

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 50946/2022
(22) Anmeldetag: 12.12.2022
(43) Veröffentlicht am: 15.02.2024

(51) Int. Cl.: **F02B 41/00** (2006.01)
F02M 21/02 (2006.01)
F01N 5/02 (2006.01)
F02G 5/02 (2006.01)
F01K 23/06 (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
DE 102009039551 A1
AT 522176 B1

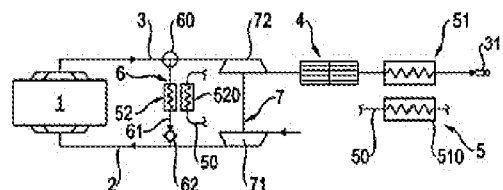
(71) Patentanmelder:
AVL List GmbH
8020 Graz (AT)

(72) Erfinder:
Glensvig Michael Dipl.-Ing.
8010 Graz (AT)
Seitz Hans Felix Dipl.-Ing.
8044 Graz (AT)
Sacher Thomas Dipl.-Ing. (FH)
8051 Graz (AT)

(74) Vertreter:
Hartinger Mario Dipl.-Ing.
8020 Graz (AT)

(54) **Verfahren zum Betreiben einer wasserstoffbetriebenen Brennkraftmaschine**

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben einer wasserstoffbetriebenen Brennkraftmaschine, bei welcher der Wasserstoff während des Saugtrakts oder am Beginn des Kompressiontakts zugebracht wird und mittels Fremdzündung gezündet wird, mit zumindest einer Gaswechselöffnung pro Zylinder, mit zumindest einem Kraftstoffinjektor, mit zumindest einem eine Abgasturbine (72) und einen Verdichter (71) aufweisenden Abgasturbolader (7), wobei Abgaswärme eines Auslasssystems (3) und/oder eines Abgasrückführsystems (6) der Brennkraftmaschine (1) mit einer nach einem organischen Rankine-Zyklus (ORC) arbeitenden Abwärmerückgewinnungseinrichtung (5) rückgewonnen wird, dadurch gekennzeichnet, dass die Brennkraftmaschine (1) in zumindest einem definierten Betriebspunkt mit folgender Kombination von Parametern betrieben wird.



ZUSAMMENFASSUNG

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben einer wasserstoffbetriebenen Brennkraftmaschine, bei welcher der Wasserstoff während des Saugtrakts oder am Beginn des Kompressionstakts zugebracht wird und mittels Fremdzündung gezündet wird, mit zumindest einer Gaswechselöffnung pro Zylinder, mit zumindest einem Kraftstoffinjektor, mit zumindest einem eine Abgasturbine (72) und einen Verdichter (71) aufweisenden Abgasturbolader (7), wobei Abgaswärme eines Auslasssystems (3) und/oder eines Abgasrückführsystems (6) der Brennkraftmaschine (1) mit einer nach einem organischen Rankine-Zyklus (ORC) arbeitenden Abwärmerückgewinnungseinrichtung (5) rückgewonnen wird, dadurch gekennzeichnet, dass die Brennkraftmaschine (1) in zumindest einem definierten Betriebspunkt mit folgender Kombination von Parametern betrieben wird:

- Kompressionsverhältnis (CR) zwischen 11 und 13;
- Spitzenverbrennungsdruck (P_{MX}) von mindestens 140 bar, vorzugsweise zwischen 140 bar und 160 bar, entlang der Nennleistungskurve;
- Liefergrad (λ_l) von mindestens 90%;
- Drallzahl (R_s) im Zylinder zwischen 1 und 2, wobei eine Luftbewegung vorzugsweise um die Zylinderquerachse (Tumble) mit einer Tumblezahl zwischen 1 und 2 erfolgt;
- Durchflusskoeffizient (K_v) zumindest einer Gaswechselöffnung: Mindestens 0,068;
- maximaler Einblasedruck des zumindest einen Kraftstoffinjektors: für Direkteinspritzung wenigstens 10 bar und höchstens 60 bar oder für Mehrpunkteinspritzung wenigstens 5 bar und höchstens 13 bar im Saugrohr;
- spezifische Düsendurchflussrate des zumindest einen Kraftstoffinjektors für Direkteinspritzung so, dass diese für eine Einblasedauer von weniger als 90° Kurbelwinkel vorliegt oder für

Mehrpunkteinspritzung so, dass maximal eine Einblasedauer von 240° Kurbelwinkel vorliegt;

- maximaler Abgasturbolader-Wirkungsgrad: mindestens 65%, vorzugsweise mindestens 70%;
- Zündzeitpunkt im besten Betriebspunkt des thermischen Wirkungsgrads (BTE) der Brennkraftmaschine (1) so, dass der Verbrennungsschwerpunkt (MFB50%) bei etwa 6° bis 14° , vorzugsweise 8° bis 12° , Kurbelwinkel (KW) nach dem Totpunkt (ATDC) der Zündung liegt;
- Aufladung für Direkteinspritzung so, dass ein Luftverhältnis von 1,8 – 2,3 im Bereich des maximalen Drehmoments sowie im Bereich der Nennleistung beträgt, oder Aufladung für Mehrpunkteinspritzung so, dass ein Luftverhältnis von 1,7 – 2,2 im Bereich des maximalen Drehmoments sowie im Bereich der Nennleistung beträgt.

Fig. 1

Verfahren zum Betreiben einer wasserstoffbetriebenen Brennkraftmaschine

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben einer wasserstoffbetriebenen Brennkraftmaschine, bei welcher der Wasserstoff während des Saugtrakts oder am Beginn des Kompressionstakts zugebracht wird und mittels Fremdzündung gezündet wird, mit zumindest einer Gaswechselöffnung pro Zylinder, zumindest einem Kraftstoffinjektor, mit zumindest einem eine Abgasturbine und einen Verdichter aufweisenden Abgasturbolader, wobei Abgaswärme des Auslasssystems und/oder des Abgasrückführsystems der Brennkraftmaschine mit einer nach einem organischen Rankine-Zyklus arbeitenden Abwärmerückgewinnungseinrichtung rückgewonnen wird.

Weiters betrifft die Erfindung eine wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschine, bei welcher der Wasserstoff während des Saugtrakts oder am Beginn des Kompressionstakts zugebracht wird und mittels Fremdzündung gezündet wird, mit zumindest einem Kraftstoffinjektor, mit zumindest einem eine Abgasturbine und einen Verdichter aufweisenden Abgasturbolader, wobei vorzugsweise die Brennkraftmaschine ein Abgasrückführsystem mit zumindest einer Abgasrückführleitung zwischen einem Einlasssystem und einem Auslasssystem aufweist, sowie mit einer nach einem organischen Rankine-Zyklus arbeitenden Abwärmerückgewinnungseinrichtung zur Rückgewinnung von Abgaswärme aus dem Abgassystem und/oder dem Abgasrückführsystem, welche Abwärmerückgewinnungseinrichtung einen Kreislauf für ein Arbeitsmedium mit zumindest einer Pumpe, zumindest einem Verdampfer, zumindest einem Expander und zumindest einem Kondensator aufweist. Ferner betrifft die Erfindung ein Verfahren zum Auslegen dieser Brennkraftmaschine.

Abwärmerückgewinnungseinrichtungen werden unter anderem bei Straßen-Nutzfahrzeugen eingesetzt, um die Abgas-Abwärme der Brennkraftmaschine unter Verwendung eines einen Verdichter und einen Expander aufweisenden Abgasturboladers im organischen Rankine Zyklus zu nutzen. Dabei wird im Expander, beispielsweise einer Turbine oder einer Kolbenmaschine, mechanische Arbeit verrichtet.

Bisher wurden Abwärmerückgewinnungseinrichtungen und wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschinen insbesondere unabhängig voneinander entwickelt und optimiert. Die Abwärmerückgewinnungseinrichtung wurde nachträglich der wasserstoffbetriebenen Brennkraftmaschine zugefügt. Nachteilig ist, dass – obwohl die wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschine für sich und die Abwärmerückgewinnungseinrichtung für sich optimiert wurden – der thermische Wirkungsgrad des Gesamtsystems aus wasserstoffbetriebener Brennkraftmaschine und Abwärmerückgewinnungseinrichtung nicht optimal war.

