

(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
5. Oktober 2017 (05.10.2017)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2017/167561 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

F02D 41/24 (2006.01) F02D 41/30 (2006.01)
F02D 41/26 (2006.01) F02D 41/14 (2006.01)
F02D 41/40 (2006.01) F02D 41/00 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2017/055515

(22) Internationales Anmeldedatum:
9. März 2017 (09.03.2017)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2016 205 241.1 30. März 2016 (30.03.2016) DE

(71) Anmelder: **ROBERT BOSCH GMBH** [DE/DE];
Postfach 30 02 20, 70442 Stuttgart (DE).

(72) Erfinder: **FISCHER, Wolfgang**; Stoeckachstr. 6, 70839 Gerlingen (DE). **BITZER, Matthias**; Schoenauer Str. 12a, 70569 Stuttgart (DE). **GRODDE, Stefan**; Thomas-Mann-Str. 78, 70469 Stuttgart (DE). **KOTMAN, Philipp**; Pforzheimer Str. 371 B, 70499 Stuttgart (DE). **MAKOWICKI, Thomas**; Rotdomweg 21, 08060 Zwickau (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, RW, CZ, DE, DJ, 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, KH, KN, KP, KR, KW, 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.

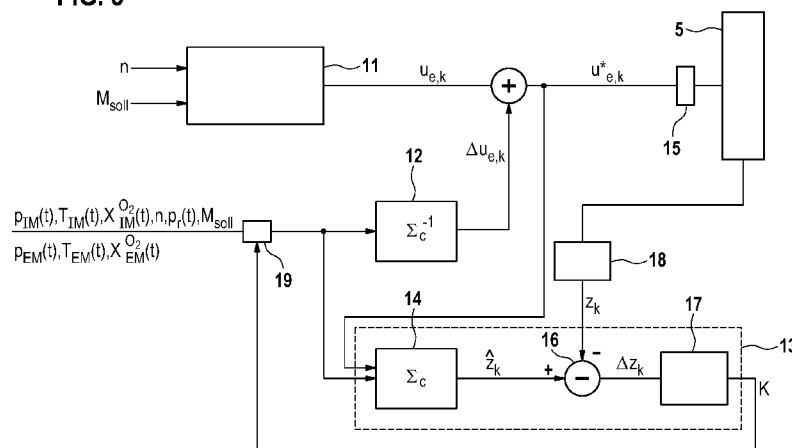
(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, 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).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR OPERATING AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE WITH A VARIABLE INJECTION PROFILE

(54) Bezeichnung : VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUM BETREIBEN EINES VERBRENNUNGSMOTORS MIT EINEM VARIABLEN EINSPRITZPROFIL

FIG. 3



(57) Abstract: The invention relates to a method for operating an internal combustion engine (1) through specification of an injection profile which is defined by adapted injection parameters ($u_{e,k}^*$), having the following steps: – determining steady-state injection parameters ($u_{e,k}$) on the basis of a predefined steady-state injection profile characteristic map; – determining corrective injection parameters ($\Delta u_{e,k}$) on the basis of a predefined corrective injection parameter model, which provides corrective injection parameters ($\Delta u_{e,k}$) as a function of one or more state variables of an air supply system (3) and/or exhaust-gas discharge system (4) of the internal combustion engine (1); – applying the corrective injection parameters ($\Delta u_{e,k}$) to the steady-state injection parameters ($u_{e,k}$) in order to obtain the adapted injection parameters ($u_{e,k}^*$).

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2017/167561 A1

**Veröffentlicht:**

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben eines Verbrennungsmotors (1) durch Vorgabe eines Einspritzprofils, das durch angepasste Einspritzparameter ($u_{e,k}^*$) definiert ist, mit folgenden Schritten: - Ermitteln von stationären Einspritzparametern ($u_{e,k}$) anhand eines vorgegebenen Stationär-Einspritzprofilkennfelds; - Ermitteln von Korrektur-Einspritzparametern ($\Delta u_{e,k}$) anhand eines vorgegebenen Korrektur-Einspritzparametermodells, das Korrektur-Einspritzparameter ($\Delta u_{e,k}$) abhängig von einer oder mehreren Zustandsgrößen eines Luftzuführungssystems (3) und/oder Abgasabführungssystem (4) des Verbrennungsmotors (1) bereitstellt; - Beaufschlagen der stationären Einspritzparameter ($u_{e,k}$) mit den Korrektur-Einspritzparametern ($\Delta u_{e,k}$), um die angepassten Einspritzparameter ($u_{e,k}^*$) zu erhalten.

Beschreibung

Titel

Verfahren und Vorrichtung zum Betreiben eines Verbrennungsmotors mit einem variablen Einspritzprofil

Technisches Gebiet

Die Erfindung betrifft Verbrennungsmotoren, insbesondere Verbrennungsmotoren, bei denen Kraftstoff gemäß einem vorgegebenen Einspritzprofil mit einer oder mehreren Voreinspritzungen und einer oder mehreren Haupteinspritzungen betrieben werden kann. Insbesondere betrifft die vorliegende Erfindung Maßnahmen zum Anpassen des Einspritzprofils im transienten Motorbetrieb.

Technischer Hintergrund

Die Einspritzung von Kraftstoff in den Zylinder eines Verbrennungsmotors kann in einer oder mehreren Vor- und einer oder mehreren Haupteinspritzungen entsprechend eines vorgebbaren Einspritzprofils vorgenommen werden. Das Einspritzprofil kann durch Kennfelder in Abhängigkeit von z.B. der aktuellen Motordrehzahl und der angeforderten Last des Verbrennungsmotors vorgegeben werden.

Im dynamischen Motorbetrieb folgen die Zustandsgrößen des Luftsystems des Verbrennungsmotors in der Regel nur verzögert den entsprechenden Sollwerten der Luftsystemregelung. Da das Einspritzprofil in der Regel unmittelbar abhängig von der angeforderten Last des Verbrennungsmotors verändert wird, ist das Einspritzprofil somit nicht ideal an die sich verzögert ändernden Luftsystembedingungen und die daraus resultierende Zylinderfüllung angepasst. Dies kann zu erhöhten Schadstoffemissionen führen.

Offenbarung der Erfindung

Erfindungsgemäß sind ein Verfahren zum Betreiben eines Verbrennungsmotors mit mindestens einer Vor- und mindestens einer Haupteinspritzung von Kraftstoff während eines Verbrennungstaktes gemäß Anspruch 1 sowie eine Vorrichtung und ein Motorsystem gemäß den nebengeordneten Ansprüchen vorgesehen.

Weitere Ausgestaltungen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

Gemäß einem ersten Aspekt ist ein Verfahren zum Betreiben eines Verbrennungsmotors durch Vorgabe eines Einspritzprofils vorgesehen, das durch angepasste Einspritzparameter definiert ist. Das Verfahren umfasst die folgenden Schritte:

- Ermitteln von stationären Einspritzparametern anhand eines vorgegebenen Stationär-Einspritzprofilkennfelds;
- Ermitteln von Korrektur-Einspritzparametern anhand eines vorgegebenen Korrektur-Einspritzparametermodells, das Korrektur-Einspritzparameter abhängig von einer oder mehreren Zustandsgrößen eines Luftzuführungssystems des Verbrennungsmotors bereitstellt;
- Beaufschlagen der stationären Einspritzparameter mit den Korrektur-Einspritzparametern, um die angepassten Einspritzparameter zu erhalten.

Die Anpassung des Einspritzprofils für den Betrieb eines Verbrennungsmotors in Abhängigkeit von den sich ändernden Zustandsgrößen des Luftsystems im dynamischen Betrieb wird in der Regel nicht oder nur für einzelne Einspritzparameter eines Einspritzprofils durchgeführt. Eine Idee des obigen Verfahrens besteht darin, das Verhalten des Verbrennungsmotors in dynamischen Betriebssituationen durch Vorgabe von angepassten Einspritzparametern zu verbessern, wobei inhärent beachtet wird, dass das vom Verbrennungsmotor generierte Moment oder der indizierte Mitteldruck oder das durch die Verbrennung generierte „innere“ Motormoment jeweils unverändert bleibt.

