

(19)



(11)

**EP 3 436 681 B1**

(12)

## EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des  
Hinweises auf die Patenterteilung:  
**02.06.2021 Patentblatt 2021/22**

(51) Int Cl.:  
**F02D 41/24** <sup>(2006.01)</sup> **F02D 41/26** <sup>(2006.01)</sup>  
**F02D 41/40** <sup>(2006.01)</sup> **F02D 41/30** <sup>(2006.01)</sup>  
**F02D 41/14** <sup>(2006.01)</sup> **F02D 41/00** <sup>(2006.01)</sup>

(21) Anmeldenummer: **17710200.1**

(86) Internationale Anmeldenummer:  
**PCT/EP2017/055515**

(22) Anmeldetag: **09.03.2017**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:  
**WO 2017/167561 (05.10.2017 Gazette 2017/40)**

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

METHOD AND DEVICE FOR OPERATING AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE WITH A  
VARIABLE INJECTION PROFILE

PROCÉDÉ ET DISPOSITIF PERMETTANT DE FAIRE FONCTIONNER UN MOTEUR À  
COMBUSTION INTERNE AVEC UN PROFIL D'INJECTION VARIABLE

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB  
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO  
PL PT RO RS SE SI SK SM TR**

- **BITZER, Matthias**  
**70569 Stuttgart (DE)**
- **GRODDE, Stefan**  
**70469 Stuttgart (DE)**
- **KOTMAN, Philipp**  
**70499 Stuttgart (DE)**
- **MAKOWICKI, Thomas**  
**08060 Zwickau (DE)**

(30) Priorität: **30.03.2016 DE 102016205241**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:  
**06.02.2019 Patentblatt 2019/06**

(73) Patentinhaber: **Robert Bosch GmbH**  
**70442 Stuttgart (DE)**

(56) Entgegenhaltungen:  
**DE-A1-102006 061 659 DE-A1-102008 001 081**  
**DE-A1-102013 200 932**

(72) Erfinder:  
• **FISCHER, Wolfgang**  
**70839 Gerlingen (DE)**

**EP 3 436 681 B1**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

**Beschreibung**

Technisches Gebiet

5 **[0001]** 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.

10 Technischer Hintergrund

**[0002]** 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.

**[0003]** 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.

20 Dies kann zu erhöhten Schadstoffemissionen führen

**[0004]** DE 10 2008 001081 A1 betrifft eine Vorrichtung zum Steuern einer Brennkraftmaschine mit Selbstzündung des Luft-/Kraftstoff-Gemisches und Zumessung von Kraftstoff über ein Kraftstoffeinspritzventil, wobei mindestens ein Einspritzparameter bezüglich der Kraftstoffzumessung abhängig von mindestens einer Betriebsgröße der Brennkraftmaschine unter der Annahme eines stationären Betriebszustandes ermittelt wird. Ferner wird bei Vorliegen des instationären Betriebszustandes eine Ist-Brennraumtemperatur abhängig von einem physikalischen Modell für transienten Betrieb der Brennkraftmaschine abhängig von der Soll-Brennraumtemperatur und mindestens einer der Betriebsgrößen der Brennkraftmaschine ermittelt.

Offenbarung der Erfindung

30 **[0005]** 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.

**[0006]** Weitere Ausgestaltungen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

35 **[0007]** 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;
- 40 - Ermitteln von Korrektur-Einspritzparametern anhand eines vorgegebenen Korrektureinspritzparametermodells, das Korrektureinspritzparameter abhängig von einer oder mehreren Zustandsgrößen eines Luftzuführungssystems des Verbrennungsmotors bereitstellt;
- Beaufschlagen der stationären Einspritzparameter mit den Korrektureinspritzparametern, um die angepassten Einspritzparameter zu erhalten.

45 **[0008]** 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.

50 **[0009]** Insgesamt sieht das obige Verfahren vor, den Verbrennungsprozess während eines Arbeitstaktes des Verbrennungsmotors (Gaswechsel, Kompression und Verbrennung) 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 Korrektureinspritzparametermodells, 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.