Lediglich aus der österreichischen Patentschrift AT522176 B1 wurde ein System aus einer Abwärmerückgewinnungseinrichtung und einer Brennkraftmaschine optimiert. Bei dieser Brennkraftmaschine handelt es sich jedoch um eine mit Kraftstoffen wie Diesel operierende Brennkraftmaschine, dessen Ergebnisse nicht auf wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschinen übertragbar sind.

Aufgabe der Erfindung ist es, den Gesamtwirkungsgrad des Systems aus wasserstoffbetriebener Brennkraftmaschine und Abwärmerückgewinnungseinrichtung zu verbessern. Insbesondere ist es Aufgabe der Erfindung in zumindest einem Betriebspunkt einen thermischen Gesamtwirkungsgrad vom mindestens 45% zu erreichen.

Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe dadurch gelöst, dass die wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschine, bei welcher der Wasserstoff während des Saugtrakts oder am Beginn des Kompressionstakts zugebracht

wird und mittels Fremdzündung gezündet wird, in zumindest einem definierten Betriebspunkt mit folgender Kombination von Parametern betrieben wird:

- Kompressionsverhältnis (CR) zwischen 11 und 13;
- Spitzenverbrennungsdruck (P_{MX}) von mindestens 140 bar, vorzugsweise zwischen 140 bar und 160 bar, entlang der Nennleistungskurve;
- Liefergrad (λ_l) von mindestens 90%;
- Drallzahl (R_s) im Zylinder zwischen 1 und 2, wobei eine Luftbewegung vorzugsweise um die Zylinderquerachse (Tumble) mit einer Tumblezahl zwischen 1 und 2 erfolgt;
- Durchflusskoeffizient (K_v) zumindest einer Gaswechselöffnung: Mindestens 0,068;
- maximaler Einblasedruck des zumindest einen Kraftstoffinjektors: für Direkteinspritzung wenigstens 10 bar und höchstens 60 bar oder für Mehrpunkteinspritzung wenigstens 5 bar und höchstens 13 bar im Saugrohr;
- spezifische Düsendurchflussrate des zumindest einen Kraftstoffinjektors für Direkteinspritzung so, dass diese für eine Einblasedauer von weniger als 90° Kurbelwinkel an der Nennleistung vorliegt oder für Mehrpunkteinspritzung so, dass maximal eine Einblasedauer von 240° Kurbelwinkel vorliegt;
- maximaler Abgasturbolader-Wirkungsgrad: mindestens 65%, vorzugsweise mindestens 70%;
- Zündzeitpunkt im besten Betriebspunkt des thermischen Wirkungsgrads (BTE) der Brennkraftmaschine so, dass der Verbrennungsschwerpunkt (MFB50%) bei etwa 6° bis 14°, vorzugsweise 8° bis 12°, Kurbelwinkel (KW) nach dem Totpunkt (ATDC) der Zündung liegt;
- Aufladung für Direkteinspritzung so, dass ein Luftverhältnis von 1,8 – 2,3 im Bereich des maximalen Drehmoments sowie im Bereich der Nennleistung beträgt, oder Aufladung für Mehrpunkteinspritzung so,

dass ein Luftverhältnis von 1,7 – 2,2 im Bereich des maximalen Drehmoments sowie im Bereich der Nennleistung beträgt.

In Bezug zum Kompressionsverhältnis kann auch ein Wert für den Mitteldruck bestimmt werden. Der Mitteldruck ist eine Rechengröße, die dazu dient, den Wirkungsgrad und den Ladungswechsel von Hubkolbenmotoren unabhängig von Hubraum oder Größe des Motors zu beurteilen. Er ist der Quotient aus der vom Motor bei einem Arbeitsspiel verrichteten mechanischen Arbeit (in Newtonmeter, Nm) und seinem Hubraum (in Kubikmeter, m³), sodass am Ende ein Druck in bar übrigbleibt. Der Bremsmitteldruck (Break mean effective pressure, BMEP) ist der von einer gemessenen Bremskraft berechnete Mitteldruck und kann bei einem Kompressionsverhältnis von 11-13 bar zwischen 20-22 bar betragen.

Die wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschine kann mit Direkteinspritzung oder Mehrpunkteinspritzung betrieben werden. Direkteinspritzung bedeutet die direkte Einspritzung des Wasserstoffs in den Brennraum des Zylinders. Die Mehrpunkteinspritzung findet im Saugrohr statt. Je nachdem ob Direkteinspritzung oder Mehrpunkteinspritzung gewählt wird, sind unterschiedliche Parameter zu wählen.

Als Nennleistung wird, die maximale Leistung der Brennkraftmaschine bei einer gegebenen Drehzahl verstanden.

Die zumindest eine Gaswechselöffnung pro Zylinder ist zum Ein- oder Auslassen des Wasserstoffs in die oder aus der Brennkammer des Zylinders vorgesehen. Als Abgasturbolader wird eine Einrichtung zur Verdichtung der einem Verbrennungsmotor zugeführten Luft bezeichnet. Der Abgasturbolader weist zumindest eine Abgasturbine und einen Verdichter auf. Mit der Abgasturbine wird Leistung gewonnen. Die von der Abgasturbine gewonnene Leistung kann über den Verdichter die Ladeluft komprimieren. Der Spitzenverbrennungsdruck ist der maximal vorliegende Druck und entsteht üblicherweise kurz nach der Zündung. Er liegt grundsätzlich um ein Mehrfaches höher als der effektive und der innere Mitteldruck und steht

immer nur für kurze Zeit an. Der Liefergrad beschreibt bei der Brennkraftmaschine das Verhältnis der nach Abschluss eines Ladungswechsels tatsächlich im Zylinder enthaltenen Frischladung zur theoretisch maximal möglichen Füllung. Der Durchflusskoeffizient ist ein Maß für den erzielbaren Durchsatz einer Flüssigkeit oder eines Gases durch die zumindest eine Gaswechselöffnung. Der Wert des Durchflusskoeffizienten wird in der Einheit m^3/h angegeben und ist als effektiver Querschnitt interpretierbar. Der Einblasedruck des zumindest einen Kraftstoffinjektors beträgt maximal 290 - 350 bar an der Volllastbegrenzung. In Teillast erfolgt eine Reduktion des Einblasedrucks, jedoch auf nicht weniger als 200 bar. Als Verbrennungsschwerpunkt wird der Zeitpunkt bezeichnet, bei dem 50 % der eingesetzten Kraftstoffmasse verbrannt sind. Die Einblasedauer von 20-30° Kurbelwinkel bedeutet, dass die Dauer, die der Kraftstoffinjektor Wasserstoff einbläst, der Dauer entspricht, in der die Kurbel einen Kurbelwinkel einer Größe zwischen 20° und 30° überstreicht. Mit einer gegebenen Drehzahl folgt aus dieser drehzahlunabhängigen Definition die Einblasedauer in Sekunden. Das Luftverhältnis ist eine dimensionslose Kennzahl aus der Verbrennungslehre, die das Massenverhältnis von Luft zu Brennstoff relativ zum jeweils stöchiometrisch idealen Verhältnis für einen theoretisch vollständigen Verbrennungsprozess angibt. Das Luftverhältnis setzt die tatsächlich zur Verfügung stehende Luftmasse ins Verhältnis zur mindestens notwendigen Luftmasse, die für eine stöchiometrisch vollständige Verbrennung theoretisch benötigt wird.

Weist die Brennkraftmaschine ein Abgasrückführsystem, insbesondere ein Hochdruck-Abgasrückführsystem, auf, mit welchem in zumindest einem Betriebspunkt der Brennkraftmaschine Abgas von einem Auslasssystem zu einem Einlasssystem der Brennkraftmaschine rückgeführt wird, so ist es vorteilhaft, wenn das Abgas in zumindest einem definierten Betriebspunkt mit einer Abgasrückführrate zwischen 0 und 15% rückgeführt wird. Vorzugsweise wird dabei das rückgeführte Abgas in der Abgasrückführleitung des Abgasrückführsystems über ein in Strömungsrichtung öffnendes Reed-Ventil geleitet.