Insgesamt sieht das obige Verfahren vor, den Verbrennungsprozess während eines Arbeitstaktes des Verbrennungsmotors (Gaswechsel, Kompression und Ver-

brennung) zu modellieren, abhängig von den mit dem Modell vorhergesagten Motorausgangsgrößen (Emissionen, generiertes Motormoment, ...) eine Korrektur eines oder mehrerer der Einspritzparameter des Einspritzprofils zu bestimmen und das im stationären Betriebszustand zugeordnete Einspritzprofil entsprechend der Korrektur anzupassen. Dadurch kann auch im dynamischen Betrieb des Verbrennungsmotors der Einfluss der Trägheit des Luftsystems auf die Verbrennung berücksichtigt werden. Die Korrektur der Einspritzparameter wird mittels eines Korrektur-einspritzparametermodells, das durch eine optimierungsbasierte Inversion eines Verbrennungszyklusmodells unter Berücksichtigung des dynamischen Verhaltens des Luftsystems gebildet werden kann, vorgenommen. Durch die explizite Modellierung des Beitrags, den die einzelnen Verbrennungszyklusphasen (Gaswechsel, Kompression und Verbrennung) zum indizierten Mitteldruck bzw. dem generierten Motormoment des gesamten Arbeitsspiels beisteuern, kann insbesondere eine momentenneutrale Anpassung der Einspritzparameter erreicht werden. Die momentenneutrale Anpassung der Einspritzparameter wird durch eine Gleichungsnebenbedingung bei der Formulierung des Optimierungsproblems erreicht.

Weiterhin können die Korrektur-Einspritzparameter durch Invertieren eines vorgegeben Verbrennungszyklusmodell als das Korrektur-einspritzparametermodell mithilfe eines Optimierungsverfahrens bestimmt werden, wobei das Verbrennungszyklusmodell einem kombiniert physikalisch / datenbasierten Modell zur Beschreibung von physikalischen Vorgängen in einem Zylinder des Verbrennungsmotors entsprechen kann. Insbesondere kann das kombiniert physikalisch / datenbasierte Modell eine kurbelwinkelaufgelöste Beschreibung der Gaswechsel- und Kompressionsphase sowie eine datenbasierte Approximation der Verbrennung, z.B. mittels eines datenbasierten nicht-parametrischen Modells, insbesondere eines Gauß-Prozess-Modells, oder eines neuronalen Netzes, umfassen.

Gemäß einer Ausführungsform kann das Optimierungsverfahren zur Optimierung einer oder mehrerer Schadstoffemissionen (Ruß, NOx, ...) oder eines Kraftstoffverbrauchs insbesondere mit jeweils individuell anpassbaren Gewichtungen durchgeführt werden. Durch die Wahl der Randbedingung des Optimierungsverfahrens zur Optimierung kann gewährleistet werden, dass das generierte Motormoment bzw. der indizierte Mitteldruck des Arbeitsspiels konstant bleibt.

Alternativ kann das Korrektur-einspritzparametermodell mithilfe eines offline gelernten vorgegebenen datenbasierten nicht-parametrischen Modells, insbesondere eines Gauß-Prozess-Modells, oder einem neuronalen Netz vorgegeben werden. Das beschriebene Optimierungsverfahren zur Optimierung wird dabei in gleicher Weise offline für eine repräsentative Variation der nicht mit dem Einspritzsystem verknüpften Eingangsgrößen (Luftsystemeingangsgrößen, Raildruck und Motordrehzahl) gelöst. Das Ergebnis der Optimierung, die Korrektur-Einspritzparameter, wird in Abhängigkeit der zuvor variierten Eingangsgrößen in dem oben erwähnten datenbasierten nicht-parametrischen Modell abgelegt.

Es kann vorgesehen sein, dass für das Korrektur-einspritzparametermodell relevante Eingangsgrößen eine oder mehrere der folgenden Größen umfassen:

- einen Gasdruck, eine Gastemperatur und eine Sauerstoffkonzentration in einem Einlasskrümmer des Verbrennungsmotors,
- einen Gasdruck, eine Gastemperatur und eine Sauerstoffkonzentration in einem Auslasskrümmer des Verbrennungsmotors,
- einen Kraftstoffdruck,
- eine Motordrehzahl,
- ein Sollmoment oder einen Soll-Mitteldruck (indiziert) IMEP des Arbeitsspiels.

Weiterhin können eine oder mehrere der Eingangsgrößen des Korrektur-einspritzparametermodells abhängig von einem Unterschied eines oder mehrerer tatsächlicher, d.h. gemessener Verbrennungsmerkmale einer Verbrennung in dem Zylinder des Verbrennungsmotors von einem oder mehreren modellierten Verbrennungsmerkmalen einer Verbrennung in dem Zylinder des Verbrennungsmotors korrigiert werden. Insbesondere kann die Korrektur der Eingangsgrößen für das Korrektur-einspritzparametermodell anhand des Vergleichs vorhergesagter und gemessener Verbrennungsmerkmale vorgenommen werden.

Insbesondere können das eine oder die mehreren modellierten Verbrennungsmerkmale basierend auf mindestens einem Teil der Eingangsgrößen für das Korrektur-einspritzparametermodell und zusätzlich den angepassten Einspritzparametern gemäß einem Verbrennungszyklusmodell ermittelt werden, das insbesondere

mithilfe eines datenbasierten nicht-parametrischen Modells, insbesondere eines Gauß-Prozess-Modells, vorgegeben ist.

Der Kern des Verbrennungszyklusmodells zur Berechnung der Verbrennungsmerkmale kann prinzipiell identisch mit dem des Korrektur-einspritzparametermodells sein, d. h. physikalisch/datenbasierte Modellstruktur zur Beschreibung der Gaswechsel-, Kompressions- und Verbrennungsphase. Innerhalb des Korrektur-einspritzparametermodells werden die Modelle der Verbrennungsphase anhand einer Gütefunktion, die aus den entsprechenden Vorhersagewerten für Emissionen usw. gebildet wird, hinsichtlich der Korrektur-einspritzparameter optimierungsbasiert invertiert. Die Randbedingungen dieser Inversion per Optimierung werden dabei von den Modellen der Gaswechsel- und Kompressionsphase geliefert. Für die Vorhersage der Verbrennungsmerkmale besteht der Unterschied hinsichtlich der Modellstruktur lediglich darin, dass bestimmte Verbrennungsmerkmale geschätzt werden und das zugrundeliegende Modell nicht invertiert wird. Zur Berechnung der Verbrennungsmerkmale muss somit ebenfalls die Gaswechsel- und Kompressionsphase berechnet werden.

Gemäß einem weiteren Aspekt ist eine Vorrichtung, insbesondere Steuereinheit, zum Betreiben eines Verbrennungsmotors in einem Motorsystem durch Vorgabe eines Einspritzprofils, das durch angepasste Einspritzparameter definiert ist, vorgesehen, wobei die Vorrichtung ausgebildet ist, um:

- stationäre Einspritzparameter anhand eines vorgegebenen Stationär-Einspritzprofilkennfelds zu ermitteln;
- Korrektur-Einspritzparameter anhand eines vorgegebenen Korrektur-einspritzparametermodells, das Korrektur-Einspritzparameter abhängig von einer oder mehreren Zustandsgrößen eines Luftzuführungs- und/oder Abgasabführungssystems des Verbrennungsmotors bereitstellt, zu ermitteln; und
- die stationären Einspritzparameter mit den Korrektur-einspritzparametern zu beaufschlagen, um die angepassten Einspritzparameter zu erhalten.

Kurzbeschreibung der Zeichnungen

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

- Figur 1 eine schematische Darstellung eines Motorsystems mit einem Verbrennungsmotor;
- Figur 2 ein beispielhaftes Einspritzprofil mit einer Vor- und einer Haupteinspritzung; und
- Figur 3 ein Blockdiagramm zur Veranschaulichung eines Verfahrens zum Anpassen des Einspritzprofils abhängig von einem Betriebszustand des Motorsystems.

Beschreibung von Ausführungsformen

In Figur 1 ist schematisch ein Motorsystem mit einem Verbrennungsmotor 1 mit einer Anzahl von Zylindern 2 (im vorliegenden Ausführungsbeispiel vier Zylinder) dargestellt. Der Verbrennungsmotor 1 kann als Diesel- oder Ottomotor ausgebildet sein und wird entsprechend im Viertaktbetrieb getrieben.

Über ein Luftzuführungssystem 3 wird den Zylindern 2 des Verbrennungsmotors 1 Frischluft zugeführt. Die Zuführung von Frischluft erfolgt über einen Einlasskrümmer 6 zu den Einspritzventil 7 in jedem der Zylinder 2. Im Luftzuführungssystem 3 können optional eine Aufladeeinrichtung, wie beispielsweise ein Turbolader, eine Drosselklappe und eine Abgasrückführung vorgesehen sein, womit jeweils die Menge von in die Zylinder 2 strömender Frischluft sowie deren Zusammensetzung, z. B. die Sauerstoffkonzentration, eingestellt werden kann.