**[0010]** Weiterhin werden die Korrektur-Einspritzparameter durch Invertieren eines vorgegeben Verbrennungszyklusmodells als das Korrektoreinspritzparametermodell mithilfe eines Optimierungsverfahrens bestimmt, 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 kurbelwinkel aufgelöste 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.

**[0011]** Erfindungsgemäß wird das Optimierungsverfahren zur Optimierung einer oder mehrerer Schadstoffemissionen (Ruß, NOx, ...) oder eines Kraftstoffverbrauchs mit jeweils individuell anpassbaren Gewichtungen durchgeführt. Durch die Wahl der Randbedingung des Optimierungsverfahrens zur Optimierung kann gewährleistet werden, dass das generierte Motormoment bzw. der indizierte Mitteldruck des Arbeitsspiels konstant bleibt.

**[0012]** Alternativ kann das Korrektoreinspritzparametermodell 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.

**[0013]** Es kann vorgesehen sein, dass für das Korrektoreinspritzparametermodell 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.

**[0014]** Weiterhin können eine oder mehrere der Eingangsgrößen des Korrektoreinspritzparametermodells 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 Korrektoreinspritzparametermodell anhand des Vergleichs vorhergesagter und gemessener Verbrennungsmerkmale vorgenommen werden.

**[0015]** Insbesondere können das eine oder die mehreren modellierten Verbrennungsmerkmale basierend auf mindestens einem Teil der Eingangsgrößen für das Korrektoreinspritzparametermodell 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.

**[0016]** Der Kern des Verbrennungszyklusmodells zur Berechnung der Verbrennungsmerkmale kann prinzipiell identisch mit dem des Korrektoreinspritzparametermodells sein, d. h. physikalisch/datenbasierte Modellstruktur zur Beschreibung der Gaswechsel-, Kompressions- und Verbrennungsphase. Innerhalb des Korrektoreinspritzparametermodells werden die Modelle der Verbrennungsphase anhand einer Gütefunktion, die aus den entsprechenden Vorhersagewerten für Emissionen usw. gebildet wird, hinsichtlich der Korrektoreinspritzparameter 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.

**[0017]** 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 Korrektoreinspritzparametermodells, das Korrektur-Einspritzparameter abhängig von einer oder mehreren Zustandsgrößen eines Luftzuführungs- und/oder Abgasabfuhrungssystems des Verbrennungsmotors bereitstellt, zu ermitteln; und
- die stationären Einspritzparameter mit den Korrektoreinspritzparametern zu beaufschlagen, um die angepassten Einspritzparameter zu erhalten.

#### Kurzbeschreibung der Zeichnungen

**[0018]** 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

**[0019]** 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.

**[0020]** 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.

**[0021]** 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).

**[0022]** 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.

**[0023]** 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 transients Betriebssituationen.

**[0024]** 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.

**[0025]** 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  $\varphi_k^{PI}$  dem relativen Anfangszeitpunkt bzw. Startwinkel der Voreinspritzung (PI),  $\varphi_k^{MI}$  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.

**[0026]** 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.

**[0027]** 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.

**[0028]** Dazu wird betriebspunktabhängig, d.h. abhängig von einer Motordrehzahl n des Verbrennungsmotors 1 und dem Sollmoment  $M_{soll}$  (entspricht arbeitsspielindividuelles  $M_{soll}^{Arbeitspiel}$ ), 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.

**[0029]** Das Einspritzprofilkennfeld kann als Look-up-Tabelle oder als Funktionsmodell, wie z.B. einem Gaußprozessmodell zur Verfügung gestellt werden.

**[0030]** 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.

**[0031]** 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 Korrektoreinspritzparametermodell berechnet werden.

**[0032]** Das Korrektoreinspritzparametermodell kann z.B. einem durch ein per Online-Optimierung invertiertes Zylindermodell  $\Sigma_C^{-1}$  entsprechen, das auf einem Verbrennungszyklusmodell  $\Sigma_C$  basiert. Das Verbrennungszyklusmodell  $\Sigma_C$  bildet die physikalischen Vorgänge in den Zylindern ab.