In einer Ausführungsvariante der Erfindung ist vorgesehen, dass die Abgasturbine des Abgasturboladers mittels eines Waste-Gates oder einer variablen Turbinengeometrie geregelt wird.

In einer Ausführungsvariante der Erfindung ist vorgesehen, dass die Brennkraftmaschine bei einer Drehzahl der Kurbelwelle in einem Bereich zwischen 1050 U/min und 1250 U/min, vorzugsweise zwischen 1025 U/min und 1150 U/min, und bei einem Drehmoment in einem Bereich zwischen 75% und 85% des Nenndrehmomentes für diese Drehzahl mit maximalem thermischen Wirkungsgrad betrieben wird, wobei vorzugsweise der relative Ladedruck des Abgasturboladers zwischen 1,6 und 2,1 bar liegt.

Die besten Ergebnisse lassen sich erzielen, wenn als Arbeitsmedium der Abwärmerückgewinnungseinrichtung Cyclopentan verwendet wird.

Durch die genannten Maßnahmen wird der Massenfluss durch die Brennkraftmaschine minimiert, um höchste Abgastemperaturen zu erreichen. Auf diese Weise erreicht man einen Thermischen Gesamtwirkungsgrad von mindesten 45%, wobei zum thermischen Gesamtwirkungsgrad die Brennkraftmaschine mit etwa 43% und die Abwärmerückgewinnungseinrichtung mit etwa 2% beiträgt.

Dadurch ist es möglich die CO₂-Emissionen im Vergleich zu leistungsgleichen herkömmlichen Kombinationen aus Brennkraftmaschinen und Abwärmerückgewinnungseinrichtungen zu reduzieren.

Als Turbocompound wird eine der Brennkraftmaschine nachgeschaltete Turbine verstanden, die aus der kinetischen Energie des Abgases Leistung gewinnt und vorzugsweise der Abgasturbine nachgeordnet ist. Das Turbocompound steht über eine Übersetzungseinrichtung mit einem Getriebe in mechanischer Verbindung, um die hohen Rotationsgeschwindigkeiten des Turbocompound auf die üblicherweise deutlich geringeren Rotationsgeschwindigkeiten des Getriebes zu regeln. Die Übersetzungseinrichtung kann hierzu beispielsweise ein

Übersetzungsverhältnis von 15:1 bis 20:1 aufweisen. Der beste Betriebspunkt des thermischen Wirkungsgrads liegt bei einer Drehzahl von etwa 1100 U/min. Hieraus folgt mit dem angegebenen Übersetzungsverhältnis eine Rotationsgeschwindigkeit des Turbocompounds von etwa 15000 bis 22000 U/min. Die Verwendung eines Turbocompounds kann Vorteile mit sich bringen, stellt jedoch in Verbindung mit der Abgasrückführeinrichtung stets einen Kompromiss dar. Vorteilhaft am Turbocompound ist, dass die Energie des Abgases direkt genutzt wird und damit zur Verfügung steht. Negativ wirkt sich dagegen aus, dass die Abgastemperatur durch das Turbocompound gesenkt wird und die Effizienz der Abgasnachbehandlungseinrichtung und der Abwärmerückgewinnungseinrichtung reduziert wird. Ferner bedeutet der Einsatz eines Turbocompounds zusätzliche Kosten und eine höhere Komplexität der Brennkraftmaschine. Um einen hohen thermischen Gesamtwirkungsgrad zu erreichen, wird erfindungsgemäß ein Verfahren zur Auslegung einer Brennkraftmaschine vorgeschlagen, welches folgende Schritte aufweist:

- a. Anpassen des Abgasturboladers solange, bis ein minimaler Ladedruck des Verdichters des Abgasturboladers erreicht wird, bei dem eine erforderliche Abgasmenge noch rückgeführt werden kann, um gesetzlich vorgegebene maximale NO_x-Emissionswerte am Endrohraustritt der Brennkraftmaschine zu erfüllen;
- b. Erhöhen des Kompressionsverhältnisses der Brennkraftmaschine, bis der maximale Zylinder-Spitzendruck oder Selbstzündung erreicht wird;
- c. Wiederholen der Schritte a. und b. mit höherer Abgasrückführrate, wenn der Stickoxidgehalt am Endrohraustritt des Auslassstranges der Brennkraftmaschine die gesetzlich vorgegebenen maximalen NO_x-Emissionswerte überschreitet.

Diese iterative Auslegungsmethode für die Brennkraftmaschine ermöglicht den höchsten thermischen Gesamtwirkungsgrad für die Brennkraftmaschine

samt Abwärmerückgewinnungseinrichtung für einen einzelnen stationären Betriebspunkt.

Die Erfindung wird im Folgenden anhand des in den nicht einschränkenden Figuren gezeigten Ausführungsbeispiels näher erläutert.

Darin zeigen schematisch:

Fig. 1 eine erfindungsgemäße Brennkraftmaschine,

Fig. 1a eine erfindungsgemäße Brennkraftmaschine mit einem Turbocompound,

Fig. 2 eine Abwärmerückgewinnungseinrichtung einer solchen Brennkraftmaschine,

Fig. 3 ein Detail der Brennkraftmaschine,

Fig. 4 eine vereinfachte Abwärmerückgewinnungseinrichtung,

Fig. 5 ein Leistungsdiagramm des Expanders,

Fig. 6 ein Kennfeld der Brennkraftmaschine ohne Abwärmerückgewinnungseinrichtung und

Fig. 7 ein Kennfeld der Brennkraftmaschine mit Abwärmerückgewinnungseinrichtung.

Fig. 1 zeigt schematisch eine erfindungsgemäße wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschine 1 zur Durchführung des beanspruchten Verfahrens. Die wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschine 1 weist einen Einlassstrang 2, einen Auslassstrang 3, eine im Auslassstrang 3 angeordnete Abgasnachbehandlungseinrichtung 4 und eine Abwärmerückgewinnungseinrichtung 5 auf, von welcher in Fig. 1 der Abgaswärmetauscher 51 und der EGR-Wärmetauscher 52 (EGR=exhaust gas

recirculation) dargestellt ist. Zwischen dem Auslassstrang 3 und dem Einlassstrang 2 ist eine Abgasrückführeinrichtung 6, beispielsweise eine Hochdruck-Abgasrückführeinrichtung vorgesehen, mit welcher Abgase aus dem Auslassstrang 3 in den Einlassstrang 2 rückgeführt werden. Weiters weist die Brennkraftmaschine 1 einen Abgasturbolader 7 mit einem Verdichter 71 im Einlassstrang 2 und einer Abgasturbine 72 im Auslassstrang 3 auf.

Pro Zylinder sind über Hubventile gesteuerte Gaswechselöffnungen, also eine oder mehrere Einlassöffnungen und eine oder mehrere Auslassöffnungen vorgesehen, welche den Gasaustausch im Zylinder ermöglichen. Die wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschine 1 ist fremdgezündet, zur Verbrennung von Wasserstoff eingerichtet und kann einen oder mehrere Zylinder für hin- und hergehende Kolben aufweisen. Die Brennkraftmaschine ist somit eine Wasserstoff-Brennkraftmaschine.

Die Abgasnachbehandlungseinrichtung 4 kann zumindest einen Partikelfilter und/oder zumindest einen Katalysator aufweisen. Die Abgasrückführeinrichtung 6 weist ein Abgasrückführventil 60 und eine Abgasrückführleitung 61 auf, in welchem der EGR-Wärmetauscher 52 und ein Reed-Ventil 62 (Flatterventil) angeordnet ist.

Die Abwärmerückgewinnungseinrichtung 5 arbeitet nach dem ORC-Verfahren (ORC=Organic Rankine Cycle) und weist einen Kreislauf 50 für ein organisches Arbeitsmedium auf, welcher in Fig. 2 dargestellt ist. In dem Kreislauf 50 sind neben dem ersten Verdampfer 510 des Abgaswärmetauschers 51 und dem zweiten Verdampfer 520 des EGR-Wärmetauschers 52 ein Expander 53 - beispielsweise eine Kolbenmaschine oder eine Turbine, ein Kondensator 54, ein Reservoir 55, eine Pumpe 56 und ein Verteilerventil 57 angeordnet.

