

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
26. Januar 2017 (26.01.2017)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2017/012695 A1**

(51) Internationale Patentklassifikation:

F02P 17/12 (2006.01) H01T 13/58 (2011.01)  
F02D 35/02 (2006.01) F02D 41/22 (2006.01)  
F02D 41/00 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2016/001122

(22) Internationales Anmeldedatum:  
1. Juli 2016 (01.07.2016)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:  
10 2015 009 248.0 17. Juli 2015 (17.07.2015) DE

(71) Anmelder: MTU FRIEDRICHSHAFEN GMBH  
[DE/DE]; Maybachplatz 1, 88045 Friedrichshafen (DE).

(72) Erfinder: RAINDL, Markus; Bachstrasse 17/1, 88214 Ravensburg (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW,

BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

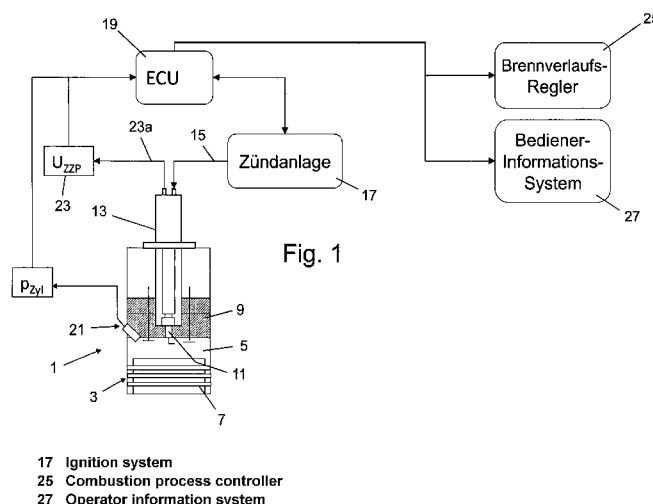
(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

(54) Title: METHOD FOR IMPLEMENTATION WITH THE OPERATION OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE

(54) Bezeichnung : VERFAHREN ZUR AUSFÜHRUNG MIT DEM BETRIEB EINER BRENNKRAFTMASCHINE



(57) Abstract: The invention relates to a method for implementation with the operation of an internal combustion engine (1), having an ignition plug (11), which is arranged on a combustion chamber (5) of a cylinder (3) of the internal combustion engine (1), wherein: in a first step, a cylinder pressure at the ignition time ( $p_{zyp}$ ) at the combustion chamber (5) is detected, as well as a breakdown voltage ( $U_{zyp}$ ) at the ignition plug (11); and in a second step, a current electrode distance (EA) of the ignition electrodes, representing a current ignition electrode wear state, is determined based on the detected cylinder pressure ( $p_{zyp}$ ), the detected breakdown voltage ( $U_{zyp}$ ) and a constant of proportionality (K).

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2017/012695 A1



---

Verfahren zur Ausführung mit dem Betrieb einer Brennkraftmaschine (1), welche eine Zündkerze (11) aufweist, welche an einem Brennraum (5) eines Zylinders (3) der Brennkraftmaschine (1) angeordnet ist, wobei: in einem ersten Schritt ein Zylinderdruck zum Zündzeitpunkt ( $p_{zzp}$ ) am Brennraum (5) sowie eine Durchbruchspannung ( $U_{zzp}$ ) an der Zündkerze (11) erfasst werden, - in einem zweiten Schritt ein aktueller Elektrodenabstand (EA) der Zündelektroden, welcher einen aktuellen Zündelektrodenverschleißzustand repräsentiert, basierend auf dem erfassten Zylinderdruck ( $p_{zzp}$ ), der erfassten Durchbruchspannung ( $U_{zzp}$ ) und einer Proportionalitätskonstante (K) ermittelt wird.

## BESCHREIBUNG

**5 Verfahren zur Ausführung mit dem Betrieb einer Brennkraftmaschine**

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Ausführung mit dem Betrieb einer Brennkraftmaschine gemäß Anspruch 1.

- 10 Zündkerzen in Verwendung mit Ottomotoren, insbesondere auch Gasmotoren, unterliegen erheblichen Schwankungen im Hinblick auf ihre Standzeit. So werden z.B. im drehzahl- und lastvariablen Motor zur Erfüllung von Transientzeiten niedrige verbrennungsbeschleunigende Verbrennungsluftverhältnisse gefahren, die zu hohen Brennraumtemperaturen sowie zu hohem Verschleiß an der Zündkerze durch den zusätzlichen Wärmestrom im Verschleißelement der
- 15 Zündkerze führen. Dieser erhöhte Verschleiß weist eine hohe Streuung hinsichtlich der Standzeitsicherheit auf, was in nachteiliger Weise zu einem unvorhergesehenen Ausfall führen kann.

Ausgehend hiervon liegt der vorliegenden Erfindung die Aufgabe zu Grunde, ein Verfahren anzugeben, basierend auf welchem ein Ausfall vorhergesagt werden kann.

- 20 Diese Aufgabe wird mit einem Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst.

Vorteilhafte Weiterbildungen und Ausführungsformen der Erfindung sind in den weiteren Ansprüchen angegeben.

- 25 Vorgeschlagen wird erfindungsgemäß ein Verfahren zur Ausführung mit dem Betrieb einer Brennkraftmaschine, welche eine Zündkerze aufweist, welche an einem Brennraum eines Zylinders der Brennkraftmaschine angeordnet ist. Bevorzugt ist die Brennkraftmaschine z.B. ein Gasmotor, allgemein bevorzugt ein Ottomotor, im Rahmen der vorliegenden Erfindung
- 30 insbesondere ein Großmotor, weiterhin insbesondere ein im Magerbetrieb laufender Großmotor, z.B. für ein Nutzfahrzeug wie ein Schiff, ein Sonderfahrzeug, z.B. auch für Industrieanwendungen.

