumindest Luft und den gasförmigen Kraftstoff als Brennstoff umfasst. Insbesondere nimmt der Wasserstoff bei einem Verbrennungsluftverhältnis von 1 etwa ein Drittel des Volumens des Gemisches ein. Das Verbrennungsluftverhältnis wird auch als Lambda (λ) bezeichnet und setzt - wie allgemein bekannt ist - die tatsächlich für die jeweilige Verbrennung zur Verfügung stehende Masse der Luft ins Verhältnis zur mindestens notwendigen stöchiometrischen Luftmasse, die für eine vollständige Verbrennung des Kraftstoffes benötigt wird. Mit anderen Worten verdrängt der Wasserstoff Luft aus dem Gemisch. Durch die Verdrängung von Luft durch Wasserstoff ergibt sich eine geringe Energiedichte des Gemisches, woraus - falls keine entsprechenden Gegenmaßnahmen getroffen sind - eine geringe Leistungsdichte des einfach auch als Motor oder Verbrennungsmotor bezeichneten Gasmotors resultiert. Ein hubraumgleicher Motor wird bei Wasserstoffbetrieb eine wesentlich geringere Leistungs-Drehmomententfaltung aufweisen als bei Betrieb mit herkömmlichen, insbesondere fossilen Kraftstoffen, falls keine entsprechenden Gegenmaßnahmen getroffen sind. Eine Möglichkeit, dieser nur geringen Leistungsdichte entgegenzuwirken, ist die Verwendung der inneren Gemischbildung, insbesondere bei Beibehaltung anderer Wesensmerkmale des Ottomotors wie beispielsweise Fremdzündung, Quantitätsregelung und Gemischverdichtung.

[0025] Überraschenderweise wurde gefunden, dass die direkte Einblasung oder Injektion des Wasserstoffes in den Brennraum erst dann beginnen sollte, wenn beispielsweise ein dem Brennraum zugeordnetes Einlassventil beziehungsweise dem Brennraum zugeordnete Einlassventile, insbesondere alle dem Brennraum zugeordnete Einlassventile, geschlossen sind, um dadurch den zuvor beschriebenen Verdrängungseffekt zumindest nahezu vollständig eliminieren zu können.

[0026] Eine zur Gemischbildung verfügbare Zeit wird durch die Druckerhöhung im Brennraum während des Verdichtungstaktes bestimmt. Um dabei beispielsweise eine vorteilhafte überkritische Durchströmung einer beispielsweise auch als Injektor bezeichneten Einblasevorrichtung, mittels welcher der gasförmige Kraftstoff direkt in den Brennraum eingeblasen wird, zu gewährleisten, sollte der Druck an einem Einlass des Injektors stets mehr als das Doppelte des Druckes an einem Auslass und somit auf einer Auslassseite des Injektors betragen, da beispielsweise der Druck an dem Auslass beziehungsweise auf der Auslassseite dem im Brennraum herrschenden Innendruck entspricht. Über den genannten Einlass wird beispielsweise dem Injektor der gasförmige Kraftstoff zugeführt beziehungsweise der gasförmige Kraftstoff in den Injektor eingeleitet. Über den genannten Auslass wird beispielsweise der gasförmige Kraftstoff aus dem Injektor ausgeleitet, wobei insbesondere der Injektor den gasförmigen Kraftstoff über den Auslass direkt in den Brennraum einbläst. Durch dieses beschriebene Druckverhältnis kann sichergestellt werden, dass eine Durchflussmenge durch den Injektor unabhängig von dem im Brennraum herrschenden Druck ist, wodurch eine genaue Dosierung einer in den Brennraum einzublasenden Menge des Kraftstoffes möglich ist. Die Menge des einzublasenden Kraftstoffes wird auch als Kraftstoffmenge oder Einblasmenge bezeichnet.

[0027] Aus den oben beschriebenen Randbedingungen können sich jedoch unterschiedliche Nachteile ergeben:

- Hoher Einlassdruck am Injektor und dadurch bedingt eine begrenzte Nutzbarkeit des in Druckgasbehältern gespeicherten gasförmigen Kraftstoffes und damit eine verringerte Reichweite des Kraftfahrzeugs mit Wasserstoffantrieb. Außerdem werden je nach Bauweise hohe Kräfte zum Öffnen und Schließen des Injektors, insbesondere eines Ventils des Injektors, erforderlich, was hohe Anforderungen an einen insbesondere elektrischen Antrieb, insbesondere zum Bewegen des Ventils, und an Endstufen einer Steuerungselektronik zum Ansteuern des Injektors bedeutet.

- Großer Öffnungsquerschnitt des Injektors, insbesondere des Ventils des Injektors. Dies bedeutet große zu bewegende Massen und hohe Anforderungen an den Antrieb und an die Endstufen der Steuerungselektronik. Der technische Aufwand steigt mit dem Öffnungsquerschnitt an. Daher ist ein hoher Entwicklungsaufwand erforderlich. Hohe Kosten und lange Entwicklungszeiten sind die Folge.

- Durch die geringe zur Verfügung stehende Zeit bis zur Entzündung ist eine ausreichende Homogenisierung des Kraftstoff-Luft-Gemisches nicht notwendigerweise sichergestellt. In

zu fetten Gemischbereichen können hohe Stickoxid-Emissionen (NO_x-Emissionen) entstehen, in mageren Abschnitten ist mit verschleppter Verbrennung und dadurch verringertem Wirkungsgrad zu rechnen.

[0028] Ein weiterer Vorteil der inneren Gemischbildung ist die zumindest nahezu vollständige Eliminierung von Rückzündungen im Ansaugtrakt des Gasmotors. Da der Wasserstoff beispielsweise erst nach Schließen des Einlassventils in den Brennraum gelangt, hat eine spontane Entzündung des Gemisches im Brennraum keine Auswirkung auf den Ansaugtrakt.

[0029] Eine Möglichkeit, den oben beschriebenen Nachteilen entgegenzuwirken, ist die Verwendung einer Nockenwelle mit frühem Schließen des Einlassventils im Bereich des unteren Totpunkts, insbesondere des zweiten innerhalb des Arbeitsspiels auftretenden unteren Totpunkts. Eine solche Nockenwelle schränkt die Nutzeffekte der inneren Gemischbildung jedoch wieder stark ein, weil bei Verkürzung der Einlasszeit aus dynamischen und mechanischen Gründen der Ventilhub ebenfalls reduziert werden muss. Eine Verringerung des Liefergrades ist die Folge.

Die oben beschriebenen Probleme und Nachteile und Zielkonflikte können nun mittels des erfindungsgemäßen Verfahrens gelöst und vermieden werden, sodass ein besonders effizienter und somit wirkungsgradgünstiger sowie emissions- und kraftstoffverbrauchsarmer Betrieb realisierbar ist.

[0030] Insbesondere wird eine Nockenwelle mit Steuerzeiten verwendet, die auf eine zumindest nahezu optimale Füllung des Brennraums ausgelegt sind. Ferner wird beispielsweise eine innerhalb des Arbeitsspiels insgesamt in den Brennraum einzublasende Gesamtmenge des Kraftstoffs auf die zwei Phasen und somit auf die zwei Teilmengen aufgeteilt.