Verbrennungsabgase werden aus den Zylindern 2 mit Hilfe eines Abgasabführungssystems 4 abgeführt. Die Verbrennungsabgase werden dazu über entsprechende Auslassventile 8 in den Zylindern 2 über einen Auslasskrümmer 9 in das

Abgasabführungssystem 4 abgeführt. Das Luftzuführungssystem 3 und das Abgasabführungssystem 4 bilden gemeinsam das sogenannte Luftsystem des Motorsystems 1. In der Regel weisen heutige Verbrennungsmotoren auch eine Abgasrückführung und eine Aufladung, z.B. durch einen Abgasturbolader, auf (nicht gezeigt).

Zur Einbringung von Kraftstoff sind den Zylindern 2 Einspritzventile 5 zugeordnet, die in geeigneter Weise zum Öffnen oder Schließen angesteuert werden können, um Kraftstoff in die Brennräume der Zylinder 2 einzuspritzen.

Der Betrieb des Verbrennungsmotors 2 wird mit Hilfe einer Steuereinheit 10 gesteuert. Die Steuereinheit 10 erfasst dazu eine Vorgabe eines Sollmoments, die beispielsweise bei einem Betrieb in einem Kraftfahrzeug aus einer Fahrpedalstellung oder dergleichen abgeleitet werden kann und einer angeforderten Last entspricht. Basierend auf dem vorgegebenen Sollmoment und sensorisch oder über ein Modell erhaltenen momentanen Zustandsgrößen des Motorsystems 1 kann durch Stellen von geeigneten Stellgebern, wie beispielsweise einer Drosselklappe, eines Abgasrückführungsventils, eines Laderstellers (Wastegate-Ventil, VTG-Steller usw.) oder dergleichen das Betriebsverhalten des Motorsystems 1 zum Erreichen des vorgegebenen Sollmoments eingestellt werden. Wesentlich für die Bereitstellung des angeforderten Sollmoments ist die pro Arbeitstakt in einem Zylinder eingespritzte Kraftstoffmenge. Diese wird in der Regel durch eine Öffnungszeitdauer der Einspritzventile 5 und die Anzahl von Einspritzvorgängen pro Arbeitstakt vorgegeben. Neben der Generierung des gewünschten Sollmoments steuert die Steuereinheit 10 das Motorsystem so, dass durch die Stelleingriffe zusätzlich ein möglichst emissionsarmer Motorbetrieb realisiert wird, innerhalb stationärer wie auch transientser Betriebsituationen.

Zur Optimierung des Motorverhaltens kann die Einspritzung von Kraftstoff in aufeinanderfolgenden ein oder mehreren Voreinspritzungen ein oder mehreren Haupteinspritzungen erfolgen, die gemäß einem Einspritzprofil vorgegeben sein können. Beispielsweise ist in Figur 2 ein derartiges Einspritzprofil mit entsprechenden Einspritzparametern angegeben. Das Einspritzprofil der Figur 2 zeigt anhand eines Verlaufs einer Durchflussmenge durch das Einspritzventil die Öffnungs- und Schließzeiten bzw. Öffnungs- und Schließwinkel einer Voreinspritzung und einer

Haupteinspritzung. Die Öffnungszeiten bzw. -winkel werden als jeweils ein Einspritzparameter durch die Zeit- bzw. Winkeldifferenz zu einem oberen Totpunkt einer Kolbenbewegung in dem betreffenden Zylinder 2 angegeben. Weiterhin können als weitere Einspritzparameter die Kraftstoffmengen für jede der Einspritzungen vorgegeben werden. Anstelle der Verwendung der Kraftstoffmenge als Einspritzparameter kann auch die Einspritzventilöffnungszeit verwendet werden, wobei die effektive Menge an eingespritztem Kraftstoff sich weiterhin abhängig von dem Einspritzdruck des bereitgestellten Kraftstoffs ergibt, was bei der Ermittlung der korrekten Einspritzventilöffnungszeit berücksichtigt werden muss.

Dadurch ergibt sich ein stationärer Parametervektor $u_{e,k}$ für das Einspritzprofil mit jeweils einer Voreinspritzung und einer Haupteinspritzung wie folgt:

$$u_{e,k} = [\varphi_k^{PI} \quad m_k^{PI} \quad \varphi_k^{MI} \quad m_k^{MI}]$$

wobei φ_k^{PI} dem relativen Anfangszeitpunkt bzw. Startwinkel der Voreinspritzung (PI), φ_k^{MI} dem relativen Anfangszeitpunkt bzw. Startwinkel der Haupteinspritzung (MI), m_k^{PI} die Einspritzmenge von Kraftstoff der Voreinspritzung und m_k^{MI} die Einspritzmenge von Kraftstoff der Haupteinspritzung für den jeweiligen Arbeitstakt k entsprechen. Die Anfangszeitpunkte können beispielsweise drehzahlunabhängig in Form eines Kurbelwellenwinkels, insbesondere relativ zu einem fest vorgegebenen Kurbelwellenwinkel einer Kurbelwelle des Verbrennungsmotors 1, wie z.B. eines oberen Totpunkts der Kurbelwellenbewegung, vorgegeben sein. In Figur 2 entsprechen m_k^{PI} und m_k^{MI} den Flächen unter dem dargestellten Einspritzratenverlauf und somit der jeweils eingespritzten Kraftstoffmenge. Die Anzahl der Voreinspritzungen und die Anzahl der Haupteinspritzungen kann jedoch jeweils mehr als eine betragen und insbesondere abhängig von dem Betriebspunkt, insbesondere angegeben durch die Motordrehzahl und die Motorlast, vorgegeben sein. Entsprechend würde sich die Anzahl der Einspritzparameter erhöhen.

In Figur 3 ist ein Funktionsdiagramm für eine Funktion zum Bereitstellen von angepassten Einspritzparametern $u_{e,k}^*$ in Form einer Ansteuergröße für ein Einspritzventil 5 eines Zylinders 2 dargestellt. Entsprechend den angepassten Einspritzparametern $u_{e,k}^*$ soll das dem Zylinder 2 zugeordneten Einspritzventil 5 angesteuert

werden. Die entsprechenden angepassten Einspritzparameter $u_{e,k}^*$ werden dazu dem Einspritzblock 15 zugeführt, in dem die angepassten Einspritzparametern $u_{e,k}^*$ in zeitliche Ansteuersignale für das betreffende Einspritzventil 5 zum Öffnen und Schließen umgewandelt werden, insbesondere abhängig von einem Kurbelwellenwinkel und einer Motordrehzahl.

Die Einspritzparameter der Ansteuergröße entsprechen stationären Einspritzparameter $u_{e,k}$, die mit Korrektur-Einspritzparametern $\Delta u_{e,k}$ korrigiert sind. Damit können insbesondere für einen dynamischen Betriebsfall des Verbrennungsmotors 1 die Einspritzparameter der Ansteuergröße des für den Betriebspunkt relevanten Einspritzprofils angepasst bzw. korrigiert werden.

Dazu wird betriebspunktabhängig, d.h. abhängig von einer Motordrehzahl n des Verbrennungsmotors 1 und dem Sollmoment M_{soll} (entspricht arbeitsspielindividuelles $M_{\text{soll}}^{\text{Arbeitspiel}}$), d.h. der angeforderten Last, stationäre Einspritzparameter $u_{e,k}$ eines Stationär-Einspritzprofils entsprechend einem vorgegebenen Einspritzprofilkennfeld, das in einem Stationär-Einspritzprofilblock 11 bereitgestellt wird, vorgegeben. Das Einspritzprofilkennfeld wird in der Regel offline, z.B. auf einem Prüfstand ermittelt, und in geeigneter Weise gespeichert und abrufbar zur Verfügung durch Vorgabe der Motordrehzahl n dem Sollmoment M_{soll} zur Verfügung gestellt.

Das Einspritzprofilkennfeld kann als Look-up-Tabelle oder als Funktionsmodell, wie z.B. einem Gaußprozessmodell zur Verfügung gestellt werden.

Den stationären Einspritzparametern $u_{e,k}$ des Stationär-Einspritzprofils werden mit den Korrektur-Einspritzparametern $\Delta u_{e,k}$ beaufschlagt, insbesondere hinzuaddiert. Alternativ können die stationären Einspritzparameter $u_{e,k}$ des Stationär-Einspritzprofils mit den Korrektur-Einspritzparametern $\Delta u_{e,k}$ multipliziert oder in sonstiger Weise verknüpft werden.

Die Korrektur-Einspritzparameter $\Delta u_{e,k}$ werden in einem Anpassungsblock 12 ermittelt. Im Anpassungsblock 12 können die Korrektur-Einspritzparameter $\Delta u_{e,k}$ durch ein vorgegebenes Korrektur-Einspritzparametermodell berechnet werden.