Die Zündkerze ist bevorzugt eine Vorkammerzündkerze, welche - auf an sich bekannte Weise - ein Zündkerzengehäuse bzw. einen Zündkerzenkörper aufweisen kann, weiterhin eine Vorkammerkappe, welche - zusammen mit dem Zündkerzengehäuse - einen Vorkammerbrennraum der Zündkerze definiert, i.e. eine Vorkammer. Die Zündkerze weist eine (Zünd-)Elektrodenanordnung auf, insbesondere bevorzugt in dem Vorkammerbrennraum aufgenommen, deren Zündelektroden einen Abstand zueinander aufweisen, i.e. einen Elektrodenabstand (an der Funkenstrecke). Die Elektrodenanordnung umfasst insbesondere eine Mittelelektrode und wenigstens eine Masseelektrode, welche den Elektrodenabstand zu einander definieren (welcher mit dem Abbrand der Elektroden über die Lebensdauer der Zündkerze variiert, insbesondere zunimmt). Die an dem Brennraum angeordnete Zündkerze ist weiterhin zur Fremdzündung in den Brennraum eingetragenen Kraftstoffgemisches vorgesehen.

Bei dem vorgeschlagenen Verfahren, welches bevorzugt von einer übergeordneten Ablaufsteuerung der Brennkraftmaschine koordiniert wird, z.B. einer ECU (ECU: Electronic Control Unit; Zentrales Motorsteuergerät) oder allgemein einer Kontrolleinheit, wird in einem ersten Schritt (bei einem Zündvorgang) ein Zylinderdruck zum Zündzeitpunkt am Brennraum sowie eine Durchbruch(zünd)spannung an der Zündkerze erfasst bzw. ermittelt (als Zündzeitpunkt ist im Rahmen der Erfindung hierbei der Zeitpunkt des Auslösens des Zündfunkens an der Zündkerze bezeichnet).

Für die Zylinderdruckerfassung ist in diesem Zusammenhang ein Zylinderdrucksensor vorgesehen, während die Durchbruchspannung durch eine hierfür geeignete Vorrichtung erfasst werden kann. Eine solche Vorrichtung kann z.B. eine zeitlich hochauflösende Messanordnung umfassen, z.B. im Gigahertzbereich Messsignale liefernd, welche z.B. an einer Zündspannungsführung (zur Zündkerze) Spannungssignale zur Bereitstellung der Durchbruchspannungsinformation abgreift oder z.B. an einer Messleitung.

In einem zweiten Schritt des Verfahrens wird nunmehr ein aktueller Elektrodenabstand der Zündelektroden, welcher einen aktuellen Zündelektrodenverschleißzustand repräsentiert, basierend auf dem erfassten Zylinderdruck, der erfassten Durchbruchspannung und einer (Proportionalitäts-)Konstante ermittelt. Korrespondierend mit dem Paschengesetz kann hierzu die Gleichung 1) herangezogen werden, wonach gilt:

Gleichung 1): 
$$EA = \frac{U_{ZZP}}{p_{ZZP} K},$$

wobei mit „EA“ der (aktuelle) Elektrodenabstand, mit „ $U_{ZZP}$ “ die Durchbruchspannung (zum Zündzeitpunkt), mit „ $p_{ZZP}$ “ der Zylinderdruck (zum Zündzeitpunkt) und mit „K“ die Proportionalitätskonstante bezeichnet ist.

Basierend auf dem ermittelten aktuellen Elektrodenabstand wird vorteilhaft eine verlässliche Ausfallvorhersage im Hinblick auf die Zündkerze ermöglicht, d.h. der ermittelte Elektrodenabstand dient vorteilhaft als Verschleißindikator (da, wie bereits erwähnt, der Elektrodenabstand mit der Betriebsdauer der Zündkerze variiert, insbesondere über die Laufzeit der Zündkerze im Regelfall zunimmt, d.h. durch Abbrand (Abschmelzen) der Zündelektroden). Mit einer präzisen Vorhersage können in der Folge auch die sonst üblichen Sicherheitsaufschläge auf die Standzeit verringert werden, so dass die verschleißbedingten Kosten vorteilhaft verringert werden können.

Die im zweiten Schritt herangezogene Proportionalitätskonstante ist bevorzugt als systemindividuelle Größe an der Brennkraftmaschine ermittelt, insbesondere einmalig, und basiert insbesondere auf einem vorbekannten Elektrodenabstand der Zündkerze, weiterhin einem damit korrespondierend ermittelten Zylinderdruck zum Zündzeitpunkt sowie einer wiederum damit korrespondierend ermittelten Durchbruchsspannung der Zündkerze. Der vorbekannte Elektrodenabstand ist z.B. herstellenseitig definiert, z.B. jener Elektrodenabstand gemäß dem Auslieferungszustand der Zündkerze. Die Proportionalitätskonstante wird z.B. an einem Messaufbau aus Brennkraftmaschine, Zündspannungs- und Zylinderdruckmesstechnik ermittelt, wobei der Motor vorzugsweise in einen vorbestimmten Betriebspunkt gebracht wird. Mit dem bekannten Elektrodenabstand lässt sich die Proportionalitätskonstante bzw. Paschenkonstante sodann bestimmen zu:

Gleichung 2): 
$$K = \frac{U_{ZZP}}{p_{ZZP} EA_{bekannt}}$$

wobei mit „ $EA_{bekannt}$ “ der vorbekannte Elektrodenabstand, mit „ $U_{ZZP}$ “ die Durchbruchspannung (zum Zündzeitpunkt), mit „ $p_{ZZP}$ “ der Zylinderdruck (zum Zündzeitpunkt) und mit „K“ die Proportionalitätskonstante bezeichnet ist. Die Proportionalitätskonstante hängt z.B. vom Gasgemisch an der Funkenstrecke (Elektroden-spalt), der Austrittsarbeit der Elektronen, dem Elektrodenwerkstoff und weiteren Parametern ab, so dass die Proportionalitätskonstante im

Rahmen der Erfindung bevorzugt je systemindividuell (System aus Brennkraftmaschine und Zündkerze) ermittelt wird.