Die Wärmequellen - Abgas des Abgasstranges 3 und rückgeführtes Abgas des Abgasrückführleitung 61 - werden in der Abwärmerückgewinnungseinrichtung 5 genutzt, um das Arbeitsmedium im

ersten Verdampfer 51 und/oder zweiten Verdampfer 52 zu verdampfen. Der erste Verdampfer 51 und der zweite Verdampfer 52 sind im Kreislauf 50 der Abwärmerückgewinnungseinrichtung 5 parallelgeschaltet und werden über das Verteilerventil 57 geschaltet, um einen Betrieb mit oder ohne Abgasrückführung zu ermöglichen. In letzterem Falle wird das Arbeitsmedium am zweiten Verdampfer 52 vorbeigeleitet.

Der erste Verdampfer 51 ist im Abgasstrang 3 nach der Abgasnachbehandlungseinrichtung 4 der Brennkraftmaschine 1 positioniert, wie in Fig. 3 gezeigt ist. Dadurch können nachteilige Auswirkungen auf die Abgasnachbehandlung vermieden werden.

Mittels des ORC-Verfahrens wird in der Abwärmerückgewinnungseinrichtung 5 Abwärme aus dem Abgas (Enthalpie) in mechanische Energie umgewandelt.

Fig. 1a zeigt eine erfindungsgemäße wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschine mit einem zwischen der Abgasturbine 72 und der Abgasnachbehandlungseinrichtung 4 angeordneten Turbocompound 8. Das Turbocompound 8 ist eine Turbine, die dazu eingerichtet ist, aus der kinetischen Energie des Abgases Leistung zu gewinnen. Das Turbocompound 8 steht über eine Übersetzungseinrichtung (nicht dargestellt) mit einem Getriebe (nicht dargestellt) in mechanischer Verbindung. Die hohen Rotationsgeschwindigkeiten des Turbocompound von im Betrieb etwa 15000 bis 30000 U/min können mittels der Übersetzungseinrichtung auf die Rotationsgeschwindigkeiten des Getriebes geregelt werden. Die Übersetzungseinrichtung kann hierzu beispielsweise ein Übersetzungsverhältnis von 20:1 aufweisen.

Fig. 4 zeigt eine Abwärmerückgewinnungseinrichtung 5 mit vereinfachtem ORC mit nur einer Wärmequelle, und zwar einem ersten Verdampfer 51 eines Abgaswärmetauschers 51. Die Enthalpie Q des Abgases kann aus dem Abgasmassenstrom m , der spezifischen Wärmekapazität c_p , welche als annähernd konstant betrachtet wird, und der abgasseitigen

Temperaturdifferenz ΔT zwischen Eintritt 511 und Austritt 512 des ersten Verdampfers 510 berechnet werden:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Ein Ansteigen der Enthalpie Q hat ein Ansteigen der mechanischen Leistung P des Expanders zu Folge.

In Fig.5 ist die Leistung P des Expanders 53 als Funktion über verschiedenen Abgasmassenströme m und abgasseitige Eintrittstemperaturen T_E des Abgaswärmetauschers 51 mit einem konstanten Wirkungsgrad aufgetragen. Daraus ist ersichtlich, dass die abgasseitigen Eintrittstemperaturen T_E des Abgaswärmetauschers 51 größeren Einfluss auf die Leistung P des Expanders 53 haben als der Abgasmassenstrom m .

Zur Verdeutlichung des Wirkprinzips des ORC-Verfahrens ist die Position des Betriebspunktes mit dem höchsten thermischen Wirkungsgrad BTE_{opt} für eine mit flüssigem Brennstoff betriebene Brennkraftmaschine in den in Fig. 6 und 7 gezeigten Kennfeldern dargestellt, wobei jeweils das Drehmoment MD über der Drehzahl N der Brennkraftmaschine aufgetragen sind. Im Kennfeld sind die thermischen Wirkungsgrade BTE_1 der Brennkraftmaschine 1 eingetragen. Fig. 6 zeigt den thermischen Wirkungsgrad BTE_1 für die Brennkraftmaschine 1 allein, also ohne Abwärmerückgewinnungseinrichtung 5 (WHR=Waste Heat Recovery), und Fig. 7 zeigt den thermischen Wirkungsgrad BTE_{1+5} für die Brennkraftmaschine 1 samt Abwärmerückgewinnungseinrichtung 5. Der markierte Bestpunkt BTE_{opt} des thermischen Wirkungsgrades BTE_1 liegt in Fig. 6 bei der Brennkraftmaschine 1 allein bei 43 % - bei einer Drehzahl N von 1250 U/min und einem Drehmoment MD von 1200 Nm, das sind 85% des Nenndrehmomentes M_N für diese Drehzahl N - und in Fig. 7 bei der Brennkraftmaschine 1 samt Abwärmerückgewinnungseinrichtung 5 bei etwa 45 % - bei einer Drehzahl N von 1230 U/min und einem Drehmoment MD von 1200 Nm, das sind 85% des Nenndrehmomentes M_N für diese Drehzahl N .

Auf der Basis der Figuren 5, 6 und 7 lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass - bei gegebener Abwärmemenge einer Brennkraftmaschine 1 - für die Effizienz des ORC-Verfahrens hohe Abgastemperaturen T_E und geringe Abgasmassenströme $\dot{m}$ besser sind als niedrige Abgastemperaturen T_E und hohe Abgasmassenströme $\dot{m}$.

Hohe Abgastemperaturen T_E bei möglichst geringen Abgasmassenströmen $\dot{m}$ können in einer Brennkraftmaschine 1 durch größtmögliche Reduzierung der Luftmenge erzielt werden. Dieses Prinzip ist für mit Wasserstoff betriebene Brennkraftmaschinen ebenso gültig wie für mit anderem Brennstoff betriebene Brennkraftmaschinen.

P A T E N T A N S P R Ü C H E

1. Verfahren zum Betreiben einer wasserstoffbetriebenen

Brennkraftmaschine, bei welcher der Wasserstoff während des Saugtrakts oder am Beginn des Kompressionstakts zugebracht wird und mittels Fremdzündung gezündet wird, mit zumindest einer Gaswechselöffnung pro Zylinder, mit zumindest einem Kraftstoffinjektor, mit zumindest einem eine Abgasturbine (72) und einen Verdichter (71) aufweisenden Abgasturbolader (7), wobei Abgaswärme eines Auslasssystems (3) und/oder eines Abgasrückführsystems (6) der Brennkraftmaschine (1) mit einer nach einem organischen Rankine-Zyklus (ORC) arbeitenden Abwärmerückgewinnungseinrichtung (5) rückgewonnen wird, dadurch gekennzeichnet, dass die Brennkraftmaschine (1) in zumindest einem definierten Betriebspunkt mit folgender Kombination von Parametern betrieben wird:

- Kompressionsverhältnis (CR) zwischen 11 und 13;
- Spitzenverbrennungsdruck (P_{MX}) von mindestens 140 bar, vorzugsweise zwischen 140 bar und 160 bar, entlang der Nennleistungskurve;
- Liefergrad (λ_l) von mindestens 90%;
- Drallzahl (R_S) im Zylinder zwischen 1 und 2, wobei eine Luftbewegung vorzugsweise um die Zylinderquerachse (Tumble) mit einer Tumblezahl zwischen 1 und 2 erfolgt;
- Durchflusskoeffizient (K_v) zumindest einer Gaswechselöffnung: Mindestens 0,068;
- maximaler Einblasedruck des zumindest einen Kraftstoffinjektors: für Direkteinspritzung wenigstens 10 bar und höchstens 60 bar oder für Mehrpunkteinspritzung wenigstens 5 bar und höchstens 13 bar im Saugrohr;
- spezifische Düsendurchflussrate des zumindest einen Kraftstoffinjektors für Direkteinspritzung so, dass diese für eine Einblasedauer von weniger als 90° Kurbelwinkel vorliegt oder für