[0031] Um eine hinreichend große Menge an Wasserstoff in den Brennraum einzubringen und in der Folge einen effektiven und effizienten Betrieb sowie eine hohe Leistungsdichte zu realisieren, ist es erfindungsgemäß vorgesehen, dass sich - insbesondere bezogen auf die zuvor beschriebene Betrachtung des Arbeitsspiels - die erste Phase von 400 Grad Kurbelwinkel (°KW) nach dem oberen Zündtotpunkt (ZOT) bis 500 Grad Kurbelwinkel nach dem oberen Zündtotpunkt erstreckt. Dabei bezeichnet „Grad Kurbelwinkel“ eine jeweilige Drehstellung der beispielsweise als Kurbelwelle ausgebildeten Abtriebswelle, wie es aus dem allgemeinen Stand der Technik bereits hinlänglich bekannt ist. Durch diese Bezeichnung der jeweiligen Drehstellung können besonders vorteilhaft die oberen Totpunkte und die unteren Totpunkte sowie weitere, innerhalb des Arbeitsspiels auftretende Ereignisse wie beispielsweise die Zün-

dung, die Phasen, insbesondere deren Dauer, Beginn und Ende sowie jeweilige Öffnungs- und Schließzeitpunkte, zu denen sich beispielsweise jeweilige Gaswechselventile, insbesondere Einlassventile und Auslassventile, öffnen und schließen, auf jeweilige Drehstellungen der Abtriebswelle einfach referenziert werden.

[0032] In vorteilhafter Ausgestaltung der Erfindung wird als der Gasmotor ein Wasserstoffmotor betrieben, wobei als der gasförmige Kraftstoff Wasserstoff verwendet wird.

[0033] Eine weitere Ausführungsform zeichnet sich dadurch aus, dass zunächst eine erste der Phasen beginnt und endet, woraufhin die zeitlich auf die erste Phase folgende zweite Phase beginnt und endet. Dadurch sind die Phasen definiert zeitlich voneinander beabstandet.

[0034] In weiterer Ausgestaltung der Erfindung weist der Gasmotor wenigstens einen Kolben auf, welcher translatorisch bewegbar in dem beispielsweise als Zylinder ausgebildeten Brennraum aufgenommen ist.

[0035] Dabei hat es sich als besonders vorteilhaft gezeigt, wenn die erste Phase nach dem oberen Ladungswechseltotpunkt des Kolbens beginnt. Hierdurch können beispielsweise unerwünschte Rückzündeffekte in dem Ansaugtrakt des Gasmotors vermieden werden, sodass ein besonders effektiver und effizienter Betrieb darstellbar ist.

[0036] Als besonders vorteilhaft hat es sich gezeigt, wenn die erste Phase vor dem sich unmittelbar an den oberen Ladungswechseltotpunkt anschließenden unteren Totpunkt, das heißt beispielsweise vor dem zweiten innerhalb des Arbeitsspiels auftretenden unteren Totpunkt endet. Hierdurch steht eine hinreichend lange Zeitspanne zur Realisierung einer vorteilhaften Gemischbildung zur Verfügung, insbesondere bis die erste Zündung stattfindet.

[0037] Bei einer besonders vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung ist es vorgesehen, dass die zweite Phase nach dem sich unmittelbar an den oberen Ladungswechseltotpunkt anschließenden unteren Totpunkt beginnt. Hierdurch kann ein hinreichender zeitlicher Abstand zwischen den Phasen gewährleistet werden, sodass unerwünschte Verdrängungseffekte vermieden beziehungsweise besonders gering gehalten werden können. In der Folge kann eine hohe Leistungsdichte auf einfache Weise realisiert werden.

[0038] Weiterhin vorteilhaft ist es, wenn sich die zweite Phase unmittelbar an den sich unmittelbar an den oberen Ladungswechseltotpunkt anschließenden unteren Totpunkt anschließt. Hierdurch kann

eine hinreichend große Menge an Kraftstoff in den Brennraum eingebracht werden.

[0039] Als weiterhin vorteilhaft hat es sich gezeigt, wenn der gasförmige Kraftstoff in den Brennraum mittels des zuvor genannten Injektors eingeblasen wird, wobei die zweite Phase vorzugsweise beendet wird, bevor der Verdichtungsdruck im Brennraum einen Wert erreicht beziehungsweise erreicht hat, der in einem Bereich von 40% bis 60%, insbesondere von 45% bis 55% und vorzugsweise von 48% bis 52% eines vor dem Injektor, insbesondere an dessen Einlass, herrschenden Einblasedruck, mit welchem beispielsweise der gasförmige Kraftstoff in den Injektor, insbesondere über dessen Einlass, eingeleitet und/oder mittels des Injektors direkt in den Innenraum eingeblasen wird, liegt. Insbesondere wird die zweite Phase beendet, bevor der Verdichtungsdruck in dem Brennraum einen Wert erreicht hat, der etwa 50% des Einblasedrucks beträgt. Unter dem Verdichtungsdruck ist ein in dem Brennraum herrschender Druck zu verstehen, wobei der Verdichtungsdruck durch den Verdichtungstakt, das heißt dadurch bewirkt wird, dass sich der Kolben im Rahmen seines Verdichtungstakts aus seinem unteren Totpunkt in Richtung seines oberen Totpunkts und insbesondere in Richtung des oberen Zündtotpunkts bewegt und dabei das Gemisch verdichtet. Hierdurch kann eine hinreichend hohe Gesamtmenge des Kraftstoffes in den Brennraum eingeblasen werden, und dies auf besonders vorteilhafte Weise, da die zweite Phase hinreichend lange jedoch nicht übermäßig lange durchgeführt werden kann.

[0040] Eine weitere Ausführungsform zeichnet sich dadurch aus, dass die erste Phase, insbesondere zumindest überwiegend oder vollständig, während einer Bewegungsphase des Kolbens stattfindet, in welcher der Kolben sich mit einer solchen Kolbengeschwindigkeit in Richtung seines unteren Totpunkts - insbesondere bei geöffnetem Einlassventil - bewegt, dass ein Rückströmen des gasförmigen Kraftstoffes aus dem Brennraum in den Ansaugtrakt des Gasmotors, insbesondere vollständig, unterbleibt. Hierdurch kann ein besonders vorteilhafter und effizienter Betrieb des Gasmotors dargestellt werden.

[0041] Bei einer weiteren Ausführungsform der Erfindung ist es vorgesehen, dass die erste Phase nach einem Öffnen wenigstens eines dem Brennraum zugeordneten Einlassventils, über welchem dem Brennraum zumindest Luft zugeführt wird, beginnt. Sind dem Brennraum beispielsweise mehrere Einlassventile zugeordnet, so ist es vorzugsweise vorgesehen, dass die erste Phase nach einem jeweiligen Öffnen der beziehungsweise aller Einlassventile, über welche dem Brennraum zumindest Luft zugeführt wird, beginnt.

[0042] Überraschenderweise wurde dabei gefunden, dass sich ein besonders effektiver und vorteilhafter Betrieb realisieren lässt, wenn die erste Phase vor einem sich unmittelbar an das Öffnen anschließenden Schließen des Einlassventils beziehungsweise der Einlassventile endet.