5 In bevorzugter Weiterbildung des Verfahrens wird in einem weiteren Schritt, welcher auf dem im zweiten Schritt ermittelten aktuellen Elektrodenabstand der Zündelektroden basiert, nunmehr eine Lebensdauer der Zündkerze ermittelt. Die ermittelte Lebensdauer kann hierbei eine verstrichene Lebensdauer sein, d.h. ein Alter, alternativ oder zusätzlich und bevorzugt eine Restlebensdauer. Für die Ermittlung der Lebensdauer kann eine Kennlinie herangezogen werden, mit welcher der ermittelte Elektrodenabstand korreliert wird. Das Lebensdauerende wird  
10 erreicht, wenn der maximale Elektrodenabstand erreicht ist, mithin der maximale Elektrodenverschleiß.

Der maximale Elektrodenabstand kann z.B. für die Zündkerze ermittelt werden zu:

15 Gleichung 3):  $EA_{max} = EA_{min} + d_{Verschleißkörper}$ ,

wobei mit „ $EA_{max}$ “ der maximale, das Lebensdauerende kennzeichnende Elektrodenabstand, mit „ $EA_{min}$ “ der anfängliche, den Lebensdauerbeginn kennzeichnende minimale Elektrodenabstand und mit „ $d_{Verschleißkörper}$ “ die Dicke des abbrandfähigen Elektrodenmaterials bezeichnet ist. Mit  
20 den bekannten Werten für  $EA_{max}$  und  $EA_{min}$  kann eine Lebensdauerkennlinie nunmehr auf einfache Weise generiert werden, z.B. empirisch ermittelt werden oder auch modellgestützt.

In Weiterbildung des Verfahrens kann ein Informationssignal basierend auf dem ermittelten aktuellen Elektrodenabstand oder der darauf basierend ermittelten Lebensdauer an einen  
25 Bediener ausgegeben werden, insbesondere veranlasst von der Kontrolleinheit, d.h. insbesondere mit dem Ziel, bedarfsgerecht einen Nutzereingriff zu veranlassen, z.B. einen Zündkerzenwechsel oder eine Zylinderabschaltung.

Weiterhin bevorzugt sind auch Weiterbildungen des Verfahrens dahingehend vorgesehen, dass  
30 basierend auf dem im zweiten Schritt ermittelten Elektrodenabstand in einem weiteren Schritt, z.B. und bevorzugt auch zusätzlich zu der Lebensdauerermittlung, wenigstens ein Verbrennungsparameter der Brennkraftmaschine eingestellt bzw. dem aktuellen Elektrodenabstand nachgeführt wird, insbesondere ein Verbrennungsluftverhältnis ( $\lambda$ ). Durch Nachführung eines oder mehrerer Verbrennungsparameter in Abhängigkeit des ermittelten Elektrodenabstands,

mithin des Zündkerzenalters, kann der alterungsbedingte Einfluss der Zündkerze auf die Verbrennung nunmehr vorteilhaft - durch die Motorregelung - kompensiert werden, in der Folge auch eine verbesserte Einhaltung von Emissionsgrenzwerten erzielt werden. Z.B. kann nunmehr auch die Zündenergie bedarfsgerechter an der Zündkerze bereitgestellt werden (z.B. via ECU (und Zündanlage)), eine Brenndauer oder Einblasedauer verstellt (Brenndauer- bzw. Brennverlaufsregler) oder weitere Parameter in Abhängigkeit des ermittelten Elektrodenabstands verbrennungsgünstig eingestellt werden.

Für eine derartige Parameterbeeinflussung kann mit dem Verfahren eine Kennlinie oder ein Modell verwendet werden, welche bzw. welches den ermittelten Elektrodenabstand mit einem Verbrennungsparameter, insbesondere mit einem Umsatzpunkt, einem Verbrennungsluftverhältnis, einer Einblasedauer oder einem davon verschiedenen Parameter in Beziehung setzt, d.h. zu verbrennungsoptimierenden Korrekturzwecken.

Mit der Erfindung ist insbesondere vorgesehen, dass das Verfahren iterativ und kontinuierlich durchgeführt wird, mithin der Abstand der Zündelektroden kontinuierlich ermittelt bzw. überwacht wird. Einhergehend damit wird auch eine kontinuierliche, elektrodenabstandsabhängige Beeinflussung der Verbrennung - wie oben erörtert - vorgesehen, daneben z.B. auch eine kontinuierliche Lebensdauerermittlung und -signalgebung.

Mit dem Verfahren wird vorteilhaft auch die Möglichkeit eröffnet, eine jeweilige Zündkerze auf ihre Originalität bzw. Verwendbarkeit mit der Brennkraftmaschine zu prüfen. Hierzu kann das Verfahren mit einer ungebrauchten Zündkerze (und bekannter, systemindividueller Proportionalitätskonstante) durchgeführt werden, wobei der ermittelte Elektrodenabstand mit einem Neuzustands-Soll-Elektrodenabstand verglichen wird. Entspricht der ermittelte Elektrodenabstand nicht dem Soll-Abstand, kann erkannt werden, dass eine andere als eine originale oder die zur Verwendung mit der Brennkraftmaschine vorgesehene Zündkerze am Brennraum angeordnet wurde, z.B. auch via geeigneter Signalgebung an einen Nutzer signalisiert werden.