Mehrpunkteinspritzung so, dass maximal eine Einblasedauer von 240° Kurbelwinkel vorliegt;

- maximaler Abgasturbolader-Wirkungsgrad: mindestens 65%, vorzugsweise mindestens 70%;
- Zündzeitpunkt im besten Betriebspunkt des thermischen Wirkungsgrads (BTE) der Brennkraftmaschine (1) so, dass der Verbrennungsschwerpunkt (MFB50%) bei etwa 6° bis 14° , vorzugsweise 8° bis 12° , Kurbelwinkel (KW) nach dem Totpunkt (ATDC) der Zündung liegt;
- Aufladung für Direkteinspritzung so, dass ein Luftverhältnis von 1,8 – 2,3 im Bereich des maximalen Drehmoments sowie im Bereich der Nennleistung beträgt, oder Aufladung für Mehrpunkteinspritzung so, dass ein Luftverhältnis von 1,7 – 2,2 im Bereich des maximalen Drehmoments sowie im Bereich der Nennleistung beträgt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei mittels eines Abgasrückführsystem (6) zumindest dem definierten Betriebspunkt der Brennkraftmaschine (1) Abgas von einem Auslasssystem (3) zu einem Einlasssystem (2) rückgeführt wird, dadurch gekennzeichnet, dass das Abgas zumindest in dem definierten Betriebspunkt mit einer Abgasrückführrate (RT_EGR) zwischen 0% und 15% rückgeführt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass das rückgeführte Abgas in einer Abgasrückführleitung (61) des Abgasrückführsystems (6) über ein in Strömungsrichtung öffnendes Reed-Ventil (62) geleitet wird.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Abgasturbine (72) des Abgasturboladers (7) mittels eines Waste-Gates oder einer variablen Turbinengeometrie geregelt wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass als Arbeitsmedium der Abwärmerückgewinnungseinrichtung (5) Cyclopentan verwendet wird.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Fremdzündung von einer Zündkerze ausgelöst wird.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschine einen über eine Übersetzungseinrichtung mit einem Getriebe in mechanischer Verbindung stehenden Turbocompound aufweist und die Rotationsgeschwindigkeit des Turbocompounds am besten Betriebspunkt des thermischen Wirkungsgrads im Bereich von 15000 – 22000 U/min liegt.
8. Wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschine (1), bei welcher der Wasserstoff während des Saugtrakts oder am Beginn des Kompressionstakts zugebracht wird und mittels Fremdzündung gezündet wird, mit zumindest einem Gaswechselventil, mit zumindest einem Kraftstoffinjektor, mit zumindest einer Abgasturbine (72) und einen Verdichter (71) aufweisenden Abgasturbolader (7), wobei vorzugsweise die Brennkraftmaschine (1) ein Abgasrückführsystem (6) mit zumindest einer Abgasrückführleitung (61) zwischen einem Einlasssystem (2) und einem Auslasssystem (3) aufweist, sowie mit einer nach einem organischen Rankine-Zyklus (ORC) arbeitenden Abwärmerückgewinnungseinrichtung (5) zur Rückgewinnung von Abgaswärme aus dem Abgassystem (3) und/oder dem Abgasrückführsystem (6), welche Abwärmerückgewinnungseinrichtung (5) einen Kreislauf für ein Arbeitsmedium mit zumindest einer Pumpe (56) , zumindest einem Verdampfer (510, 520), zumindest einen Expander (53) und zumindest einem Kondensator (54) aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass die Brennkraftmaschine (1) ausgebildet ist, um in zumindest einem definierten Betriebspunkt mit folgender Kombination von Parametern betrieben zu werden:

- Kompressionsverhältnis (CR) zwischen 11 und 13;
- Spitzenverbrennungsdruck (P_{MX}) von mindestens 140 bar, vorzugsweise zwischen 140 bar und 160 bar, entlang der Nennleistungskurve;
- Liefergrad (λ_l) von mindestens 90%;
- Drallzahl (R_S) im Zylinder zwischen 1 und 2, wobei eine Luftbewegung vorzugsweise um die Zylinderquerachse (Tumble) mit einer Tumblezahl zwischen 1 und 2 erfolgt;
- Durchflusskoeffizient (K_v) zumindest einer Gaswechselöffnung: mindestens 0,068;
- maximaler Einblasedruck des zumindest einen Kraftstoffinjektors: Für Direkteinspritzung wenigstens 10 bar und höchstens 60 bar oder für Mehrpunkteinspritzung wenigstens 5 bar und höchstens 13 bar im Saugrohr;
- spezifische Düsendurchflussrate des zumindest einen Kraftstoffinjektors für Direkteinspritzung so, dass diese für eine Einblasedauer von weniger als 90° Kurbelwinkel vorliegt oder für Mehrpunkteinspritzung so, dass maximal eine Einblasedauer von 240° Kurbelwinkel vorliegt;
- maximaler Abgasturbolader-Wirkungsgrad: mindestens 65%, vorzugsweise mindestens 70%;
- Zündzeitpunkt im besten Betriebspunkt des thermischen Wirkungsgrads so, dass der Verbrennungsschwerpunkt (MFB50%) bei etwa 6° bis 14° , vorzugsweise 8° bis 12° , Kurbelwinkel (KW) nach dem Totpunkt (ATDC) der Zündung liegt; und
- Aufladung für Direkteinspritzung so, dass ein Luftverhältnis von 1,8 – 2,3 im Bereich des maximalen Drehmoments sowie im Bereich der Nennleistung beträgt, oder Aufladung für Mehrpunkteinspritzung so, dass ein Luftverhältnis von 1,7 – 2,2 im Bereich der Nennleistung beträgt.

9. Wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschine (1) nach Anspruch 8, mit einem Abgasrückführsystem (6), vorzugsweise einem Hochdruck-

Abgasrückführsystem, mit zumindest einer Abgasrückführleitung (61) zwischen einem Einlasssystem (2) und einem Auslasssystem (3), dadurch gekennzeichnet, dass das Abgas in dem definierten Betriebspunkt mit einer Abgasrückführrate (RT_{EGR}) zwischen 0 und 15% rückführbar ist.

10. Wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschine (1) nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass in zumindest einer Abgasrückführleitung (61) des Abgasrückführsystems (6) ein in Strömungsrichtung des rückgeführten Abgases öffnendes Reed-Ventil (62) angeordnet ist.
11. Wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschine (1) nach einem der Ansprüche 8 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Abgasturbine (72) des Abgasturboladers (7) ein Waste-Gate oder eine variable Turbinengeometrie aufweist.
12. Wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschine (1) nach einem der Ansprüche 8 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass der maximale thermische Wirkungsgrad (BTE_1) der Brennkraftmaschine (1) bei einer Drehzahl (N) in einem Bereich zwischen 1020 U/min und 1200 U/min, vorzugsweise zwischen 1025 U/min und 1150 U/min, und bei einem Drehmoment (M) in einem Bereich zwischen 75% und 85% des Nenndrehmomentes (M_N) für diese Drehzahl (N) liegt, wobei vorzugsweise der relative Ladedruck des Abgasturboladers (7) zwischen 2,8 und 3,1 bar liegt.
13. Wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschine (1) nach einem der Ansprüche 8 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass das Arbeitsmedium der Abwärmerückgewinnungseinrichtung (5) Cyclopentan ist.
14. Wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschine (1) nach einem der Ansprüche 8 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass die wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschine einen über eine

Übersetzungseinrichtung mit einem Getriebe in mechanischer Verbindung stehenden Turbocompound aufweist und die Rotationsgeschwindigkeit des Turbocompound am besten Betriebspunkt des thermischen Wirkungsgrads im Bereich von 15000 – 22000 U/min liegt.