Das Korrekturspritzparametermodell kann z.B. einem durch ein per Online-Optimierung invertiertes Zylindermodell Σ_C^{-1} entsprechen, das auf einem Verbrennungszyklusmodell Σ_C basiert. Das Verbrennungszyklusmodell Σ_C bildet die physikalischen Vorgänge in den Zylindern ab.

Alternativ kann in dem Anpassungsblock 12 das Ergebnis einer vergleichbaren, jedoch offline durchgeführten Optimierung in Kennfeldern abgelegt werden, die z.B. per Gauß-Prozess-Regression beschrieben sind.

Die Verwendung von nicht parametrischen, datenbasierten Funktionsmodellen wie z.B. der Gauß-Prozess-Regression, basiert auf einem Bayes-Regressionsverfahren. Die Grundlagen der Bayes-Regression sind beispielsweise in C. E. Rasmussen et al., „Gaussian Processes for Machine Learning“, MIT Press 2006, beschrieben. Bei der Bayes-Regression handelt es sich um ein datenbasiertes Verfahren, das auf einem Modell basiert. Zur Erstellung des Modells sind Messpunkte von Trainingsdaten sowie zugehörige Ausgangsdaten einer zu modellierenden Ausgangsgröße erforderlich. Die Erstellung des Modells erfolgt anhand der Verwendung von Stützstellendaten, die den Trainingsdaten ganz oder teilweise entsprechen oder aus diesen generiert werden. Weiterhin werden abstrakte Hyperparameter bestimmt, die den Raum der Modellfunktionen parametrisieren und effektiv den Einfluss der einzelnen Messpunkte der Trainingsdaten auf die spätere Modellvorhersage gewichten.

Die für das Korrekturspritzparametermodell relevanten Eingangsgrößen können eine oder mehrere der folgenden Größen umfassen:

- gemessene und/oder modellierte Bedingungen innerhalb des Einlasskrümmers 6 des Luftzuführungssystems 3 unmittelbar vor den Einlassventilen 7, z.B. einen Gasdruck $p_{IM}(t)$, eine Gastemperatur $T_{IM}(t)$ und eine Sauerstoffkonzentration $X_{IM}^{O_2}(t)$,
- gemessene und/oder modellierte Bedingungen innerhalb des Auslasskrümmers 9 des Abgasabführungssystems 4 unmittelbar nach den Auslassventilen 8 umfassen, z.B. einen Gasdruck $p_{EM}(t)$, eine Gastemperatur $T_{EM}(t)$ und eine Sauerstoffkonzentration $X_{EM}^{O_2}(t)$,
- einen Kraftstoffdruck $p_r(t)$,
- eine Motordrehzahl n ,

- ein Sollmoment $M_{\text{soll}}^{\text{Arbeitsspiel}}$ oder einen Soll-Mitteldruck (indiziert) IMEP $p_{\text{mi,soll}}^{\text{Arbeitsspiel}}$ des Arbeitsspiels.

Zur Reduktion der Modellkomplexität ist es möglich, auch nur eine Auswahl dieser Eingangsgrößen zu berücksichtigen.

Das Korrektoreinspritzparametermodell liefert als Ausgangsgrößen die Korrektur-Einspritzparameter $\Delta u_{e,k}$. Aus den stationären Einspritzparametern $u_{e,k}$ des Einspritzprofils und den Korrektur-Einspritzparametern $\Delta u_{e,k}$ resultieren die für das Arbeitsspiel k angepassten Einspritzparameter $u_{e,k}^*$.

In dem Formungsblock 13 werden anhand einer Abweichung zwischen den modellierten Verbrennungsmerkmalen \hat{z}_k und gemessenen Verbrennungsmerkmalen z_k für einen Zylinder 2 Kennwerte zur Korrektur einer oder mehrerer der obigen Eingangsgrößen, die für den Anpassungsblock 12 verwendet werden, ermittelt. Die eine oder die mehreren Eingangsgrößen werden in einem Korrekturanwendungsblock 19 durch Beaufschlagung mit einer oder mehreren Korrekturgrößen K ermittelt. Insbesondere werden Korrekturwerte K für eine oder mehrere Eingangsgrößen in einfacher Weise ausgewählt, die eine ausreichende Sensitivität zu dem betreffenden Verbrennungsmerkmal aufweisen.

Zur Berechnung des Verbrennungszyklusmodells Σ_C , z. B. innerhalb eines Modellblocks 14 bzw. in invertierter Form innerhalb eines Anpassungsblocks 12, werden als Randbedingungen des Luftsystems $[p_{IM}(t) T_{IM}(t) X_{IM}^{O_2}(t) p_{EM}(t) T_{EM}(t) X_{EM}^{O_2}(t)]$, der Einspritzdruck $p_r(t)$, die Motordrehzahl n sowie die entsprechende korrigierten Einspritzparameter $u_{e,k}^*$ vorgegeben. Die Ausgangsgrößen des Verbrennungszyklusmodells Σ_C können neben den Verbrennungsmerkmalen \hat{z}_k , wie in dem Modellblock 14 dargestellt, beispielsweise auch die Schadstoffemissionen ε_{NO_x} (Stickoxidemissionen), ε_{PM} (Rußemissionen) oder der indizierte Mitteldruck $p_{\text{mi,k}}^{\text{Arbeitsspiel}}$ des gesamten Arbeitsspiels sein, wie in Anpassungsblocks 12 verwendet (nicht in Figur 2 dargestellt).

Das Verbrennungszyklusmodell Σ_C umfasst mehrere Modellteile, die Teilphasen des Arbeitsspiels in einem Zylinder 2 entsprechen. Die Teilphasen umfassen z. B.

die Gaswechselphase, die Kompressionsphase und die Verbrennungsphase. Die Teilphasen sind durch entsprechende thermodynamische Zustände

$$x(t) = [m(t) \quad m^{O_2}(t) \quad p(t)]^T \text{ bzw. } x(\varphi) = [m(\varphi) \quad m^{O_2}(\varphi) \quad p(\varphi)]^T$$

(φ entspricht dem Kurbelwellenwinkel) der Zylinderfüllung eines Zylinders (Masse m , Sauerstoffmasse m^{O_2} und Zylinderdruck p) für den Zeitpunkt des Öffnens des Auslassventils 8 ($t \hat{=} t_k^{A\ddot{O}}$ bzw. $\varphi \hat{=} \varphi_k^{A\ddot{O}}$), des Schließens des Einlassventils 7 ($t \hat{=} t_k^{ES}$ bzw. $\varphi \hat{=} \varphi_k^{ES}$) und des Starts der ersten Voreinspritzung ($t \hat{=} t_k^{PI}$ bzw. $\varphi \hat{=} \varphi_k^{PI}$) miteinander gekoppelt. Hinsichtlich der Modellierung sind die einzelnen Phasen wie folgt charakterisiert:

- Während der Gaswechselphase kann ein physikalisches, konzentriert parametrisches Zylindermodell mit Drosselgleichungen für die Einlass- und Auslassventile verwendet werden,
 - Gesamtmassenbilanzgleichung

$$\frac{dm(t)}{dt} = \dot{m}_{AV}(t) - \dot{m}_{EV}(t)$$

\dot{m}_{AV} : Massenstrom durch das Auslassventil

\dot{m}_{EV} : Massenstrom durch das Einlassventil

- Sauerstoffmassenbilanzgleichung

$$\frac{dm^{O_2}(t)}{dt} = \dot{m}_{AV}^{O_2}(t) - \dot{m}_{EV}^{O_2}(t)$$

$\dot{m}_{AV}^{O_2}$: Sauerstoffmassenstrom durch das Auslassventil

$\dot{m}_{EV}^{O_2}$: Sauerstoffmassenstrom durch das Einlassventil

- Drosselgleichung zur Beschreibung des Massenstroms durch das Einlass- bzw. Auslassventil

$$\dot{m}_v(t) = \alpha_v \cdot A_v \cdot p_u \cdot \sqrt{\frac{2}{R \cdot T_u}} \cdot \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1} \left(\left(\frac{p_d}{p_u} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_d}{p_u} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right)} \quad \text{mit } p_u > p_d$$

α_v : Durchflusskoeffizient

A_v : effektive Querschnittsfläche

R : spezifische Gaskonstante

T_u : Temperatur in Strömungsrichtung vor dem Ventil

p_u : Druck in Strömungsrichtung vor dem Ventil

p_d : Druck in Strömungsrichtung nach dem Ventil

κ : Isentropenexponent

v : Laufvariable für die Ventile (Einlass und Auslass) mit $v \in \{AV, EV\}$

- Druckdifferentialgleichung (hergeleitet aus der Energiebilanzgleichung)

$$\frac{dp(t)}{dt} = \frac{R}{V \cdot c_v} \cdot \left[\left(\sum_v \sum_f \dot{m}_v^f(t) \left(h^f(\tilde{T}) - h^f(T) + \frac{c_p \cdot R^f \cdot T}{R} \right) \right) - \frac{c_p}{R} \cdot p \cdot \dot{V} \right]$$