Im Rahmen der vorliegenden Erfindung wird auch eine Brennkraftmaschine vorgeschlagen, welche zur Durchführung des wie vorstehend erörterten Verfahrens eingerichtet ist. Hierzu kann die Brennkraftmaschine insbesondere einen Zylinder mit einem Brennraum aufweisen, eine am Brennraum angeordnete Zündkerze, einen Zylinderdrucksensor sowie eine Vorrichtung zur Erfassung der Durchbruchspannung an der Zündkerze (Abgriff z.B. an der Zündleitung),

daneben weiterhin bevorzugt eine Ablaufsteuerung oder Kontrolleinheit zur Steuerung des Verfahrens, insbesondere in Form der ECU. In dieser und/oder einem Datenträger kann weiterhin Programmcode zur Durchführung des Verfahrens implementiert sein, zum Beispiel auch mit dem Verfahren verwendbare Kennlinien oder Modelle.

5

Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen der Erfindung, anhand der Figuren der Zeichnungen, die erfindungswesentliche Einzelheiten zeigen, und aus den Ansprüchen. Die einzelnen Merkmale können je einzeln für sich oder zu mehreren in verschiedener Kombination bei einer Variante der Erfindung

10 verwirklicht sein.

Bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung werden nachfolgend anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

15 Fig. 1 exemplarisch und schematisch stark vereinfacht eine Brennkraftmaschine, welche zur Durchführung des Verfahrens eingerichtet ist.

Fig. 2 exemplarisch und schematisch eine Kennlinie zur Ermittlung der Lebensdauer der Zündkerze.

20

In der nachfolgenden Beschreibung und den Zeichnungen entsprechen gleichen Bezugszeichen Elemente gleicher oder vergleichbarer Funktion.

**Fig. 1** zeigt exemplarisch und schematisch, insbesondere stark vereinfacht, eine Brennkraftmaschine 1, mit deren Betrieb das erfindungsgemäße Verfahren ausführbar ist. Die Brennkraftmaschine 1, bereitgestellt als (magerbetriebener) Gasmotor mit Brenngaseinblasung, z.B. von Brenngas in Form von Erdgas, Biogas, Sondergas, Deponiegas, Wasserstoff, weist einen Zylinder 3 auf, in welchem ein Brennraum 5 definiert ist, d.h. zwischen einem Hubkolben 7 und einem Brennraumdeck 9. Am Brennraum 5, insbesondere an dem Zylinderkopf bzw. Brennraumdeck 9 des Zylinders 3, angeordnet und insoweit in den Brennraum 5 ragend ist eine

30 Zündkerze 11 zur Zündung des Brenngas-Luft- Gemisches.

Die Zündkerze 11 ist als Vorkammerzündkerze bereitgestellt und über einen Kerzenstecker 13 samt Zündleitung 15 mit einer Zündanlage 17 der Brennkraftmaschine 1 verbunden, welche

Zündsignale von einer übergeordneten Kontrolleinheit 19 erhält, das heißt von einer Motorsteuerung bzw. ECU. In Abhängigkeit der Ansteuerung der Zündanlage durch die ECU 19 wird die Zündkerze 11 mit Zündspannung durch die Zündanlage 17 versorgt, so dass Zündfunken zwischen den Elektroden (nicht dargestellt) der Zündkerze 11 generiert werden.

5 Maßgeblich für die notwendige Zündenergie zur Erzeugung eines Zündfunkens ist hierbei der aktuelle Elektrodenabstand EA der Zündelektroden, welche eine Mitten- und eine Massenelektrode umfassen, d.h. zur Ausbildung der Funkenstrecke.

Wie Fig. 1 weiter veranschaulicht, ist in Wirkverbindung mit dem Brennraum 5 ferner ein Zylinderdrucksensor 21 am Brennraum 5 angeordnet, welcher Brennraumdruckinformation  $p_{\text{Zyl}}$  an die Motorsteuerung 19 liefert. Zur Erfassung einer Durchbruchspannung an der Zündkerze 11 ist weiterhin eine Messvorrichtung 23 vorgesehen, welche die Durchbruchspannungsinformation ebenfalls an die Motorsteuerung 19 bereitstellt. Zur Erfassung der Durchbruchspannung ist die insbesondere hochfrequentauflösende Mess- bzw. Abtastvorrichtung 23, welche im GHz-Bereich abtastet, über eine Messleitung 23a an die Zündkerze 11 gekoppelt.

In Wirkverbindung mit der Motorsteuerung 19 und durch diese kontrolliert steht weiterhin ein Brennverlaufs- bzw. Brenndauerregler 25, über welchen der Brennverlauf geregelt wird und welcher durch Sollvorgaben seitens der Motorsteuerung 19 beeinflussbar ist.

20 Ein Nutzerinterface 27 in Form eines Bediener-Informationssystems ist weiterhin an der Brennkraftmaschine 1 bereitgestellt, welches seitens der Motorsteuereinheit 19 signalgebend ansteuerbar ist. Das Nutzerinterface 27 kann mit der Brennkraftmaschine 1 fest verbunden sein, alternativ oder zusätzlich ein abgesetztes Interfacemodul vorsehen, zum Beispiel in Form eines Tablet-PCs oder Smartphones. Über das Nutzerinterface 27 können Informationen vorzugsweise visualisiert oder auch akustisch dargestellt werden.