15. Verfahren zur Auslegung einer wasserstoffbetriebenen Brennkraftmaschine nach einem der Ansprüche 8 bis 14, welches folgende Schritte aufweist:

- Anpassen des Abgasturboladers so lange, bis ein minimaler Ladedruck des Verdichters des Abgasturboladers erreicht wird, bei dem eine erforderliche Abgasmenge noch rückgeführt werden kann, um gesetzlich vorgegebene maximale NO_x-Emissionswerte am Endrohraustritt der Brennkraftmaschine zu erfüllen;
- Erhöhen des Kompressionsverhältnisses der Brennkraftmaschine, bis der maximale Zylinder-Spitzenruck oder Selbstzündung erreicht wird; und
- Wiederholen der Schritte a. und b. mit höherer Abgasrückführrate, wenn der Stickoxidgehalt am Endrohraustritt des Auslassstranges der Brennkraftmaschine die gesetzlich vorgegebenen maximalen NO_x-Emissionswerte überschreitet.

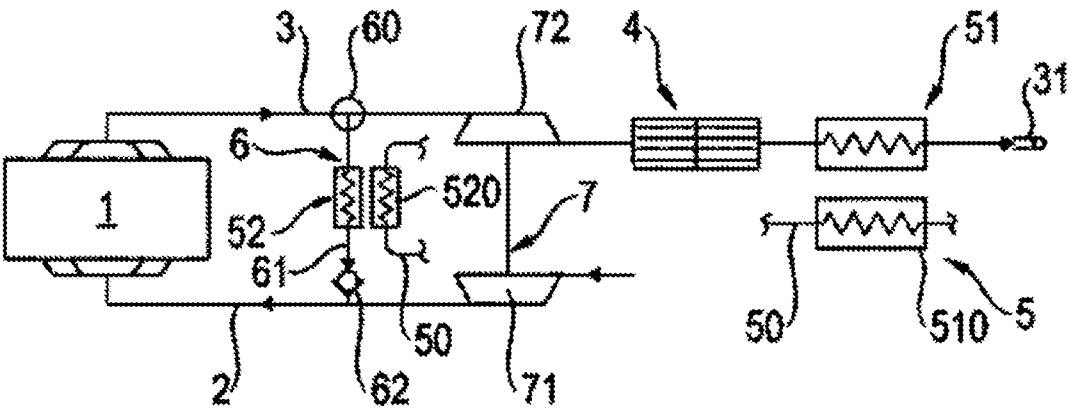


Fig. 1

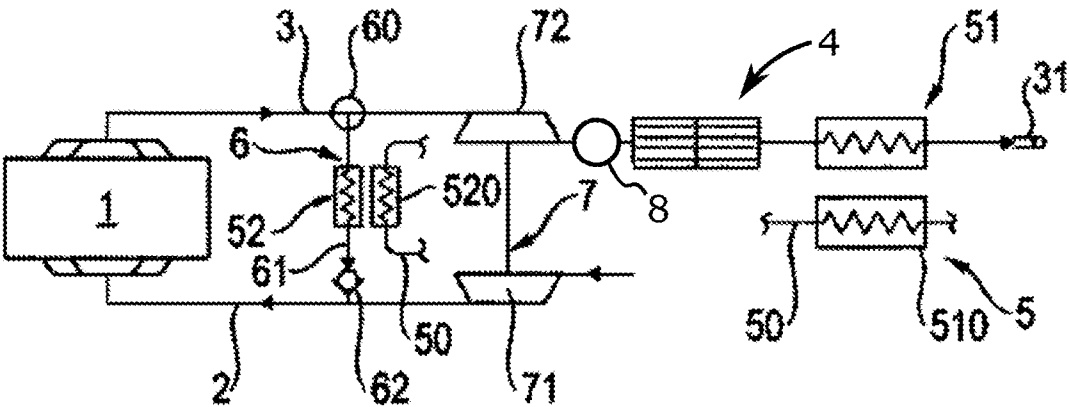


Fig. 1a

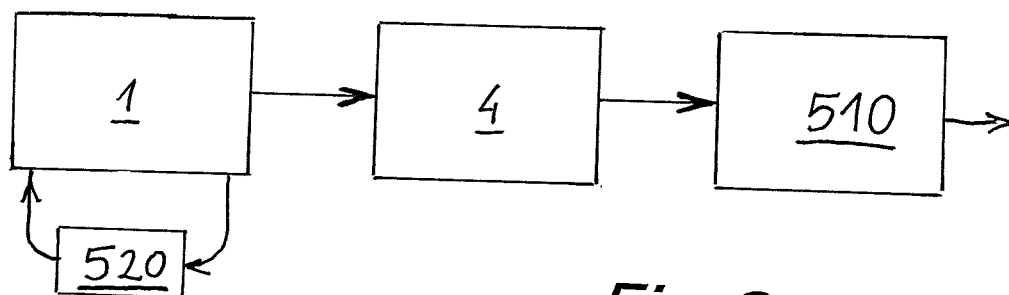
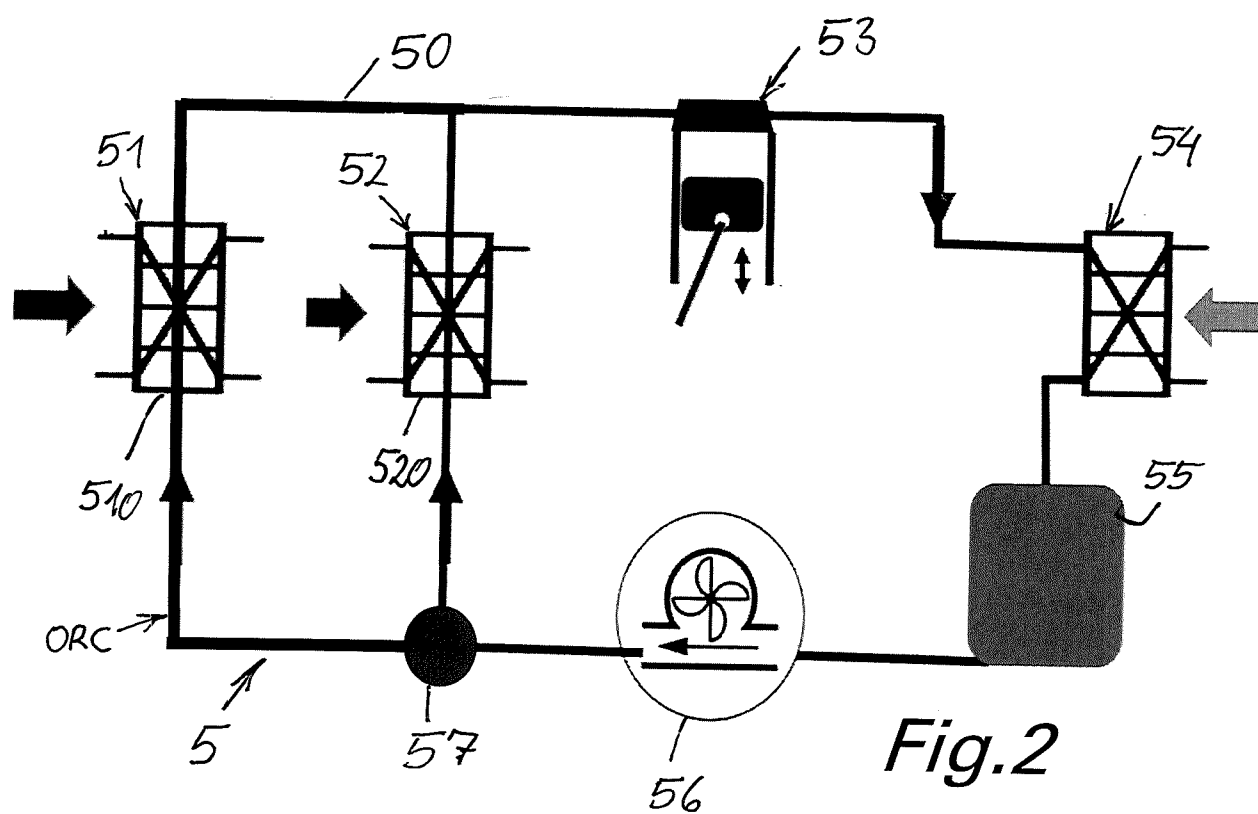