R : spezifische Gaskonstante

V : aktuelles Zylindervolumen

\dot{V} : zeitliche Änderung des Zylindervolumens

c_v : spezifische isochore Wärmekapazität

c_p : spezifische isobare Wärmekapazität

h^f : spezifische Enthalpie des Fluids f

T : aktuelle Zylindertemperatur

R^f : spezifische Gaskonstante der Gaskomponente f

R : spezifische Gaskonstante des Gasgemisches

v : Laufvariable für die Ventile (Einlass und Auslass) mit $v \in \{AV, EV\}$

f : Laufvariable für die betrachteten Gaskomponenten mit $f \in \{O^2, \dots\}$

- Berechnungsgleichung des indizierten Mitteldrucks $p_{mi,k}^{Gaswechsel}$ während der Gaswechselphase $\varphi_k^{AÖ} < \varphi \leq \varphi_k^{ES}$ bzw. $t_k^{AÖ} < t \leq t_k^{ES}$

$$p_{mi,k}^{Gaswechsel} = \frac{1}{V_{zyl}} \cdot \int_{t_k^{AÖ}}^{t_k^{ES}} p(t) \cdot \dot{V}(t) dt$$

V_H : Hubvolumen des Zylinders

Während der Kompressionsphase kann ein physikalisches konzentriert parametrisches Zylindermodell verwendet werden.

- Gesamtmassenbilanzgleichung

$$\frac{dm(t)}{dt} = 0$$

- Sauerstoffmassenbilanzgleichung

$$\frac{dm^{O_2}(t)}{dt} = 0$$

- Druckdifferentialgleichung (hergeleitet aus der Energiebilanzgleichung)

$$\frac{dp(t)}{dt} = - \frac{c_p \cdot p \cdot \dot{V}}{V \cdot c_v}$$

- Berechnungsgleichung des indizierten Mitteldrucks während der Kompressionsphase $\varphi_k^{ES} < \varphi \leq \varphi_k^{PI}$ bzw. $t_k^{ES} < t \leq t_k^{PI}$

$$p_{mi,k}^{Kompression} = \frac{1}{V_{zyl}} \cdot \int_{t_k^{ES}}^{t_k^{PI}} p(t) \cdot \dot{V}(t) dt$$

Während der Verbrennungsphase kann eine datenbasierte Approximation der Verbrennungsphase durch eine Gauß-Prozess-Regression zur Beschreibung der Ausgangsgrößen, wie beispielsweise von Schadstoffemissionen ε_{NO_x} , ε_{PM} und des indizierten Mitteldrucks $p_{mi,k}^{Verbrennung}$, in Abhängigkeit des Zylinderfüllungszustands $x(t_k^{PI})$ bzw. $x(\varphi_k^{PI})$ (als Ergebnis der Modellteile der Gaswechselphase und der Kompressionsphase), der Einspritzparameter, wobei diese beliebige Werte innerhalb des Modellgültigkeitsbereichs annehmen können, also z. B. die stationären

Einspritzparameter $u_{e,k}$ oder die angepassten Einspritzparameter $u_{e,k}^*$, dem Kraftstoffdruck p_r und der Motordrehzahl n modelliert werden.

- Physikalisch motivierte Approximation der Gesamtmassenbilanzgleichung (Beschreibung der Zylindermasse zum Zeitpunkt – Auslassventil öffnet)

$$m(t_k^{\text{AÖ}}) = m(t_k^{\text{PI}}) + (m_k^{\text{PI}} + m_k^{\text{MI}})$$

- Physikalisch motivierte Approximation der Sauerstoffmassenbilanzgleichung (Beschreibung der Sauerstoffmasse innerhalb des Zylinders zum Zeitpunkt – Auslassventil öffnet)

$$m^{\text{O}_2}(t_k^{\text{AÖ}}) = m^{\text{O}_2}(t_k^{\text{PI}}) - \mu^{\text{O}_2}(m_k^{\text{PI}} + m_k^{\text{MI}})$$

μ^{O_2} : stöchiometrischer Faktor (Sauerstoffbedarf)

- Datenbasierte Approximation der Druckdifferentialgleichung (basierend auf dem mathematischen Fluss der Differentialgleichung) z. B. per Gauß-Prozess-Regression

$$p(t_k^{\text{AÖ}}) \approx M_{GPR,p}^{\text{AÖ}}(x(t_k^{\text{PI}}), u_{e,k}, p_r, n_E)$$

- Datenbasierte Approximation der NO_x und Ruß Emissionen sowie des indizierten Mitteldrucks $p_{\text{mi},k}^{\text{Verbrennung}}$ z. B. per Gauß-Prozess-Regression

$$p_{\text{mi},k}^{\text{Verbrennung}} \approx M_{GPR,p_{\text{mi}}}^{\text{AÖ}}(x(t_k^{\text{PI}}), u_{e,k}, p_r, n_E)$$

$$\varepsilon_{\text{NO}_x} \approx M_{GPR,\text{NO}_x}^{\text{AÖ}}(x(t_k^{\text{PI}}), u_{e,k}, p_r, n_E)$$

$$\varepsilon_{\text{PM}} \approx M_{GPR,\text{PM}}^{\text{AÖ}}(x(t_k^{\text{PI}}), u_{e,k}, p_r, n_E)$$

Die Berechnung des indizierten Mitteldrucks des gesamten Arbeitsspiels $p_{mi,k}^{\text{Arbeitsspiel}}$ erfolgt entsprechend

$$p_{mi,k}^{\text{Arbeitsspiel}} = p_{mi,k}^{\text{Gaswechsel}} + p_{mi,k}^{\text{Kompression}} + p_{mi,k}^{\text{Verbrennung}}.$$

Die Bestimmung der Korrektoreinspritzparameter $\Delta u_{e,k}$ in Anpassungsblock 12 kann durch eine optimierungsbasierte Inversion des Verbrennungszyklusmodells Σ_C erreicht werden, um das Korrektoreinspritzparametermodell zu erhalten und um damit die Korrektoreinspritzparameter $\Delta u_{e,k}$ zu bestimmen. Dazu wird das Verbrennungszyklusmodell Σ_C hinsichtlich der Einspritzparameter invertiert, um ein invertiertes Verbrennungszyklusmodell Σ_C^{-1} zu erhalten. Die Invertierung eines Gaußprozessmodells ist aus dem Stand der Technik bekannt und kann beispielsweise mithilfe eines Newton-Verfahrens vorgenommen werden.

Ist der mit den Einspritzparametern verknüpfte Teil des Verbrennungszyklusmodells mittels einem oder mehreren Gaußprozess-Modellen beschrieben, speziell die Emissionen, so können deren Vorhersagewerte innerhalb einer Gütefunktion zusammengefasst werden. Anhand dieser Gütefunktion kann gemäß dem Stand der Technik, z.B. mithilfe eines Newton-Verfahrens, eine optimierungsbasierte Inversion der GPR-Modelle durchgeführt werden, d. h. die Bestimmung der Korrektoreinspritzparameter $\Delta u_{e,k}$, die die Gütefunktion (lokal / global) minimieren. Dies stellt die optimierungsbasierte Inversion des Verbrennungszyklusmodells dar. Es können auch andere optimierungsbasierte Verfahren zum Einsatz kommen. Ziel der Optimierung ist einerseits durch die Korrektur-Einspritzparameter $\Delta u_{e,k}$ die Schadstoffemissionen ε_{NO_x} , ε_{PM} , den Kraftstoffverbrauch oder dergleichen zu optimieren und dabei andererseits das für das Arbeitsspiel gewünschte Sollmoment $M_{soll}^{\text{Arbeitsspiel}}$ bzw. den damit korrelierten indizierten Mitteldruck $p_{pmi,soll}^{\text{Arbeitsspiel}}$ unter Berücksichtigung des Gaswechsels und der Kompression zu erzielen.

Für die Bestimmung der Korrektoreinspritzparameter $\Delta u_{e,k}$ werden die für die Verbrennungsphase gültigen Gauß-Prozess-Modelle (bezüglich Stickoxidemissionen ε_{NO_x} , Rußemissionen ε_{PM} oder des indizierten Mitteldrucks $p_{mi}^{\text{Verbrennung}}$ der Ver-

brennungsphase, ...) entsprechend einer Optimierung invertiert, so dass man abhängig von frei formulierbaren Optimierungszielen für die Schadstoffemissionen ϵ_{NO_x} , ϵ_{PM} und dem für das Arbeitsspiel einzuhaltenden indizierten Mitteldruck $p_{\text{mi,soll}}^{\text{Arbeitsspiel}}$ die entsprechenden Korrektur-Einspritzparameter $\Delta u_{e,k}$ des Einspritzprofils erhalten kann.