[0043] Bei einer weiteren besonders vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung beginnt die zweite Phase vor dem Schließen oder mit dem Schließen des Einlassventils beziehungsweise der Einlassventile. Dadurch kann eine besonders hohe Leistungsdichte realisiert werden. Unter dem Schließen des Einlassventils ist insbesondere ein Zeitpunkt zu verstehen, zu welchem das Einlassventil, insbesondere vollständig, geschlossen ist, das heißt seine Schließstellung erreicht. Somit beginnt die zweite Phase, bevor das Einlassventil geschlossen ist, das heißt bevor das Einlassventil seine Schließstellung erreicht und somit beispielsweise während sich das Einlassventil in Richtung seiner Schließstellung bewegt. Alternativ fällt der Zeitpunkt, zu welchem das Einlassventil seine Schließstellung erreicht, mit dem Beginn der zweiten Phase zusammen. Der Zeitpunkt, zu welchem das Einlassventil, insbesondere aus seiner Offenstellung kommend, seine Schließstellung erreicht, wird auch als „Einlass schließt“ oder ES bezeichnet. Somit kann vorgesehen sein, dass die zweite Phase vor ES beginnt, oder die zweite Phase beginnt mit ES, sodass ES mit dem Beginn der zweiten Phase zusammenfällt.

[0044] Schließlich hat es sich als besonders vorteilhaft gezeigt, wenn der gasförmige Kraftstoff beim Einblasen, das heißt dann, wenn der gasförmige Kraftstoff den Injektor, insbesondere von dessen Einlass zu dessen Auslass, durchströmt, den Injektor derart durchströmt, dass der gasförmige Kraftstoff beim Einblasen an dem engsten von dem gasförmigen Kraftstoff durchströmbaren Querschnitt des Injektors eine überkritische Strömung aufweist. Hierdurch kann der gasförmige Kraftstoff besonders vorteilhaft in den Brennraum eingebracht werden, sodass ein effizienter und effektiver Betrieb darstellbar ist.

[0045] Im Rahmen von Entwicklungstätigkeiten wurde insbesondere überraschender Weise gefunden, dass es zur Realisierung eines effektiven und effizienten Betriebs besonders vorteilhaft ist, wenn die erste Phase beginnt, wenn der Ansaugtakt des Kolbens beziehungsweise des beispielsweise als Zylinder ausgebildeten Brennraums so weit fortgeschritten ist, dass zumindest die folgenden Bedingungen erfüllt sind:

- Eine erste der Bedingungen ist, dass die in den Brennraum, insbesondere über das Einlassventil beziehungsweise über die Einlassventile, eingeströmte Luft den Brennraum so weit abkühlt,

dass eine Entzündung des einströmenden Kraftstoffes ausgeschlossen ist.

- Die zweite Bedingung ist, dass eine Geschwindigkeit, mit welcher sich der Kolben, insbesondere in Richtung seines unteren Totpunkts und dabei insbesondere in Richtung des zweiten innerhalb des Arbeitsspiels auftretenden unteren Totpunkts, bewegt, so hoch ist, dass durch eine Sogwirkung des Kolbens, insbesondere eines Bodens des Kolbens, ein Einströmen der Luft in den Brennraum nicht oder nur gering behindert wird und eine Rückströmung von Wasserstoff in den Ansaugtrakt ausgeschlossen ist.

[0046] Die erste Phase wird beendet, wenn die zweite Bedingung beispielsweise durch Verringerung der zuvor genannten und auch als Kolbengeschwindigkeit bezeichneten Geschwindigkeit im Bereich des oberen Totpunkts nicht mehr erfüllt ist.

[0047] Die zweite Phase kann beispielsweise beginnen, wenn das Einlassventil physikalisch geschlossen ist. Abgeschlossen wird die zweite Phase beispielsweise dann, wenn der benötigte beziehungsweise vorgesehene Wasserstoff, das heißt wenn die vorgebbare beziehungsweise gewünschte Gesamtmenge des gasförmigen Kraftstoffes eingeblasen wurde. Das Einblasen des Kraftstoffes sollte abgeschlossen sein, wenn das Verhältnis von in dem Zylinder herrschendem Druck zu an dem Einlass des Injektors und somit vor dem Injektor herrschendem Druck des gasförmigen Kraftstoffes den Wert 0,5 überschreitet.

[0048] Insbesondere können mittels des erfindungsgemäßen Verfahrens die folgenden Vorteile realisiert werden:

- Es kann eine besonders hohe Einblaszeit realisiert werden, während welcher eine hinreichend hohe Menge an gasförmigem Kraftstoff in den Brennraum eingeblasen werden kann. Im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren lässt sich somit ein Zugewinn an Einblaszeit realisieren. Durch diesen Zugewinn an Einblaszeit kann beispielsweise der vor dem Injektor herrschende Druck und/oder eine Querschnittsfläche des Injektors reduziert werden, wobei der gasförmige Kraftstoff insbesondere beim Einblasen durch die Querschnittsfläche strömt.

- Zumindest ein Teil des gasförmigen Kraftstoffes kann in eine turbulente Luftströmung, insbesondere während des Ansaugtakts, eingeblasen werden. Hierdurch ergibt sich eine deutlich verbesserte Homogenität des Kraftstoff-Luft-Gemisches.

- Die Aufteilung der Kraftstoffeinblasung in die zwei Phasen ermöglicht insbesondere für eine

Motorenapplikation des Gasmotors die Schaffung zusätzlicher Freiheiten zur Optimierung des Motorverhaltens in jedem Kennfeld. Unter Berücksichtigung der Parameter Betriebssicherheit, Schadstoffemission und Wirkungsgrad.

[0049] Durch das Einblasen des Kraftstoffes mittels der zwei Phasen sind zwei Arbeitsspiele des Injektors vorgesehen, sodass durch ein erstes der Arbeitsspiele die erste Phase und durch das zweite Arbeitsspiel die zweite Phase bewirkt wird. Einer hieraus etwaig resultierenden Beeinträchtigung der Lebensdauer des Injektors kann beispielsweise dadurch entgegengewirkt werden, dass in wenigstens einem Betriebsbereich des Gasmotors wie beispielsweise in einem Teil- und Schwachlastbetriebsbereich der gasförmige Kraftstoff mittels genau einer Phase innerhalb des Arbeitsspiels in den Brennraum eingebracht wird, sodass innerhalb des Arbeitsspiels vorzugsweise genau eine Phase stattfindet, während welcher der gasförmige Kraftstoff mittels des Injektors direkt in den Brennraum eingeblasen wird. Bei der Applikation insbesondere hinsichtlich Einblasung und Ansaug- und/oder Verdichtungstakt und Timing, sind auch hier die Parameter Betriebssicherheit, Schadstoffemission und Wirkungsgrad zu beachten.