Fig. 3



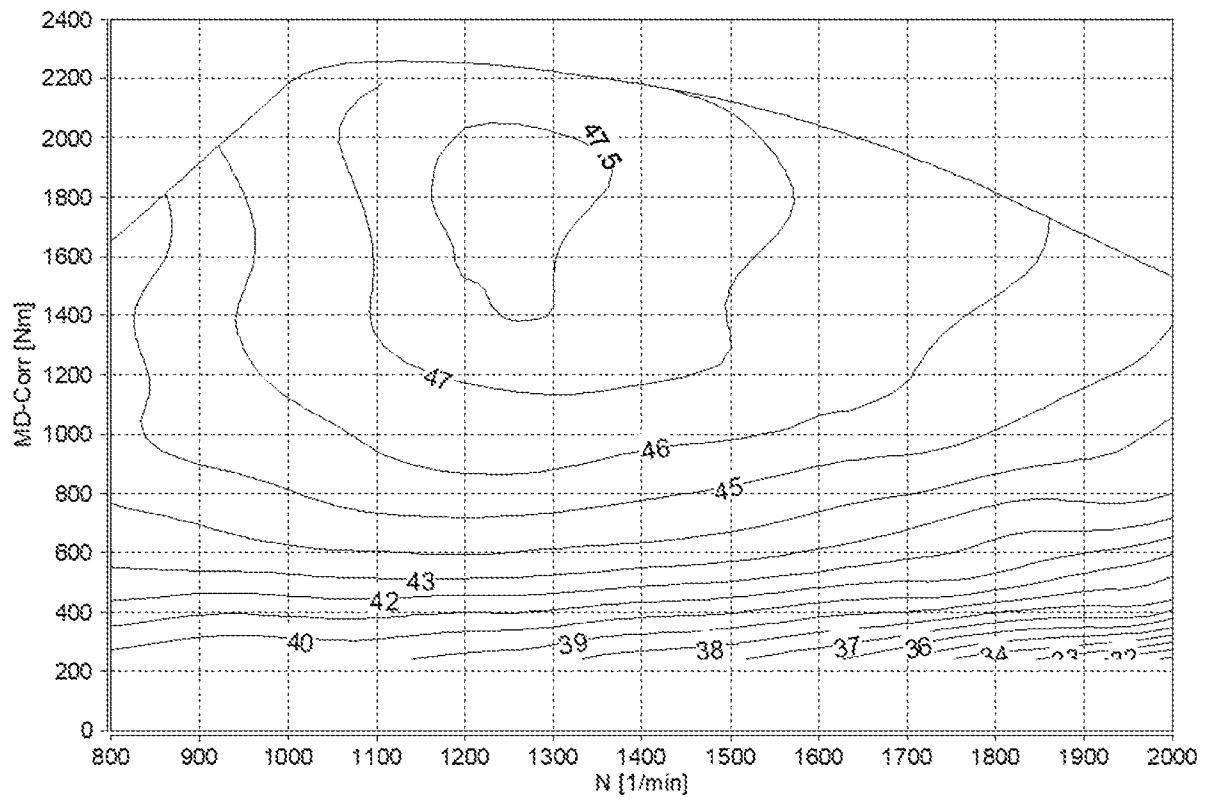


Fig. 6

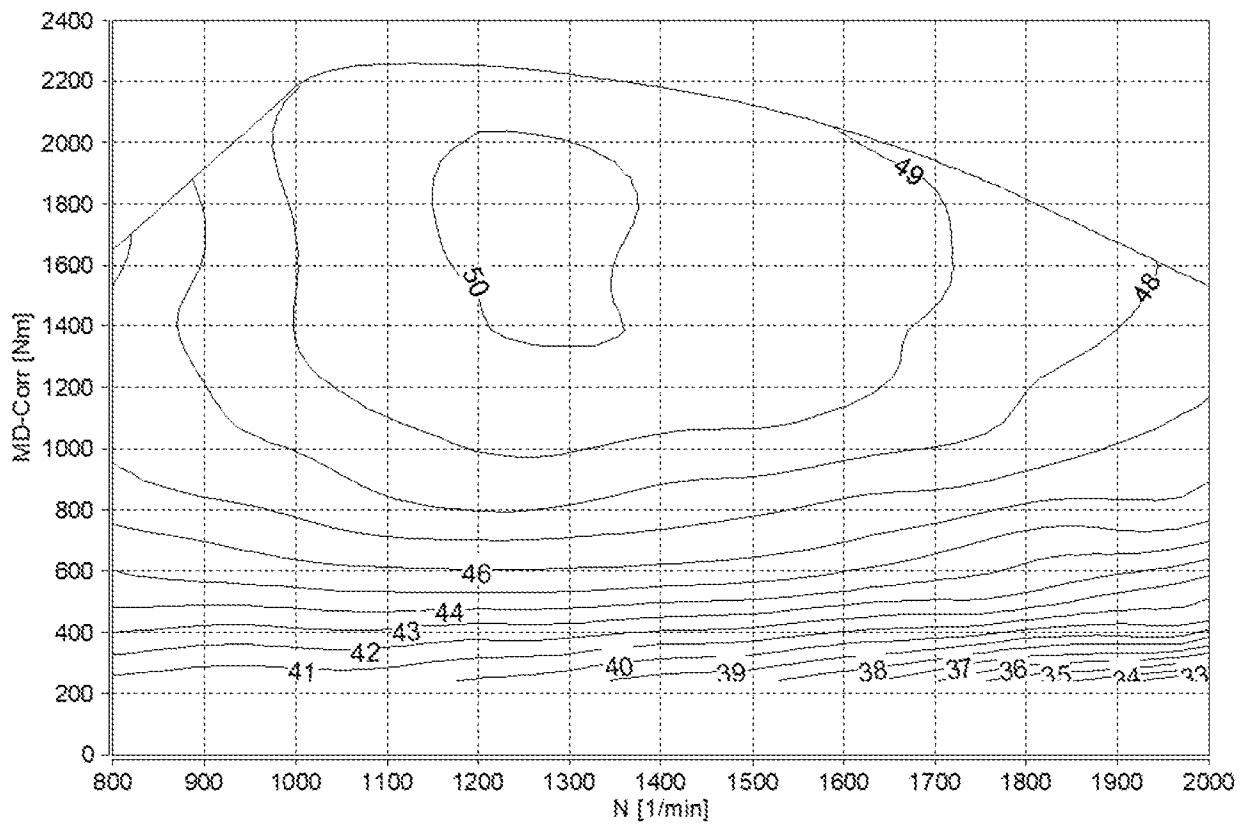


Fig. 7

Geänderte Patentansprüche 1 bis 14
(Reinschrift)

1. Verfahren zum Betreiben einer wasserstoffbetriebenen Brennkraftmaschine, bei welcher der Wasserstoff während des Saugtrakts oder am Beginn des Kompressionstakts zugebracht wird und mittels Fremdzündung gezündet wird, mit zumindest einer Gaswechselöffnung pro Zylinder, mit zumindest einem Kraftstoffinjektor, mit zumindest einem eine Abgasturbine (72) und einen Verdichter (71) aufweisenden Abgasturbolader (7), wobei Abgaswärme eines Auslasssystems (3) und/oder eines Abgasrückführsystems (6) der Brennkraftmaschine (1) mit einer nach einem organischen Rankine-Zyklus (ORC) arbeitenden Abwärmerückgewinnungseinrichtung (5) rückgewonnen wird, dadurch gekennzeichnet, dass die Brennkraftmaschine (1) in zumindest einem definierten Betriebspunkt mit folgender Kombination von Parametern betrieben wird:

- Kompressionsverhältnis (CR) zwischen 11 und 13;
- Spitzenverbrennungsdruck (P_{MX}) von mindestens 140 bar, vorzugsweise zwischen 140 bar und 160 bar, entlang der Nennleistungskurve;
- Liefergrad (λ_l) von mindestens 90%;
- Drallzahl (R_s) im Zylinder zwischen 1 und 2, wobei eine Luftbewegung vorzugsweise um die Zylinderquerachse (Tumble) mit einer Tumblezahl zwischen 1 und 2 erfolgt;
- Durchflusskoeffizient (K_v) zumindest einer Gaswechselöffnung: Mindestens 0,068;
- maximaler Einblasedruck des zumindest einen Kraftstoffinjektors: für Direkteinspritzung wenigstens 10 bar und höchstens 60 bar oder für Mehrpunkteinspritzung wenigstens 5 bar und höchstens 13 bar im Saugrohr;