Die Optimierung, die durch eine Minimierung einer Gütefunktion unter Beachtung von vorgegebenen Randbedingungen erfolgen kann, kann die folgende mathematische Struktur aufweisen:

$$\min_{\Delta u_{e,k} \in \Delta U_{e,k}} \overbrace{J(\epsilon_{NO_x}, \epsilon_{PM}, m_k^{PI} + m_k^{MI})}^{\text{Allgemeine Gütefunktion}} = \overbrace{w_{NO_x} \epsilon_{NO_x} + w_{PM} \epsilon_{PM} + w_{\text{fuel}} (m_k^{PI} + m_k^{MI})}^{\text{Struktur einer Gütefunktion (exemplarisch)}}$$

Nebenbedingung der Optimierung:

$$0 = p_{\text{mi}}^{\text{Verbrennung}} - \underbrace{\left(p_{\text{mi,soll}}^{\text{Arbeitsspiel}} - p_{\text{mi}}^{\text{Gaswechsel}} - p_{\text{mi}}^{\text{Kompression}} \right)}_{p_{\text{mi,soll}}^{\text{Verbrennung}}}$$

Dies entspricht einem physikalisch / datenbasierten Modell der Gaswechsel-, Kompressions- und Verbrennungsphase entsprechend des Verbrennungszyklusmodells Σ_C mit $\Delta U_{e,k}$ als zulässigen Wertebereich der Korrektur-Einspritzparameter $\Delta u_{e,k}$, w_{\dots} den Gewichtungsfaktoren der jeweiligen Gütefunktionselemente und der Gesamteinspritzmenge $m_k^{PI} + m_k^{MI}$, hier beispielhaft für 2 Einspritzungen.

Die für die Verbrennungsphase berücksichtigten Gauß-Prozess-Modelle, die im beschriebenen Ausführungsbeispiel für die Optimierung in Anpassungsblock 12 zum Einsatz kommen, können des Weiteren so modifiziert sein, dass bei deren Modellbildung die Information über die drehzahl-/lastabhängigen stationären Einspritzparameter $u_{e,k}$ bereits direkt berücksichtigt bzw. mitgelernt werden. Durch diese Maßnahme werden die mit der Kraftstoffeinspritzung verknüpften Eingangsgrößen der Gauß-Prozess-Modelle von Einspritzparametern mit „absoluten“ Bezug z. B. $u_{e,k}$ in Einspritzparameter mit relativem Bezug $\Delta u_{e,k}$ transformiert. Da

somit die vom Motorbetriebspunkt abhängigen Einstellgrenzen der Einspritzparameter, z.B. hinsichtlich der Einspritzzeitpunkte, implizit innerhalb der Gauß-Prozess-Modelle berücksichtigt sind, können die Optimierungsgrenzen als einfache Box Constraints formuliert werden und das Ergebnis der Optimierung liefert zusätzlich direkt die Ausgangswerte von Block 12. Des Weiteren können durch die Transformation der Variablen direkt analytische Ableitung hinsichtlich der durch die Optimierung zu bestimmenden Korrektur-Einspritzparameter $\Delta u_{e,k}$ berechnet werden.

Als Optimierungsverfahren zur Bestimmung der Korrektur-Einspritzparameter $\Delta u_{e,k}$ kommen herkömmliche Optimierungsverfahren wie Gradientenabstiegsverfahren oder dergleichen in Betracht.

Durch das Zylindermodell der Gaswechselphase und das Zylindermodell der Kompressionsphase werden die Randbedingungen der Optimierung ermittelt. Dies umfasst den Zylinderfüllungszustand $x(t_k^{PI})$ bzw. $x(\varphi_k^{PI})$ zu Beginn der Verbrennung (bzw. des Verbrennungstaktes) und das von der Verbrennungsphase zu erzeugende Soll-Moment $M_{soll}^{Verbrennung}$ bzw. der soll-indizierte Mitteldruck IMEP $p_{mi,soll}^{Verbrennung}$ der Verbrennungsphase entsprechend

$$p_{mi,soll}^{Verbrennung} = p_{mi,soll}^{Arbeitsspiel} - p_{mi}^{Gaswechsel} - p_{mi}^{Kompression}$$

wobei sich der indizierte Soll-Mitteldruck $p_{mi,soll}^{Arbeitsspiel}$ des Arbeitsspiels aus dem Soll-Moment des Arbeitsspiels $M_{soll}^{Arbeitsspiel}$ entsprechend

$$p_{pmi,soll}^{Arbeitsspiel} = \frac{4 * \pi * M_{soll}^{Arbeitsspiel}}{V_H}$$

ergibt (V_H - Hubvolumen des Zylinders). Das Moment $M_{soll}^{Arbeitsspiel}$ beschreibt die aus dem Fahrerwunsch und den Anforderungen der Nebenaggregate (Klimaanlage, ...) abgeleitete Momentenanforderung, die integral innerhalb eines Arbeitsspiels erzeugt werden muss.

Die Optimierungsvariablen sind die Korrektoreinspritzparameter $\Delta u_{e,k}$, die die gesuchten Korrekturwerte der durch Motordrehzahl n und Soll-Moment M_{soll} bestimmten stationären Einspritzparameter $u_{e,k}$ darstellen.

Die Verbrennungsschwerpunktlage φ_{50} (beschreibt den Kurbelwellenwinkel, an dem 50% des eingebrachten Kraftstoffs chemisch umgesetzt wurden) und/oder andere Verbrennungsmerkmale z_k (z. B. φ_{10} , φ_{90} , Kurbelwinkelposition und Wert des Zylinderspitzen drucks, Kurbelwinkelposition und Wert des maximalen Druckgradienten usw.) können basierend auf Zustandsgrößen des Verbrennungsmotors 1 ermittelt werden. Insbesondere kann die Verbrennungsschwerpunktlage sowie die übrigen Verbrennungsmerkmale durch einen Zylinderdrucksensor direkt erfasst oder alternativ aus einer Analyse eines Verlaufs der Motordrehzahl abgeleitet werden.

Man kann zusätzlich eine Korrektur des für die Optimierung verwendeten Verbrennungszyklusmodells vorsehen. Die Korrektur kann durch Anpassung von deren Eingangsgrößen erfolgen.

Für diesen Zweck werden in einem Modellblock 14 von mindestens einem separaten Anpassungsmodell, z.B. mithilfe eines Gauß-Prozess-Modells, das einem Modellteil des Verbrennungszyklusmodells entsprechen kann, ein oder mehrere Verbrennungsmerkmale \hat{z}_k , wie z.B. eine Verbrennungsschwerpunktlage φ_{50} , sowie φ_{10} , φ_{90} (Kurbelwinkelpositionen nach 10%iger oder 90%iger Verbrennung des Kraftstoffs), die Kurbelwinkelposition und der Wert des Zylinderspitzen drucks oder die Kurbelwinkelposition und der Wert des maximalen Druckgradienten, vorhergesagt, wobei die Eingangsgrößen zumindest teilweise modellidentisch zu denen der Optimierung im Anpassungsblock 12 sind. Durch Vergleich bzw. Differenzbildung in einem Differenzblock 16 mit Verbrennungsmerkmalen z_k , die anhand von Zustandsgrößen des Verbrennungsmotors 1 in einem Verbrennungsmerkmalblock 18 bestimmten werden, ergibt sich dabei eine Abweichung mit einem Fehler Δz_k .

Der Fehler in einer bestimmten Eingangsgröße, z.B. der Fehler der geschätzten Sauerstoffmasse nach dem Schließen des betreffenden Einlassventils, wird dann

anhand eines Modells in einem Korrekturmodellblock 17 bestimmt, das deren Sensitivität zur Abweichung Δz_k des Verbrennungsmerkmals beschreibt. Der Korrekturmodellblock 17 liefert dazu einen oder mehrere Korrekturwerte K zur Beaufschlagung von entsprechenden Eingangsgrößen, um den so geschätzten Fehler der Eingangsgröße im nächsten Arbeitsspiel k+1 für die Korrektur der betreffenden Eingangsgröße zu verwenden.