[0050] Weitere Vorteile, Merkmale und Einzelheiten der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung eines bevorzugten Ausführungsbeispiels sowie anhand der Zeichnung. Die vorstehend in der Beschreibung genannten Merkmale und Merkmalskombinationen sowie die nachfolgend in der Figurenbeschreibung genannten und/oder in der einzigen Fig. alleine gezeigten Merkmale und Merkmalskombinationen sind nicht nur in der jeweils angegebenen Kombination, sondern auch in anderen Kombinationen oder in Alleinstellung verwendbar, ohne den Rahmen der Erfindung zu verlassen.

[0051] Die Zeichnung zeigt in der einzigen Fig. Diagramme zum Veranschaulichen eines erfindungsgemäßen Verfahrens zum Betreiben eines vorzugsweise als Wasserstoffmotor ausgebildeten Gasmotors.

[0052] Die einzige Fig. zeigt mehrere Diagramme 10, 12, 14 und 16, anhand derer im Folgenden ein Verfahren zum Betreiben eines Gasmotors veranschaulicht wird. Der Gasmotor ist bei dem in der Fig. veranschaulichten Ausführungsbeispiel als Wasserstoffmotor ausgebildet, sodass der Gasmotor, insbesondere in seinem befeuerten Betrieb, mittels Wasserstoff als gasförmiger Kraftstoff betrieben wird. Der Gasmotor wird auch Verbrennungsmotor, Verbrennungskraftmaschine, Brennkraftmaschine oder Motor bezeichnet und weist wenigstens einen insbesondere als Zylinder ausgebildeten Brennraum auf, in welchem ein Kolben translatorisch bewegbar aufgenommen ist. Der Zylinder ist beispielsweise

durch ein Motorgehäuse des Gasmotors gebildet. An dem Motorgehäuse ist zumindest mittelbar eine als Kurbelwelle ausgebildete Abtriebswelle des Gasmotors drehbar gelagert, sodass sich die Kurbelwelle um eine Drehachse relativ zu dem Motorgehäuse drehen kann. Dabei ist der Kolben gelenkig mit einem Pleuel verbunden, welches wiederum gelenkig mit der Kurbelwelle verbunden ist. Durch diese gelenkige Kopplung können die translatorischen Bewegungen des Kolbens in eine rotatorische Bewegung der Kurbelwelle um ihre Drehachse umgewandelt werden.

[0053] Dem Zylinder sind mehrere Einlassventile und mehrere Auslassventile zugeordnet, wobei die Einlassventile und die Auslassventile zusammenfassend auch als Gaswechselventile bezeichnet werden. Das jeweilige Gaswechselventil ist zwischen einer Schließstellung und wenigstens einer Offenstellung, insbesondere translatorisch, bewegbar. Auf seinem Weg von der Schließstellung in die Offenstellung beziehungsweise von der Offenstellung in die Schließstellung führt das jeweilige Gaswechselventil einen Hub aus, welcher auch als Ventilhub bezeichnet wird. Ein jeweiliger Zeitpunkt, zu welchem mit dem Öffnen des jeweiligen Einlassventils begonnen wird, wird auch als Einlass öffnet (EÖ) bezeichnet. Ein jeweiliger Zeitpunkt, zu welchem das jeweilige Einlassventil seine Schließstellung erreicht, wird auch als Einlass schließt (ES) bezeichnet. Ein jeweiliger Zeitpunkt, zu welchem mit dem Öffnen des jeweiligen Auslassventils begonnen wird, wird auch als Auslass öffnet (AÖ) bezeichnet. Ein jeweiliger Zeitpunkt, zu welchem das jeweilige Auslassventil seine Schließstellung erreicht, wird auch als Auslass schließt (AS) bezeichnet. Das jeweilige Gaswechselventil wird beispielsweise mittels einer Nockenwelle, insbesondere mittels eines jeweiligen Nockens, betätigt und dadurch aus der jeweiligen Schließstellung in die jeweilige Offenstellung bewegt. Hierdurch wird beispielsweise eine Rückstelleinrichtung, insbesondere eine Feder, gespannt, mittels welcher das jeweilige Gaswechselventil wieder aus der Schließstellung in die Offenstellung zurückbewegt und in der Schließstellung gehalten werden kann.

[0054] Die Nockenwelle ist dabei von der Abtriebswelle antreibbar. Eine jeweilige Drehung der Kurbelwelle um ein Grad wird auch als Grad Kurbelwinkel ($^{\circ}$ KW) bezeichnet. Die Angabe Grad Kurbelwinkel charakterisiert somit einen Weg oder eine Strecke, um den beziehungsweise die sich die Kurbelwelle dreht. Diese Grad Kurbelwinkel sind auf der jeweiligen Abszisse 18 der jeweiligen Diagramme 10, 12, 14 und 16 aufgetragen. Da die jeweilige Nockenwelle von der Kurbelwelle angetrieben wird, können die jeweiligen Zeitpunkte, zu denen die jeweiligen Gaswechselventile öffnen und schließen, auf die Dreh-

stellung und Kurbelwelle, das heißt auf die Grad Kurbelwinkel referenziert werden.

[0055] Dabei ist der Gasmotor als Viertaktmotor ausgebildet, sodass das jeweilige Arbeitsspiel vier Takte aufweist. Diese vier Takte sind: Arbeitstakt; Ausstoßtakt; Ansaugtakt; Verdichtungstakt. Ferner umfasst das Arbeitsspiel zwei vollständige Umdrehungen der Kurbelwelle und somit 720 Grad Kurbelwinkel. Dabei ist auf der jeweiligen Abszisse 18 genau ein Arbeitsspiel des Gasmotors aufgetragen.

[0056] Auf der Ordinate 20 des Diagramms 14 ist der jeweilige Ventilhub aufgetragen, wobei ein in das Diagramm 14 eingetragener Verlauf 22 die Bewegung des jeweiligen Auslassventils von dem Auslass öffnet zum dem Auslass schließt und somit von der Schließstellung in die Offenstellung und wieder zurück in die Schließstellung veranschaulicht. Demzufolge veranschaulicht ein in das Diagramm 14 eingetragener Verlauf 24 die Bewegung des jeweiligen Einlassventils von dem Einlass öffnet bis zu dem Einlass schließt und somit aus der Schließstellung in die Offenstellung und wieder zurück in die Schließstellung. Die Verläufe 22 und 24 werden auch als Ventilerhebungskurven bezeichnet, wobei die jeweiligen Zeitpunkte, zu denen die Gaswechselventile geöffnet und geschlossen werden, zusammenfassend auch als Steuerzeiten bezeichnet werden.

[0057] Bei dem anhand der Fig. veranschaulichten Verfahren wird das Arbeitsspiel nun so betrachtet, dass der erste innerhalb des Arbeitsspiels stattfindende beziehungsweise auftretende Takt der Arbeitstakt ist. Der zweite innerhalb des Arbeitsspiels stattfindende beziehungsweise auftretende Takt ist der sich an den Arbeitstakt anschließende Ausstoßtakt. Der dritte innerhalb des Arbeitsspiels stattfindende und sich an den zweiten Takt beziehungsweise an den Ausstoßtakt anschließende dritte Takt ist der Ansaugtakt. Somit ist der vierte innerhalb des Arbeitsspiels auftretende beziehungsweise stattfindende Takt der Verdichtungstakt, welcher sich an den Ansaugtakt anschließt.