Die übergeordnete Kontrolleinheit 19 weist im Rahmen der vorliegenden Erfindung Programmcode auf, daneben sind Kennlinien abgespeichert, insbesondere abgelegt in einem nichtflüchtigen Speicher, welche die Motorsteuerung 19 zur Ablaufsteuerung des erfindungsgemäßen Verfahrens befähigen, welches nachfolgend näher beschrieben ist.

Im Rahmen des vorgeschlagenen Verfahrens wird für dessen Durchführung zunächst eine (Proportionalitäts-)Konstante bzw. Paschenkonstante K als systemindividuelle Größe an der

Brennkraftmaschine ermittelt, das heißt im Rahmen eines Messaufbaus und unter Hinzuziehung der eingangs erwähnten Gleichung 2), wonach gilt:

Gleichung 2): 
$$K = \frac{U_{ZZP}}{p_{ZZP} EA_{bekannt}}$$

5

und worin „K“ die Proportionalitätskonstante, „ $U_{ZZP}$ “ die Durchbruchspannung (zum Zündzeitpunkt), „ $EA_{bekannt}$ “ einen vorbekannten Elektrodenabstand (an der Funkenstrecke) und „ $p_{ZZP}$ “ den Zylinderdruck zum Zündzeitpunkt bezeichnen.

10 Der vorbekannte Elektrodenabstand  $EA_{bekannt}$  ist hierbei ein Elektrodenabstand einer neuen Zündkerze bzw. der Zündkerze 11 im Neuzustand, wie dieser herstellerseitig vorgegeben ist und wie diese zur einmaligen bzw. anfänglichen Ermittlung der Proportionalitätskonstante K genutzt wird. Die weiteren Größen „ $U_{ZZP}$ “ und „ $p_{ZZP}$ “ werden messtechnisch unter Verwendung der neuen Zündkerze 11 ermittelt, das heißt mittels des Zylinderdrucksensors 21 und der  
15 Vorrichtung 23 zur Messung der Durchbruchspannung. Rechnerisch wird daraus nun die Proportionalitätskonstante K für das mit der Brennkraftmaschine 1 ausführbare erfindungsgemäße Verfahren bestimmt, insbesondere in der verfahrenssteuernden Kontrolleinheit 19 abgelegt.

20 Bei dem Verfahren wird - insbesondere kontinuierlich mit dem Betrieb der Brennkraftmaschine 1 - in einem ersten Schritt ein Zylinderdruck zum Zündzeitpunkt ( $p_{ZZP}$ ) am Brennraum 5 sowie eine Durchbruchspannung ( $U_{ZZP}$ ) an der Zündkerze 11 erfasst. Hierzu liefern der Zylinderdrucksensor 21 sowie die Vorrichtung 23 zur Durchbruchspannungsermittlung je (kontinuierlich) geeignete Messsignale an die ECU bzw. die übergeordnete Kontrolleinheit 19.

25

In einem zweiten Schritt - insbesondere wiederum kontinuierlich mit dem Betrieb der Brennkraftmaschine 1 - wird nunmehr der aktuelle Elektrodenabstand EA der Zündelektroden (an der Funkenstrecke), welcher einen aktuellen Zündelektrodenverschleißzustand repräsentiert, basierend auf dem im ersten Schritt erfassten Zylinderdruck  $p_{ZZP}$ , der erfassten Durchbruchspannung  $U_{ZZP}$  und der - wie oben beschrieben ermittelten - Proportionalitätskonstante K  
30 ermittelt, d.h. durch die ECU 19. Zur Ermittlung dient insbesondere eingangs erwähnte Gleichung 1), wonach gilt:

Gleichung 1): 
$$EA = \frac{U_{ZZP}}{p_{ZZP}K},$$

wobei mit „EA“ der (aktuelle) Elektrodenabstand, mit „ $U_{ZZP}$ “ die Durchbruchspannung (zum Zündzeitpunkt), mit „ $p_{ZZP}$ “ der Zylinderdruck (zum Zündzeitpunkt) und mit „K“ die Proportionalitätskonstante bezeichnet ist.

Aus der Gleichung 1) ist mit kontinuierlicher Durchführung des Verfahrens somit fortwährend der aktuelle Elektrodenabstand EA bekannt, welcher im Rahmen der Erfindung bevorzugt weiterhin zur Lebensdauerermittlung herangezogen wird, d.h. in einem weiteren Schritt.

10

**Fig. 2** zeigt exemplarisch eine Kennlinie für die Zündkerze 11, wie sie für die Lebensdauerermittlung Verwendung finden kann, z.B. empirisch ermittelt. In der Kennlinie, welche bevorzugt ebenfalls in der ECU 19 hinterlegt ist, ist der Elektrodenabstand EA über den Betriebsstunden  $B_h$ , mithin der Lebensdauer angetragen, wobei der minimale (vorbekannte) Elektrodenabstand jenem bei null Betriebsstunden entspricht ( $EA(0B_h)$ ), der maximale Elektrodenabstand jenem zum Standzeitende ( $EA_{max}$ ), das heißt dem maximal möglichen Elektrodenabstand (mit maximal möglichem Elektrodenabbrand). Der maximal mögliche Elektrodenabstand  $EA_{max}$  kann ermittelt werden basierend auf der eingangs erwähnten Gleichung 3) gemäß:

20

Gleichung 3): 
$$EA_{max} = EA_{min} + d_{Verschleißkörper}$$

wobei mit „ $EA_{max}$ “ der maximale, das Lebensdauerende kennzeichnende Elektrodenabstand bezeichnet ist, mit „ $EA_{min}$ “ der anfängliche, den Lebensdauerbeginn kennzeichnende minimale Elektrodenabstand und mit „ $d_{Verschleißkörper}$ “ die Dicke des abbrandfähigen Elektrodenmaterials.