- spezifische Düsendurchflussrate des zumindest einen Kraftstoffinjektors für Direkteinspritzung so, dass diese für eine Einblasedauer von weniger als 90° Kurbelwinkel vorliegt oder für Mehrpunkteinspritzung so, dass maximal eine Einblasedauer von 240° Kurbelwinkel vorliegt;
 - maximaler Abgasturbolader-Wirkungsgrad: mindestens 65%, vorzugsweise mindestens 70%;
 - Zündzeitpunkt im besten Betriebspunkt des thermischen Wirkungsgrads (BTE) der Brennkraftmaschine (1) so, dass der Verbrennungsschwerpunkt (MFB50%) bei etwa 6° bis 14°, vorzugsweise 8° bis 12°, Kurbelwinkel (KW) nach dem Totpunkt (ATDC) der Zündung liegt;
 - Aufladung für Direkteinspritzung so, dass ein Luftverhältnis von 1,8 – 2,3 im Bereich des maximalen Drehmoments sowie im Bereich der Nennleistung beträgt, oder Aufladung für Mehrpunkteinspritzung so, dass ein Luftverhältnis von 1,7 – 2,2 im Bereich des maximalen Drehmoments sowie im Bereich der Nennleistung beträgt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei mittels eines Abgasrückführsystem (6) zumindest dem definierten Betriebspunkt der Brennkraftmaschine (1) Abgas von einem Auslasssystem (3) zu einem Einlasssystem (2) rückgeführt wird, dadurch gekennzeichnet, dass das Abgas zumindest in dem definierten Betriebspunkt mit einer Abgasrückführrate (RT_EGR) zwischen 0% und 15% rückgeführt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass das rückgeführte Abgas in einer Abgasrückführleitung (61) des Abgasrückführsystems (6) über ein in Strömungsrichtung öffnendes Reed-Ventil (62) geleitet wird.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Abgasturbine (72) des Abgasturboladers (7) mittels eines Waste-Gates oder einer variablen Turbinengeometrie geregelt wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass als Arbeitsmedium der Abwärmerückgewinnungseinrichtung (5) Cyclopentan verwendet wird.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Fremdzündung von einer Zündkerze ausgelöst wird.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschine einen über eine Übersetzungseinrichtung mit einem Getriebe in mechanischer Verbindung stehenden Turbocompound aufweist und die Rotationsgeschwindigkeit des Turbocompounds am besten Betriebspunkt des thermischen Wirkungsgrads im Bereich von 15000 – 22000 U/min liegt.
8. Wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschine (1), bei welcher der Wasserstoff während des Saugtrakts oder am Beginn des Kompressionstakts zugebracht wird und mittels Fremdzündung gezündet wird, mit zumindest einem Gaswechselventil, mit zumindest einem Kraftstoffinjektor, mit zumindest einem eine Abgasturbine (72) und einen Verdichter (71) aufweisenden Abgasturbolader (7), wobei vorzugsweise die Brennkraftmaschine (1) ein Abgasrückführsystem (6) mit zumindest einer Abgasrückführleitung (61) zwischen einem Einlasssystem (2) und einem Auslasssystem (3) aufweist, sowie mit einer nach einem organischen Rankine-Zyklus (ORC) arbeitenden Abwärmerückgewinnungseinrichtung (5) zur Rückgewinnung von Abgaswärme aus dem Abgassystem (3) und/oder dem Abgasrückführsystem (6), welche Abwärmerückgewinnungseinrichtung (5) einen Kreislauf für ein Arbeitsmedium mit zumindest einer Pumpe (56) , zumindest einem Verdampfer (510, 520), zumindest einen Expander (53) und zumindest einem Kondensator (54) aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass die Brennkraftmaschine (1) ausgebildet ist, um in zumindest einem definierten Betriebspunkt mit folgender Kombination von Parametern betrieben zu werden:

- Kompressionsverhältnis (CR) zwischen 11 und 13;
- Spitzenverbrennungsdruck (P_{MX}) von mindestens 140 bar, vorzugsweise zwischen 140 bar und 160 bar, entlang der Nennleistungskurve;
- Liefergrad (λ_l) von mindestens 90%;
- Drallzahl (R_s) im Zylinder zwischen 1 und 2, wobei eine Luftbewegung vorzugsweise um die Zylinderquerachse (Tumble) mit einer Tumblezahl zwischen 1 und 2 erfolgt;
- Durchflusskoeffizient (K_v) zumindest einer Gaswechselöffnung: mindestens 0,068;
- maximaler Einblasedruck des zumindest einen Kraftstoffinjektors: Für Direkteinspritzung wenigstens 10 bar und höchstens 60 bar oder für Mehrpunkteinspritzung wenigstens 5 bar und höchstens 13 bar im Saugrohr;
- spezifische Düsendurchflussrate des zumindest einen Kraftstoffinjektors für Direkteinspritzung so, dass diese für eine Einblasedauer von weniger als 90° Kurbelwinkel vorliegt oder für Mehrpunkteinspritzung so, dass maximal eine Einblasedauer von 240° Kurbelwinkel vorliegt;
- maximaler Abgasturbolader-Wirkungsgrad: mindestens 65%, vorzugsweise mindestens 70%;
- Zündzeitpunkt im besten Betriebspunkt des thermischen Wirkungsgrads so, dass der Verbrennungsschwerpunkt (MFB50%) bei etwa 6° bis 14°, vorzugsweise 8° bis 12°, Kurbelwinkel (KW) nach dem Totpunkt (ATDC) der Zündung liegt; und
- Aufladung für Direkteinspritzung so, dass ein Luftverhältnis von 1,8 – 2,3 im Bereich des maximalen Drehmoments sowie im Bereich der Nennleistung beträgt, oder Aufladung für Mehrpunkteinspritzung so, dass ein Luftverhältnis von 1,7 – 2,2 im Bereich der Nennleistung beträgt.

9. Wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschine (1) nach Anspruch 8, mit einem Abgasrückführsystem (6), vorzugsweise einem Hochdruck-

- Abgasrückführsystem, mit zumindest einer Abgasrückführleitung (61) zwischen einem Einlasssystem (2) und einem Auslasssystem (3), dadurch gekennzeichnet, dass das Abgas in dem definierten Betriebspunkt mit einer Abgasrückföhrtrate (RT_{EGR}) zwischen 0 und 15% rückföhrbar ist.
10. Wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschine (1) nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass in zumindest einer Abgasrückführleitung (61) des Abgasrückföhrsystems (6) ein in Strömungsrichtung des rückgeföhrten Abgases öffnendes Reed-Ventil (62) angeordnet ist.
 11. Wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschine (1) nach einem der Ansprüche 8 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Abgasturbine (72) des Abgasturboladers (7) ein Waste-Gate oder eine variable Turbinengeometrie aufweist.
 12. Wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschine (1) nach einem der Ansprüche 8 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass der maximale thermische Wirkungsgrad (BTE_1) der Brennkraftmaschine (1) bei einer Drehzahl (N) in einem Bereich zwischen 1020 U/min und 1200 U/min, vorzugsweise zwischen 1025 U/min und 1150 U/min, und bei einem Drehmoment (M) in einem Bereich zwischen 75% und 85% des Nenndrehmomentes (M_N) für diese Drehzahl (N) liegt, wobei vorzugsweise der relative Ladedruck des Abgasturboladers (7) zwischen 2,8 und 3,1 bar liegt.
 13. Wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschine (1) nach einem der Ansprüche 8 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass das Arbeitsmedium der Abwärmerückgewinnungseinrichtung (5) Cyclopentan ist.
 14. Wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschine (1) nach einem der Ansprüche 8 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass die wasserstoffbetriebene Brennkraftmaschine einen über eine

Übersetzungseinrichtung mit einem Getriebe in mechanischer Verbindung stehenden Turbocompound aufweist und die Rotationsgeschwindigkeit des Turbocompound am besten Betriebspunkt des thermischen Wirkungsgrads im Bereich von 15000 – 22000 U/min liegt.