[0058] Der Kolben ist zwischen einem unteren Totpunkt (UT) und einem oberen Totpunkt (OT) translatorisch in dem Zylinder bewegbar. Vor dem Hintergrund der oben beschriebenen Betrachtung des Arbeitsspiels tritt innerhalb des Arbeitsspiels der obere Totpunkt genau dreimal auf, wobei der untere Totpunkt genau zweimal auftritt. Dabei wird zwischen zwei Arten des oberen Totpunkts unterschieden. Eine erste der Arten ist der sogenannte obere Ladungswechseltotpunkt (LWOT), der im Rahmen des Ausstoßtacts und des Ansaugtacts auftritt. Die zweite Art ist der sogenannte obere Zündtotpunkt (ZOT), in dessen Rahmen beziehungsweise in dessen Bereich ein auch als Gemisch bezeichnetes Kraftstoff-Luft-Gemisch gezündet wird. Dieses

Gemisch umfasst Wasserstoff als gasförmigen Kraftstoff, mittels welchem der Gasmotor in seinem befeuerten Betrieb betrieben wird. Ferner umfasst das Gemisch Luft, die dem Brennraum, insbesondere die Einlassventile, zugeführt wird.

[0059] Das jeweilige Einlassventil ist einem Einlasskanal zugeordnet, über welchen dann, wenn das jeweilige Einlassventil den jeweils zugeordneten Einlasskanal in der Offenstellung freigibt, die Luft in den Brennraum einströmen kann. Das Kraftstoff-Luft-Gemisch wird, insbesondere mittels Fremdzündung, gezündet und dadurch verbrannt, woraus Abgas des Gasmotors resultiert. Dabei ist dem jeweiligen Auslassventil ein jeweiliger Auslasskanal zugeordnet. Über den Auslasskanal kann dann, wenn das jeweilige Auslassventil den jeweiligen Auslasskanal freigibt, das Abgas aus dem Brennraum ausströmen. Das Abgas kann dann in einem Abgastrakt des Gasmotors einströmen. Beispielsweise wird die Luft mittels eines Ansaugtrakts des Gasmotors zu dem und insbesondere in den Zylinder geführt. In der jeweiligen Schließstellung versperrt das jeweilige Einlassventil des jeweils zugehörigen Einlasskanal fluidisch, wobei das jeweilige Auslassventil in der Schließstellung den jeweils zugehörigen Auslasskanal fluidisch versperrt.

[0060] Anhand des Diagramms 10 ist erkennbar, dass das Arbeitsspiel aufgrund der beschriebenen Betrachtung bei dem oberen Zündtotpunkt beginnt und endet, sodass der erste innerhalb des Arbeitsspiels auftretende und der dritte beziehungsweise letzte innerhalb des Arbeitsspiels auftretende obere Totpunkt des Kolbens der obere Zündtotpunkt ZOT ist. In der Folge ist der zweite innerhalb des Arbeitsspiels auftretende obere Totpunkt der obere Ladungswechseltotpunkt LWOT, welcher zwischen dem ersten und dem dritten oberen Totpunkt des Arbeitsspiels liegt. Der erste innerhalb des Arbeitsspiels auftretende untere Totpunkt UT schließt sich unmittelbar beziehungsweise direkt an den ersten innerhalb des Arbeitsspiels auftretenden oberen Totpunkt an und geht unmittelbar beziehungsweise direkt dem zweiten innerhalb des Arbeitsspiels auftretenden oberen Totpunkt vorweg, sodass der erste untere Totpunkt zwischen dem ersten oberen Zündtotpunkt und dem oberen Ladungswechseltotpunkt liegt. Der zweite innerhalb des Arbeitsspiels auftretende untere Totpunkt schließt sich unmittelbar beziehungsweise direkt an den oberen Ladungswechseltotpunkt an und geht unmittelbar beziehungsweise direkt dem oberen Zündtotpunkt vorweg, sodass der zweite innerhalb des Arbeitsspiels auftretende untere Totpunkt zwischen dem oberen Ladungswechseltotpunkt und dem oberen Zündtotpunkt liegt. Darunter, dass der jeweilige untere Totpunkt sich unmittelbar beziehungsweise direkt an den jeweiligen oberen Totpunkt anschließt beziehungsweise diesem vorweggeht, ist zu verstehen,

dass zwischen dem jeweiligen unteren Totpunkt und dem jeweiligen oberen Totpunkt kein anderer weiterer Totpunkt des Kolbens liegt.

[0061] Auf seinem Weg vom jeweiligen oberen Totpunkt in den jeweiligen unteren Totpunkt beziehungsweise umgekehrt vom jeweiligen unteren Totpunkt in den jeweiligen oberen Totpunkt führt der Kolben einen Hub aus, welcher auch als Kolbenhub bezeichnet wird. Dabei ist auf der Ordinate 26 des Diagramms 10 der Kolbenhub aufgetragen, sodass ein in das Diagramm 10 eingetragener Verlauf 28 den Kolbenhub, insbesondere dessen Verlauf, innerhalb des Arbeitsspiels veranschaulicht.

[0062] Der Kolben bewegt sich vom jeweiligen oberen Totpunkt in den jeweiligen unteren Totpunkt beziehungsweise von dem jeweiligen unteren Totpunkt in den jeweiligen oberen Totpunkt mit einer auch als Kolbengeschwindigkeit bezeichneten Geschwindigkeit, die auf der Ordinate 30 des Diagramms 12 aufgetragen ist. Somit veranschaulicht ein in das Diagramm 12 eingetragener Verlauf 32 die Kolbengeschwindigkeit beziehungsweise deren Verlauf innerhalb des Arbeitsspiels, wobei beispielsweise die Kolbengeschwindigkeit in der Einheit Millimeter pro Grad Kurbelwinkel angegeben ist. Anhand der Diagramme 10 und 12 ist insbesondere erkennbar, dass die Kolbengeschwindigkeit in dem jeweiligen unteren Totpunkt und in dem jeweiligen oberen Totpunkt null beträgt.

[0063] Bei dem Verfahren zum Betreiben des Gasmotors wird innerhalb des Arbeitsspiels eine Gesamtmenge des als Wasserstoff ausgebildeten gasförmigen Kraftstoffs in den Zylinder eingebracht und dabei, insbesondere mittels eines Injektors, direkt in den Zylinder eingeblasen. Diese Gesamtmenge wird nun auf genau zwei Teilmengen aufgeteilt, sodass die Gesamtmenge beziehungsweise der gasförmige Kraftstoff innerhalb des Arbeitsspiels während wenigstens zweier zeitlich voneinander beabstandeter und aufeinanderfolgender Phasen P1 und P2 direkt in den Zylinder eingeblasen wird. Während der ersten Phase P1 wird eine erste der Teilmenge mittels des Injektors direkt in den Zylinder eingeblasen. Während der zeitlich von der ersten Phase P1 beabstandeten und zeitlich auf die erste Phase P1 folgenden zweiten Phase P2 wird die zweite Teilmenge mittels des Injektors direkt in den Zylinder eingeblasen. Da die Phasen P1 und P2 zeitlich voneinander beabstandet sind, ist zwischen den Phasen P1 und P2 ein zeitlicher Abstand Z vorgesehen. Der zeitliche Abstand Z ist eine Zeitspanne, während welcher ein Einbringen von Kraftstoff, insbesondere gasförmigen Kraftstoff, in den Zylinder unterbleibt.