25

Zur Lebensdauerermittlung, bevorzugt der Restlebensdauer der Zündkerze 11, wird der aktuelle ermittelte Elektrodenabstand EA mit der Kennlinie korreliert. Der (durch Differenzbildung) somit ermittelbare Abstand der aktuell erreichten Betriebsstunden (korrespondierend mit dem aktuellen Elektrodenabstand) vom Lebensdauerende (korrespondierend mit dem maximalen Elektrodenabstand) indiziert nunmehr die Restlebensdauer, welche von der ECU 19 über das Nutzerinterface 27 signalisiert wird, d.h. mit einem Informationssignal. In der Folge wird nunmehr ein Zündkerzentausch vorteilhaft bedarfsgerecht möglich.

30

Insbesondere parallel zu der Lebensdauerermittlung und Signalisierung wird bei dem erfindungsgemäßen Verfahren in einem Schritt nach dem zweiten Schritt - insbesondere wiederum kontinuierlich mit dem Betrieb der Brennkraftmaschine - ein Verbrennungsparameter  
5 der Brennkraftmaschine 1 basierend auf dem im zweiten Schritt ermittelten Elektrodenabstand eingestellt, insbesondere ein Verbrennungsluftverhältnis.

Der Einstellung liegt die Erkenntnis zu Grunde, dass der Elektrodenabstand EA die Brenngeschwindigkeit bzw. die Strömungsgeschwindigkeit im Brennraum 5 - bei ansonsten unveränderten Voraussetzungen - maßgeblich bestimmt. Zum Beispiel würde bei relativ kleinem  
10 Elektrodenabstand EA, zum Beispiel bei Neuzustand der Zündkerze 11, die Verbrennung nur langsam initiiert, insbesondere als nur ein kleiner Zündfunken an der Funkenstrecke zwischen den Elektroden überspringt. In der Folge würde die gesamte Verbrennung langsam ablaufen, da das Druckgefälle zwischen Vorkammer und Brennraum 5 unvorteilhaft ist, mithin nur geringe  
15 Zündstrahleindringtiefe in den Brennraum 5 erzielt wird, die Verbrennung im Brennraum 5 in der Folge verschleppt wird.

Mit der Erfindung ist es nunmehr vorgesehen, dass Verbrennungsluftverhältnis  $\lambda$  an den aktuellen Elektrodenabstand EA anzupassen, so dass für einen wie vorstehend geschilderten  
20 Kerzenzustand zum Beispiel eine erhöhte Menge an Brenngas in den Brennraum 5 eingeblasen wird, das heißt an der (im Magerbetrieb laufenden) Brennkraftmaschine 1 wird ein angefettetes Gemisch eingestellt, so dass die Brenngeschwindigkeit erhöht wird, mithin sich eine schnellere Verbrennung bei niedrigerer Abgastemperatur und verbesserten Emissionswerten erzielen lässt.

Wird der Elektrodenabstand EA größer (verschleißbedingt), kann die Anfettung korrespondierend zurückgenommen werden, z.B. die Einblasedauer verkürzt werden, so dass mit der Erfindung stets optimierte Verbrennungs- und Emissionsbedingungen vorteilhaft einfach  
25 erzielbar sind. Mit anderen Worten wird vorgesehen, den Brennverlauf in Abhängigkeit des aktuellen, ermittelten Elektrodenabstands EA zu beeinflussen, d.h. durch Einstellung wenigstens  
30 eines Brennparameters. Hierzu werden geeignete Steuersignale an den Brennverlaufs- bzw. Brenndauerregler 25 übermittelt, d.h. seitens der ECU 19.

Abschließend sei noch erwähnt, dass mit der Erfindung auch Perlenbildung an der Zündkerze 11 erkannt werden kann, welche Begrifflichkeit die Bildung kleinster Kügelchen an der Oberfläche

der Elektroden bezeichnet, die von wenigen Mikrometern bis z.B. 100  $\mu\text{m}$  anwachsen können. Diese Perlen entstehen beim Aufschmelzen der Elektrode und erstarren nachdem der Funken gelöscht ist. Ab einer bestimmten Größe können die Perlen als Oberfläche für weitere Perlen dienen, so dass eine Art Stalagmit entsteht, der den Elektrodenabstand EA so verringern kann,  
5 dass das Funkenvolumen für eine Gemischentzündung zu gering wird, mithin eine Gemischentzündung nicht mehr stattfinden kann.

Mit dem Verfahren bzw. dem aktuell ermittelten Elektrodenabstand EA wird vorteilhaft auch eine Zündenergieregulierung möglich, bei welcher die der Zündkerze 11 zugeführte Zündenergie in  
10 Abhängigkeit des ermittelten, aktuellen Elektrodenabstands EA an die Zündkerze 11 zugeführt wird, d.h. vorteilhaft bedarfsgerecht (so dass Perlenbildung aufgrund zu hoher Temperatur zum Beispiel vorteilhaft vermieden werden kann).

Ein solches Verfahren zur Regelung der Zündenergie ist z.B. aus der Druckschrift DE 10 2013  
15 010 685 A1 bekannt, deren Offenbarungsgehalt hierin durch Bezugnahme eingeschlossen wird.