Ansprüche

1. Verfahren zum Betreiben eines Verbrennungsmotors (1) durch Vorgabe eines Einspritzprofils, das durch angepasste Einspritzparameter ($u_{e,k}^*$) definiert ist, mit folgenden Schritten:
 - Ermitteln von stationären Einspritzparametern ($u_{e,k}$) anhand eines vorgegebenen Stationär-Einspritzprofilkennfelds;
 - Ermitteln von Korrektur-Einspritzparametern ($\Delta u_{e,k}$) anhand eines vorgegebenen Korrektur-Einspritzparametermodells, das Korrektur-Einspritzparameter ($\Delta u_{e,k}$) abhängig von einer oder mehreren Zustandsgrößen eines Luftzuführungssystems (3) und/oder Abgasabführungssystem (4) des Verbrennungsmotors (1) bereitstellt;
 - Beaufschlagen der stationären Einspritzparameter ($u_{e,k}$) mit den Korrektur-Einspritzparametern ($\Delta u_{e,k}$), um die angepassten Einspritzparameter ($u_{e,k}^*$) zu erhalten.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Korrektur-Einspritzparameter ($\Delta u_{e,k}$) durch Invertieren eines vorgegebenen Verbrennungszyklusmodell als das Korrektur-Einspritzparametermodell mithilfe eines Optimierungsverfahrens bestimmt werden, wobei das Verbrennungszyklusmodell einem kombiniert physikalisch / datenbasierten Modell zur Beschreibung von physikalischen Vorgängen in einem Zylinder (2) des Verbrennungsmotors (1) entspricht.
3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei das Optimierungsverfahren zur Optimierung einer oder mehrerer Schadstoffemissionen oder eines Kraftstoffverbrauchs insbesondere mit jeweils individuell anpassbaren Gewichtungen durchgeführt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei eine Randbedingung des Optimierungsverfahrens zur Optimierung so gewählt wird, dass ein generiertes Motormoment bzw. ein indizierter Mitteldruck ($p_{mi,k}^{\text{Arbeitsspiel}}$) der Verbrennung konstant bleibt.
5. Verfahren nach Anspruch 2, wobei das Korrekturinspritzparametermodell mit Hilfe eines offline gelernten vorgegebenen datenbasierten nicht-parametrischen Modell, insbesondere eines Gauß-Prozess-Modells, vorgegeben wird.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei für das Korrekturinspritzparametermodell relevante Eingangsgrößen eine oder mehrere der folgenden Größen umfassen:
 - einen Gasdruck ($p_{IM}(t)$), eine Gastemperatur ($T_{IM}(t)$) und eine Sauerstoffkonzentration ($X_{IM}^{O_2}(t)$) in einem Einlasskrümmer des Verbrennungsmotors (1),
 - einen Gasdruck ($p_{EM}(t)$), eine Gastemperatur ($T_{EM}(t)$) und eine Sauerstoffkonzentration ($X_{EM}^{O_2}(t)$) nun einem Auslasskrümmer des Verbrennungsmotors (1),
 - einen Kraftstoffdruck ($p_r(t)$),
 - eine Motordrehzahl (n),
 - ein Sollmoment ($M_{soll}^{\text{Arbeitsspiel}}$) oder einen indizierten Soll-Mitteldruck ($p_{mi,soll}^{\text{Arbeitsspiel}}$) des Arbeitsspiels.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei eine oder mehrere der Eingangsgrößen des Korrekturinspritzparametermodells abhängig von einem Unterschied zwischen einem oder mehreren tatsächlichen Verbrennungsmerkmale einer Verbrennung in dem Zylinder (2) des Verbrennungsmotors (1) und einem oder mehreren modellierten Verbrennungsmerkmalen der Verbrennung in dem Zylinder (2) des Verbrennungsmotors (1) korrigiert werden.
8. Verfahren nach Anspruch 7, wobei das eine oder die mehreren modellierten Verbrennungsmerkmale basierend auf mindestens einem Teil der Eingangsgrößen für das Korrekturinspritzparametermodell und den angepassten Einspritzpara-

metern ($u_{e,k}^*$) gemäß einem Verbrennungszyklusmodell ermittelt werden, das insbesondere mithilfe eines datenbasierten nicht-parametrischen Modells, insbesondere eines Gauß-Prozess-Modells, vorgegeben ist.

9. Vorrichtung, insbesondere Steuereinheit (10), zum Betreiben eines Verbrennungsmotors (1) in einem Motorsystem durch Vorgabe eines Einspritzprofils, das durch angepasste Einspritzparameter ($u_{e,k}^*$) definiert ist, wobei die Vorrichtung ausgebildet ist, um:

- stationäre Einspritzparameter ($u_{e,k}$) anhand eines vorgegebenen Stationär-Einspritzprofilkennfelds zu ermitteln;
- Korrektur-Einspritzparameter ($\Delta u_{e,k}$) anhand eines vorgegebenen Korrektur-Einspritzparametermodells, das Korrektur-Einspritzparameter ($\Delta u_{e,k}$) abhängig von einer oder mehreren Zustandsgrößen eines Luftzuführungs- und/oder Abgasabführungssystems (3, 4) des Verbrennungsmotors (1) bereitstellt, zu ermitteln; und
- die stationären Einspritzparameter ($u_{e,k}$) mit den Korrektur-Einspritzparametern ($\Delta u_{e,k}$) zu beaufschlagen, um die angepassten Einspritzparameter ($u_{e,k}^*$) zu erhalten.

10. Motorsystem umfassend:

- einen Verbrennungsmotor (1);
- eine Vorrichtung nach Anspruch 9.

11. Computerprogramm, welches dazu eingerichtet ist, alle Schritte eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 8 auszuführen.