[0064] Der Injektor weist beispielsweise ein Ventilelement auf, welches auch als Ventil oder Injektor-

ventil bezeichnet wird. Das Ventilelement ist beispielsweise zwischen einer Schließstellung und einer Offenstellung, insbesondere translatorisch, bewegbar. In der Schließstellung versperrt beispielsweise das Ventilelement wenigstens ein oder mehrere Einblaseöffnungen des Injektors. In der Offenstellung gibt das Ventilelement die Einblaseöffnung beziehungsweise die Einblaseöffnungen beispielsweise frei, sodass über die Einblaseöffnungen der Wasserstoff direkt in den Brennraum eingeblasen werden kann. Die Einblaseöffnung beziehungsweise Einblaseöffnungen ist beziehungsweise sind beispielsweise an einem Auslass und somit auf einer Auslassseite des Injektors angeordnet, wobei der Wasserstoff über den Auslass aus dem Injektor ausgeleitet wird. Der Injektor weist beispielsweise ferner einen Einlass und somit eine Einlassseite auf, über den beziehungsweise die der mittels des Injektors in den Zylinder direkt einzublasende Wasserstoff in den Injektor eingeleitet wird. An dem Einlass herrscht beispielsweise ein erster Druck, insbesondere des Wasserstoffes, wobei der erste Druck beispielsweise ein Einblasedruck ist, mit welchem der Wasserstoff direkt in den Zylinder eingeblasen wird. An dem Auslass herrscht beispielsweise ein zweiter Druck, welcher beispielsweise ein in dem Zylinder herrschender und auch als Zylinderinnendruck bezeichneter Druck ist. Insbesondere ist der Zylinderinnendruck ein Verdichtungsdruck, welcher beispielsweise während des Verdichtungsaktes auftritt beziehungsweise durch diesen bewirkt wird.

[0065] Auf seinem Weg von der Schließstellung in die Offenstellung beziehungsweise umgekehrt legt das Ventilelement beispielsweise einen Weg zurück beziehungsweise führt einen Hub aus, welcher auch als Ventilelementhub bezeichnet wird. Dieser Ventilelementhub ist beispielsweise auf der Ordinate 34 aufgetragen, sodass ein in das Diagramm 16 eingetragener Verlauf 36 den Ventilelementhub beziehungsweise dessen Verlauf innerhalb des Arbeitsspiels veranschaulicht.

[0066] Die genannten Teilmengen ergeben in Summe die Gesamtmenge, welche innerhalb des Arbeitsspiels absolut in den Zylinder direkt eingeblasen wird. Somit wird lediglich beziehungsweise ausschließlich die Gesamtmenge in den Zylinder direkt eingeblasen, insbesondere innerhalb des Arbeitsspiels.

[0067] Um nun einen besonders vorteilhaften Betrieb zu realisieren, sind genau zwei Teilmengen und somit genau zwei Phasen P1 und P2 vorgesehen. Des Weiteren ist es vorgesehen, dass die wenigstens zwei Phasen P1 und P2 zeitlich vor der ersten innerhalb des Arbeitsspiels stattfindenden Zündung beginnen und enden.

[0068] Wird beispielsweise innerhalb des Arbeitsspiels genau eine Zündung durchgeführt beziehungsweise bewirkt, in deren Rahmen das zuvor genannte Gemisch gezündet und in der Folge verbrannt wird, so ist die zuvor genannte erste innerhalb des Arbeitsspiels stattfindende Zündung diese genau eine Zündung. Werden beispielsweise innerhalb des Arbeitsspiels mehrere, zeitlich voneinander beabstandete und aufeinanderfolgende Zündungen durchgeführt, so ist die zuvor genannte erste innerhalb des Arbeitsspiels stattfindende beziehungsweise auftretende Zündung beispielsweise die Zündung, die von den mehreren Zündungen als allererste Zündung durchgeführt wird. Im Rahmen der Zündung wird beispielsweise mittels einer insbesondere als Zündkerze ausgebildeten Fremdzündeinrichtung wenigstens ein Zündfunke erzeugt, mittels welchem das Gemisch gezündet und in der Folge verbrannt wird.

[0069] Da die Phasen P1 und P2 vor der ersten Zündung beginnen und enden, werden die Teilmengen nicht etwa separat voneinander beziehungsweise eigenständig, sondern zusammen beziehungsweise gemeinsam im Rahmen der Zündung beziehungsweise der durch die Zündung bewirkten Verbrennung verbrannt. Dadurch kann eine besonders hohe Leistungsdichte auf einfache Weise realisiert werden.

[0070] Besonders gut anhand des Verlaufs 36 ist erkennbar, dass zunächst die erste Phase P1 beginnt und endet, woraufhin die zeitlich auf die erste Phase P1 folgende zweite Phase P2 beginnt und endet. Dabei beginnt die erste Phase P1 nach dem oberen Ladungswechsellotpunkt LWOT des Kolbens. Außerdem endet die erste Phase P1 vor den sich unmittelbar an den oberen Ladungswechsellotpunkt LWOT anschließenden unteren Totpunkt UT, sodass die erste Phase P1 zeitlich vor dem zweiten innerhalb des Arbeitsspiels auftretenden unteren Totpunkt endet. Der zeitliche Abstand Z beginnt somit vor dem zweiten unteren Totpunkt und erstreckt sich bis nach dem unteren Totpunkt.

[0071] Als besonders vorteilhaft hat es sich gezeigt, dass - wie aus der Fig. und insbesondere aus dem Diagramm 16 erkennbar ist - sich die erste Phase P1 von 400 Grad Kurbelwinkel nach dem oberen Zündtotpunkt bis 500 Grad Kurbelwinkel nach dem oberen Zündtotpunkt erstreckt. Somit erstreckt sich beispielsweise die erste Phase P1 über 100 Grad Kurbelwinkel, wodurch eine hinreichend hohe Menge an Kraftstoff eingeblasen werden kann.

[0072] Die zweite Phase P2 beginnt beispielsweise vor oder mit ES und somit beispielsweise vor oder mit dem sich unmittelbar an den oberen Ladungswechsellotpunkt LWOT anschließenden Einlass schließt. ES Dies bedeutet, dass die zweite Phase P2 nach dem zweiten innerhalb des Arbeitsspiels auftretenden

den unteren Totpunkt beginnt. Der Beginn der zweiten Phase P2 kann, insbesondere bei hohem Kraftstoffbedarf, alternativ vor Einlass schließt ES beginnen, insbesondere wenn ausgeschlossen ist, dass Kraftstoff durch das geöffnete Einlassventil in den Ansaugtrakt gelangen kann. Dazu sollte die durch die bis zum Einlass schließt ES eingeblasene Kraftstoffmenge bewirkte Druckerhöhung im Zylinder auf einen Wert unterhalb des Drucks im Ansaugtrakt begrenzt werden. Das bedeutet, dass die vor Einlass schließt ES einblasbare Kraftstoffmasse begrenzt ist.