## ANSPRÜCHE

1. Verfahren zur Ausführung mit dem Betrieb einer Brennkraftmaschine (1), welche eine Zündkerze (11) aufweist, welche an einem Brennraum (5) eines Zylinders (3) der Brennkraftmaschine (1) angeordnet ist, wobei:
  - in einem ersten Schritt ein Zylinderdruck zum Zündzeitpunkt ( $p_{ZZP}$ ) am Brennraum (5) sowie eine Durchbruchspannung ( $U_{ZZP}$ ) an der Zündkerze (11) erfasst werden,
  - in einem zweiten Schritt ein aktueller Elektrodenabstand (EA) der Zündelektroden, welcher einen aktuellen Zündelektrodenverschleißzustand repräsentiert, basierend auf dem erfassten Zylinderdruck ( $p_{ZZP}$ ), der erfassten Durchbruchspannung ( $U_{ZZP}$ ) und einer Proportionalitätskonstante (K) ermittelt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1,  
**dadurch gekennzeichnet, dass**
  - basierend auf dem im zweiten Schritt ermittelten, aktuellen Elektrodenabstand (EA) der Zündelektroden in einem weiteren Schritt eine Lebensdauer der Zündkerze (11) ermittelt wird.
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet, dass**
  - basierend auf dem im zweiten Schritt ermittelten, aktuellen Elektrodenabstand (EA) in einem weiteren Schritt ein Verbrennungsparameter der Brennkraftmaschine (1) eingestellt wird, insbesondere ein Verbrennungsluftverhältnis ( $\lambda$ ).
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet, dass**
  - das Verfahren iterativ durchgeführt wird.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet, dass**
  - die Proportionalitätskonstante (K) basierend auf einem vorbekannten Elektrodenabstand ( $EA_{\text{bekannt}}$ ), einem Zylinderdruck zum Zündzeitpunkt ( $p_{ZZP}$ ) sowie einer Durchbruchspannung ( $U_{ZZP}$ ) der Zündkerze (11) als systemindividuelle Größe an der Brennkraftmaschine (1) ermittelt ist.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet, dass**
- 5 - das Verfahren mit einer ungebrauchten Zündkerze (11) durchgeführt wird, wobei der ermittelte aktuelle Elektrodenabstand (EA) mit einem Neuzustands-Soll-Elektrodenabstand verglichen wird.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
10 **dadurch gekennzeichnet, dass**
- basierend auf dem ermittelten Elektrodenabstand (EA) ein Informationssignal für einen Bediener an der Brennkraftmaschine (1) ausgegeben wird.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
15 **dadurch gekennzeichnet, dass**
- mit dem Verfahren eine Kennlinie verwendet wird, welche den ermittelten, aktuellen Elektrodenabstand (EA) mit einer Lebensdauer in Beziehung setzt; und/oder
- mit dem Verfahren eine Kennlinie verwendet wird, welche den ermittelten, aktuellen Elektrodenabstand (EA) mit einem Verbrennungsparameter, insbesondere mit einem  
20 Umsatzpunkt oder einem Verbrennungsluftverhältnis ( $\lambda$ ), in Beziehung setzt.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet, dass**
- die Zündkerze (11) eine Vorkammerzündkerze ist; und/oder  
25 - die Brennkraftmaschine (1) ein Gasmotor ist.
10. Brennkraftmaschine (1), aufweisend einen Zylinder (3) mit einem Brennraum (5), eine am Brennraum (5) angeordnete Zündkerze (11), einen Zylinderdrucksensor (21) sowie eine Vorrichtung (23) zur Erfassung der Durchbruchspannung an der Zündkerze (11),  
30 **dadurch gekennzeichnet, dass**
- die Brennkraftmaschine (1) zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche eingerichtet ist.