12. Maschinenlesbares Speichermedium, auf welchem ein Computerprogramm nach Anspruch 11 gespeichert ist.

FIG. 1

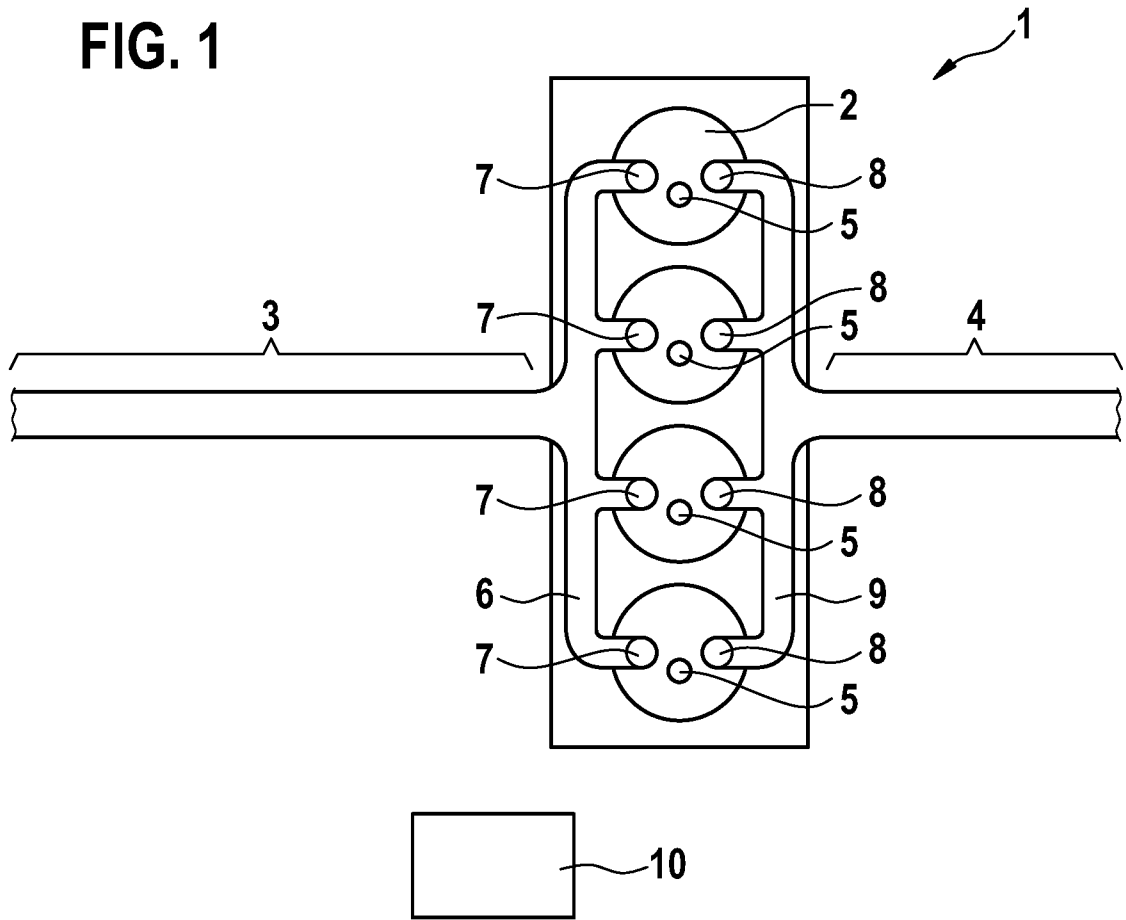


FIG. 2

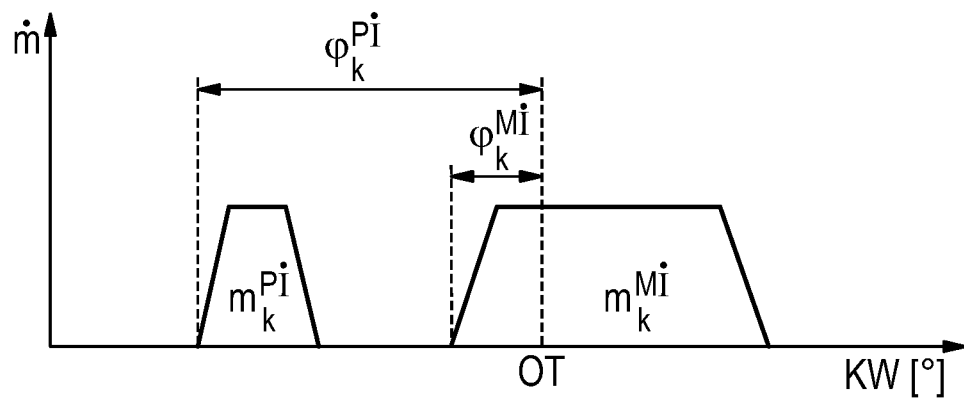
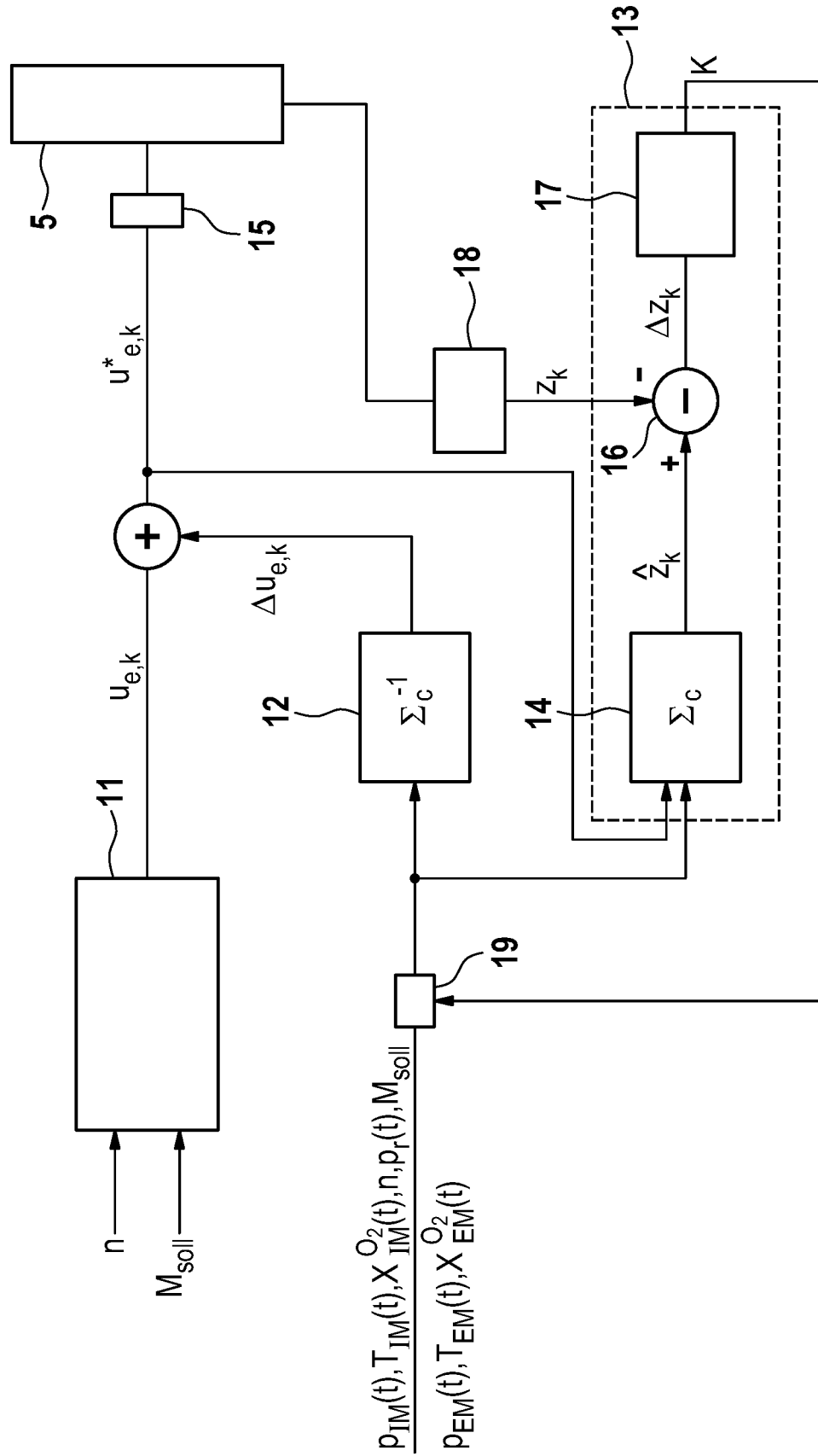


FIG. 3



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2017/055515

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
 INV. F02D41/24 F02D41/26 F02D41/40 F02D41/30 F02D41/14
 F02D41/00
 ADD.
 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)
 F02D

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	DE 10 2006 061659 A1 (SIEMENS AG [DE]) 3 July 2008 (2008-07-03)	1-4,6-12
Y	abstract figure 2 paragraph [0032] - paragraph [0038] paragraph [0041] - paragraph [0042] -----	5
X	DE 10 2008 001081 A1 (BOSCH GMBH ROBERT [DE]) 15 October 2009 (2009-10-15)	1-12
Y	abstract paragraph [0019] paragraph [0031] - paragraph [0035] -----	5
A	DE 10 2013 200932 A1 (BOSCH GMBH ROBERT [DE]) 24 July 2014 (2014-07-24) abstract the whole document -----	1-12

Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

<p>"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>"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)</p> <p>"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>"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</p> <p>"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</p> <p>"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</p> <p>"&" document member of the same patent family</p>
---	---

Date of the actual completion of the international search 19 May 2017	Date of mailing of the international search report 29/05/2017
--	--

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 Kämper, Fabian
--	--

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2017/055515

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
DE 102006061659 A1	03-07-2008	CN 101568712 A	28-10-2009
		DE 102006061659 A1	03-07-2008
		US 2010095929 A1	22-04-2010
		WO 2008080843 A1	10-07-2008

DE 102008001081 A1	15-10-2009	DE 102008001081 A1	15-10-2009
		FR 2929995 A1	16-10-2009
		JP 5280283 B2	04-09-2013
		JP 2009250243 A	29-10-2009
		US 2009259385 A1	15-10-2009

DE 102013200932 A1	24-07-2014	NONE	

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES		
INV.	F02D41/24	F02D41/26
	F02D41/40	F02D41/30
	F02D41/14	
ADD.		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
B. RECHERCHIERTE GEBIETE		
Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)		
F02D		
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	DE 10 2006 061659 A1 (SIEMENS AG [DE]) 3. Juli 2008 (2008-07-03)	1-4,6-12
Y	Zusammenfassung Abbildung 2 Absatz [0032] - Absatz [0038] Absatz [0041] - Absatz [0042] -----	5
X	DE 10 2008 001081 A1 (BOSCH GMBH ROBERT [DE]) 15. Oktober 2009 (2009-10-15)	1-12
Y	Zusammenfassung Absatz [0019] Absatz [0031] - Absatz [0035] -----	5
A	DE 10 2013 200932 A1 (BOSCH GMBH ROBERT [DE]) 24. Juli 2014 (2014-07-24) Zusammenfassung das ganze Dokument -----	1-12
<input type="checkbox"/> Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen <input checked="" type="checkbox"/> 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
19. Mai 2017		29/05/2017
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 Kämper, Fabian

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2017/055515

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 102006061659 A1	03-07-2008	CN 101568712 A	28-10-2009
		DE 102006061659 A1	03-07-2008
		US 2010095929 A1	22-04-2010
		WO 2008080843 A1	10-07-2008

DE 102008001081 A1	15-10-2009	DE 102008001081 A1	15-10-2009
		FR 2929995 A1	16-10-2009
		JP 5280283 B2	04-09-2013
		JP 2009250243 A	29-10-2009
		US 2009259385 A1	15-10-2009

DE 102013200932 A1	24-07-2014	KEINE	