[0073] Dabei hat es sich als besonders vorteilhaft gezeigt, wenn sich die zweite Phase P2 unmittelbar an den sich unmittelbar an den oberen Ladungswechseltotpunkt LWOT anschließenden unteren Totpunkt anschließt, sodass beispielsweise ein Abstand zwischen der zweiten Phase P2, insbesondere zwischen deren Beginn, und dem zweiten innerhalb des Arbeitsspiels auftretenden unteren Totpunkt weniger als 50 Grad Kurbelwinkel, insbesondere weniger als 20 Grad Kurbelwinkel, insbesondere weniger als 10 Grad Kurbelwinkel und vorzugsweise weniger als 5 Grad Kurbelwinkel liegt.

[0074] Als besonders vorteilhaft hat es sich ferner gezeigt, wenn die zweite Phase P2 beendet wird, bevor der Verdichtungsdruck im Zylinder einen Wert erreicht, der in einem Bereich von 40% bis 60%, insbesondere von 45% bis 55%, des vor dem Injektor herrschenden Einblasedrucks liegt. Insbesondere wird die zweite Phase P2 beendet, bevor der Verdichtungsdruck etwa 50% des Einblasedrucks beträgt.

[0075] Die erste Phase P1 findet dabei vorzugsweise zumindest überwiegend oder vollständig während einer Bewegungsphase des Kolbens statt, in welcher der Kolben sich mit einer solchen Kolbengeschwindigkeit in Richtung seines unteren Totpunkts bewegt, dass ein Rückströmen des gasförmigen Kraftstoffs aus dem Zylinder in den Ansaugtrakt des Gasmotors, insbesondere vollständig, unterbleibt.

[0076] Außerdem ist erkennbar, dass die erste Phase P1 nach dem Einlass öffnet und vorzugsweise nach dem Auslass schließt beginnt, und vor dem sich unmittelbar an den Einlass öffnet anschließenden Einlass schließt endet. Somit liegt beispielsweise die erste Phase P1 vollständig zwischen dem Einlass öffnet und dem Einlass schließt.

[0077] Anhand der Verläufe 22 und 24 ist erkennbar, dass eine Ventilüberschneidung vorgesehen ist, da der Einlass öffnet vor dem Auslass schließt liegt. Ferner ist es vorgesehen, dass die zweite Phase P2 nach dem Einlass schließt oder während des Schließens des Einlassventils beginnt. Bei dem in der Fig. veranschaulichten Ausführungsbeispiel

beginnt die zweite Phase P2 vor dem Einlass schließt und endet nach dem Einlass schließt.

[0078] Schließlich ist es vorzugsweise vorgesehen, dass der gasförmige Kraftstoff beim Einblasen den Injektor derart durchströmt, dass der gasförmige Kraftstoff beim Einblasen an dem engsten von dem gasförmigen Kraftstoff durchströmbaren Querschnitt des Injektors eine überkritische Strömung aufweist. Dies ist insofern vorteilhaft, als dann ein Durchfluss und somit eine Durchflussmenge des den Injektor von dem Einlass zu dem Auslass durchströmenden Wasserstoffs unabhängig von dem auf der Auslassseite beziehungsweise an dem Auslass herrschenden Zylinderinnendruck ist, was insbesondere deswegen von Vorteil ist, da der an dem Auslass herrschende Zylinderinnendruck nicht präzise bekannt sein kann. Der engste von dem Wasserstoff durchströmbare Querschnitt wird auch als Laval-Querschnitt des Injektors bezeichnet. Unter der überkritischen Strömung an dem engsten Querschnitt ist insbesondere zu verstehen, dass sich an dem engsten Querschnitt, welcher auch als Auslegungsquerschnitt bezeichnet wird, Schallgeschwindigkeit des Wasserstoffs einstellt.

[0079] Das Durchführen der ersten Phase P1 ermöglicht eine besonders gute Homogenisierung des Gemisches. Der zeitliche Abstand Z ist eine Pause, durch welche übermäßige Verdrängungseffekte vermieden werden können. Das Durchführen der zweiten Phase P2 ermöglicht es, eine hinreichend große Menge an Wasserstoff in den Zylinder einzubringen. Dabei ist es vorzugsweise vorgesehen, dass die zweite Teilmenge, welche während der zweiten Phase P2 direkt in den Brennraum eingeblasen wird, größer als die erste Teilmenge ist, welche während der ersten Phase P1 in den Brennraum eingeblasen wird. Insbesondere wird das Ende der zweiten Phase P2 beispielsweise durch den Zylinderinnendruck beziehungsweise durch ein Druckverhältnis aus am Einlass des Injektors herrschendem Einblasedruck und Zylinderinnendruck bestimmt, wie zuvor beschrieben.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Betreiben eines wenigstens einen Brennraum aufweisenden Wasserstoffmotors für ein Kraftfahrzeug, bei welchem Wasserstoff als gasförmiger Kraftstoff zum Betreiben des Wasserstoffmotors direkt in den Brennraum eingeblasen wird, wobei der Wasserstoff innerhalb eines Arbeitsspiels des Wasserstoffmotors während wenigstens zweier zeitlich voneinander beabstandeter Phasen (P1, P2) direkt in den Brennraum eingeblasen wird **dadurch gekennzeichnet**, dass die wenigstens zwei Phasen (P1, P2) zeitlich vor der ersten innerhalb des Arbeitsspiels stattfindenden Zündung beginnen und enden, wobei sich die erste Phase

(P1) von 400 Grad Kurbelwinkel nach dem oberen Zündtopfunkt (ZOT) des Kolbens bis 500 Grad Kurbelwinkel nach dem oberen Zündtopfunkt (ZOT) erstreckt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass zunächst eine erste der Phasen (P1, P2) beginnt und endet, woraufhin die zeitlich auf die erste Phase (P1) folgende zweite Phase (P2) beginnt und endet.

3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Wasserstoffmotor wenigstens einen Kolben aufweist, welcher translatorisch bewegbar in dem Brennraum aufgenommen ist.

4. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Phase (P1) nach dem oberen Ladungswechseltotpunkt (LWOT) des Kolbens beginnt.

5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Phase (P1) vor dem sich unmittelbar an den oberen Ladungswechseltotpunkt (LWOT) anschließenden unteren Totpunkt (UT) des Kolbens endet.

6. Verfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zweite Phase (P2) nach dem sich unmittelbar an den oberen Ladungswechseltotpunkt (LWOT) des Kolbens anschließenden unteren Totpunkt (UT) des Kolbens beginnt.

7. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass sich die zweite Phase (P2) unmittelbar an den sich unmittelbar an den oberen Ladungswechseltotpunkt (LWOT) anschließenden unteren Totpunkt (UT) des Kolbens anschließt.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Wasserstoff in den Brennraum mittels wenigstens eines Injektors eingeblasen wird, wobei die zweite Phase (P2) beendet wird, bevor der Verdichtungsdruck im Brennraum einen Wert erreicht, der in einem Bereich von 40% bis 60% eines vor dem Injektor herrschenden Einblasedrucks liegt.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Phase (P1) während einer Bewegungsphase des Kolbens stattfindet, in welcher der Kolben sich mit einer solchen Kolbengeschwindigkeit in Richtung seines unteren Totpunkts (UT) bewegt, dass ein Rückströmen des Wasserstoffes aus dem Brennraum in einen Ansaugtrakt des Wasserstoffmotors unterbleibt.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Phase (P1) nach einem Öffnen (EÖ) wenigstens eines dem Brennraum zugeordneten Einlassventils, über welches dem Brennraum zumindest Luft zugeführt wird, beginnt.