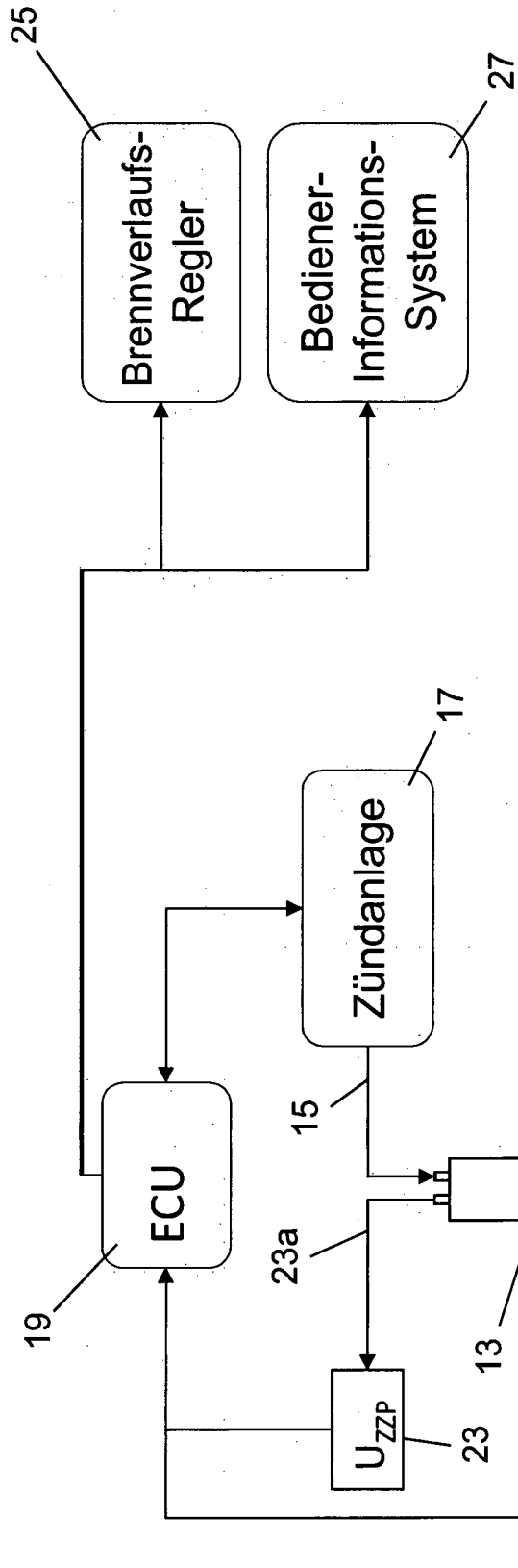


Fig. 1

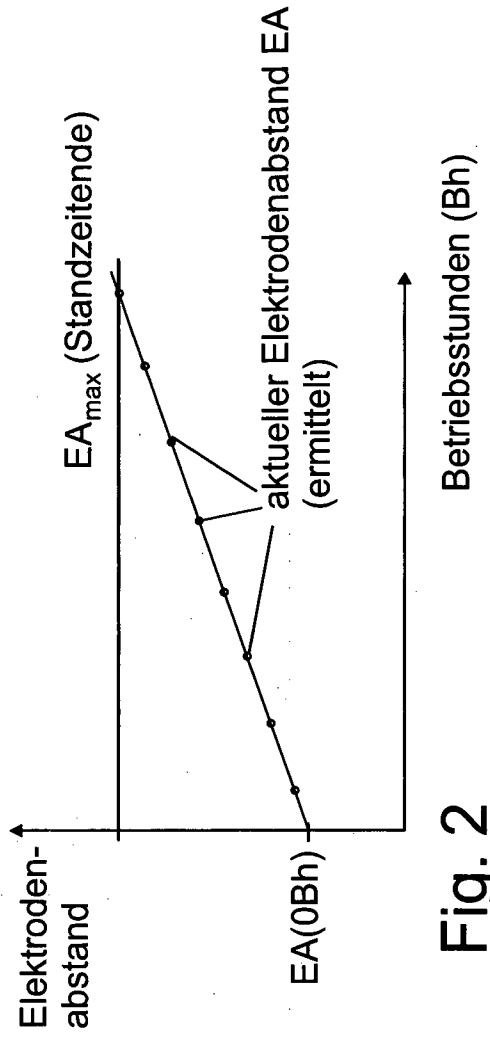


Fig. 2

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No  
PCT/EP2016/001122

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**  
 INV. F02P17/12 F02D35/02 F02D41/00 H01T13/58  
 ADD. F02D41/22

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

**B. FIELDS SEARCHED**  
 Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)  
 F02P F02D H01T

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)  
 EPO-Internal, WPI Data

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP 2008 101585 A (TOYOTA MOTOR CORP) 1 May 2008 (2008-05-01)	1,3-5, 8-10
Y	abstract; figures 3,4,6-8 paragraphs [0023] - [0027] paragraphs [0060] - [0069] -----	2,6,7
Y	JP H10 189213 A (TOKYO GAS CO LTD) 21 July 1998 (1998-07-21) abstract; figure 2 -----	2,7
X	DE 197 56 336 C1 (DAIMLER BENZ AG [DE]) 1 April 1999 (1999-04-01)	1,10
Y	column 5, line 28 -----	6
A	DE 10 2013 010685 A1 (MTU FRIEDRICHSHAFEN GMBH [DE]) 31 December 2014 (2014-12-31) cited in the application paragraphs [0006], [0041] -----	1-10

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

\* Special categories of cited documents :

- "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
- "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
- "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search  <p align="center">7 September 2016</p>	Date of mailing of the international search report  <p align="center">16/09/2016</p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------

Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer  <p align="center">Röttger, Klaus</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2016/001122

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
JP 2008101585 A	01-05-2008	NONE	
JP H10189213 A	21-07-1998	NONE	
DE 19756336 C1	01-04-1999	NONE	
DE 102013010685 A1	31-12-2014	DE 102013010685 A1 WO 2014206541 A1	31-12-2014 31-12-2014

**INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT**

Internationales Aktenzeichen  
PCT/EP2016/001122

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES  
 INV. F02P17/12 F02D35/02 F02D41/00 H01T13/58  
 ADD. F02D41/22

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTER GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)  
 F02P F02D H01T

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)  
 EPO-Internal, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	JP 2008 101585 A (TOYOTA MOTOR CORP) 1. Mai 2008 (2008-05-01)	1,3-5, 8-10
Y	Zusammenfassung; Abbildungen 3,4,6-8 Absätze [0023] - [0027] Absätze [0060] - [0069]	2,6,7
Y	JP H10 189213 A (TOKYO GAS CO LTD) 21. Juli 1998 (1998-07-21) Zusammenfassung; Abbildung 2	2,7
X	DE 197 56 336 C1 (DAIMLER BENZ AG [DE]) 1. April 1999 (1999-04-01)	1,10
Y	Spalte 5, Zeile 28	6
A	DE 10 2013 010685 A1 (MTU FRIEDRICHSHAFEN GMBH [DE]) 31. Dezember 2014 (2014-12-31) in der Anmeldung erwähnt Absätze [0006], [0041]	1-10

Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen  Siehe Anhang Patentfamilie

\* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absenddatum des internationalen Recherchenberichts
7. September 2016	16/09/2016

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Bevollmächtigter Bediensteter  Röttger, Klaus
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------

**INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT**

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2016/001122

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
JP 2008101585 A	01-05-2008	KEINE	
JP H10189213 A	21-07-1998	KEINE	
DE 19756336 C1	01-04-1999	KEINE	
DE 102013010685 A1	31-12-2014	DE 102013010685 A1 WO 2014206541 A1	31-12-2014 31-12-2014