11. Verfahren nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Phase (P1) vor einem sich unmittelbar an das Öffnen (EÖ) anschließenden Schließen (ES) des Einlassventils endet.

12. Verfahren nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zweite Phase (P2) vor dem Schließen (ES) oder mit dem Schließen des Einlassventils beginnt.

13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Wasserstoff in den Brennraum mittels wenigstens eines Injektors eingeblasen wird, wobei der Wasserstoff beim Einblasen den Injektor derart durchströmt, dass der Wasserstoff beim Einblasen an dem engsten von dem Wasserstoff durchströmten Querschnitt des Injektors eine überkritische Strömung aufweist.

Es folgt eine Seite Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

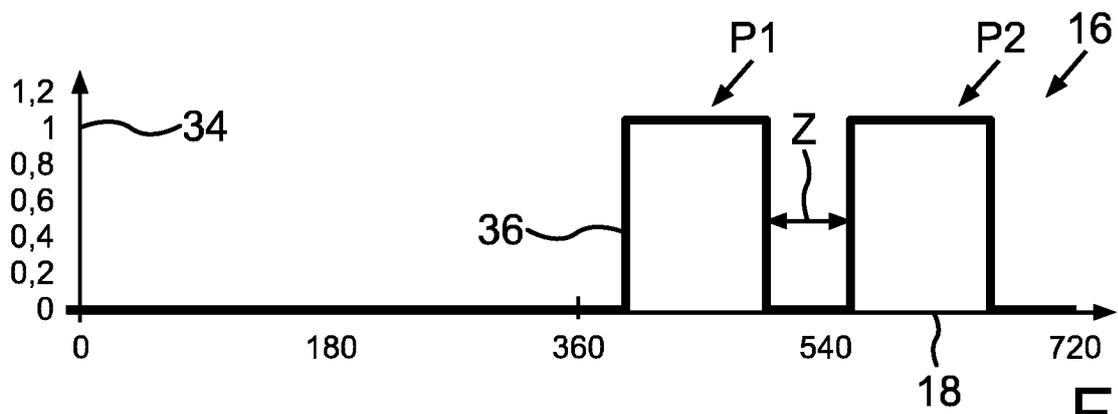
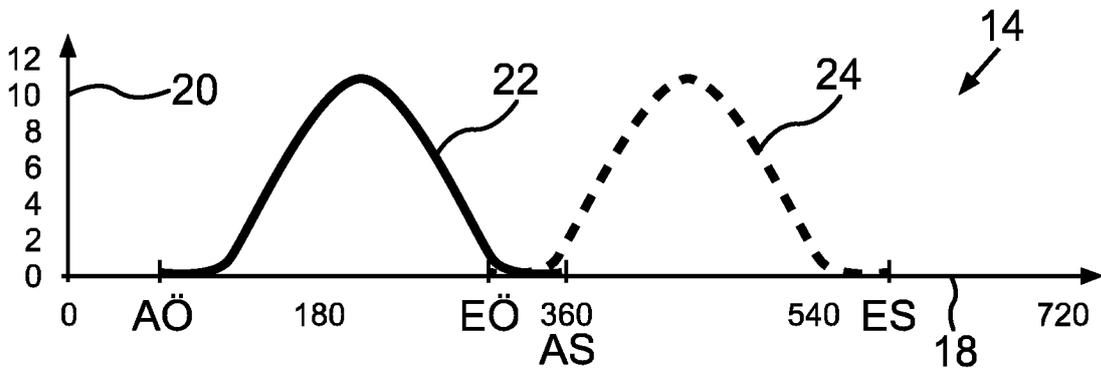
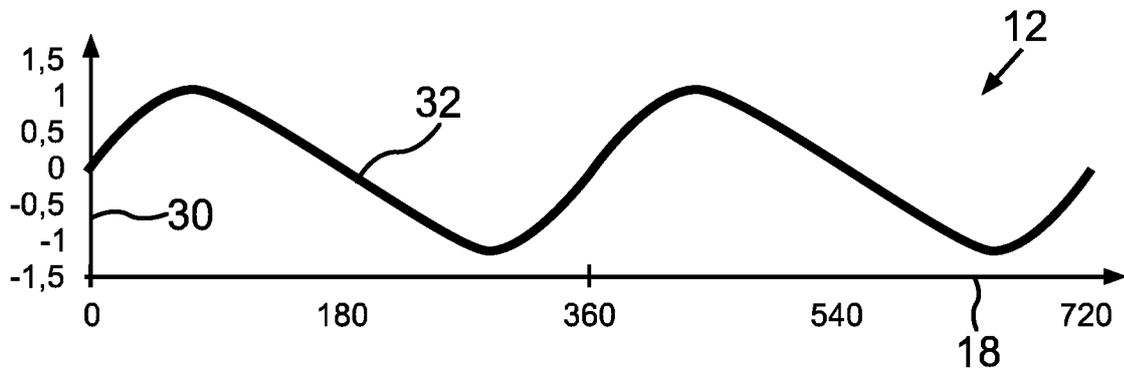
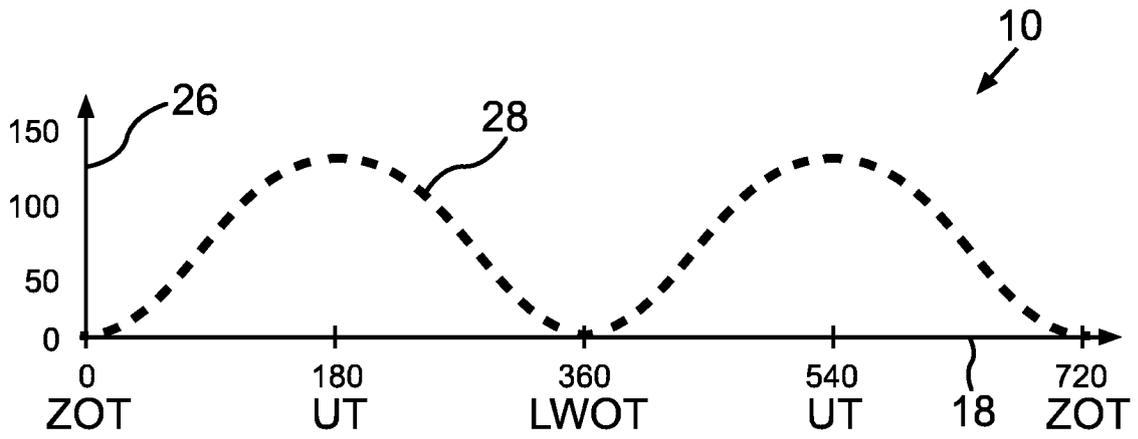


Fig.