**[0033]** 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.

**[0034]** 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.

**[0035]** Die für das Korrektoreinspritzparametermodell 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  $p_f(t)$ ,
- eine Motordrehzahl  $n$ ,
- ein Sollmoment  $M_{soll}^{Arbeitspiel}$  oder einen Soll-Mitteldruck (indiziert) IMEP  $p_{mi,soll}^{Arbeitspiel}$  des Arbeitsspiels.

**[0036]** Zur Reduktion der Modellkomplexität ist es möglich, auch nur eine Auswahl dieser Eingangsgrößen zu berücksichtigen.

**[0037]** 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  $u_{e,k}^*$ .

**[0038]** 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.

**[0039]** Zur Berechnung des Verbrennungszyklusmodells  $\Sigma_C$ , 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  $p_f(t)$ , die Motordrehzahl  $n$  sowie die entsprechende

korrigierten Einspritzparameter  $u_{e,k}^*$  vorgegeben. Die Ausgangsgrößen des Verbrennungszyklusmodells  $\Sigma_C$  können neben den Verbrennungsmerkmalen  $\hat{z}_k$ , wie in dem Modellblock 14 dargestellt, beispielsweise auch die Schad-

stoffemissionen  $\varepsilon_{NO_x}$  (Stickoxidemissionen),  $\varepsilon_{PM}$  (Rußemissionen) oder der indizierte Mitteldruck  $p_{mi,k}^{Arbeitspiel}$  des gesamten Arbeitsspiels sein, wie in Anpassungsblocks 12 verwendet (nicht in Figur 2 dargestellt).

**[0040]** Das Verbrennungszyklusmodell  $\Sigma_C$  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

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

( $\varphi$  entspricht dem Kurbelwellenwinkel) der Zylinderfüllung eines Zylinders (Masse  $m$ , Sauerstoffmasse  $m^{O_2}$  und Zylinder-

derdruck  $p$ ) für den Zeitpunkt des Öffnens des Auslassventils 8 ( $t \hat{=} t_k^{\text{AÖ}}$  bzw.  $\varphi \hat{=} \varphi_k^{\text{AÖ}}$ ), des Schließens des  
 Einlassventils 7 ( $t \hat{=} t_k^{\text{ES}}$  bzw.  $\varphi \hat{=} \varphi_k^{\text{ES}}$ ) und des Starts der ersten Voreinspritzung ( $t \hat{=} t_k^{\text{PI}}$  bzw.  $\varphi \hat{=} \varphi_k^{\text{PI}}$ ) mit-  
 einander gekoppelt. Hinsichtlich der Modellierung sind die einzelnen Phasen wie folgt charakterisiert:

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

- Gesamtmassenbilanzgleichung

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

$\dot{m}_{\text{AV}}$  : Massenstrom durch das Auslassventil  
 $\dot{m}_{\text{EV}}$  : Massenstrom durch das Einlassventil

- Sauerstoffmassenbilanzgleichung

$$\frac{dm^{\text{O}_2}(t)}{dt} = \dot{m}_{\text{AV}}^{\text{O}_2}(t) - \dot{m}_{\text{EV}}^{\text{O}_2}(t)$$

$\dot{m}_{\text{AV}}^{\text{O}_2}$  : Sauerstoffmassenstrom durch das Auslassventil  
 $\dot{m}_{\text{EV}}^{\text{O}_2}$  : Sauerstoffmassenstrom durch das Einlassventil

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

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

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

- 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

$$\varphi_k^{AÖ} < \varphi \leq \varphi_k^{ES} \quad \text{bzw.} \quad t_k^{AÖ} < t \leq t_k^{ES}$$

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

$V_H$  : Hubvolumen des Zylinders

**[0041]** 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.

$$t_k^{ES} < t \leq t_k^{PI}$$

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

**[0042]** Während der Verbrennungsphase kann eine datenbasierte Approximation der Verbrennungsphase durch eine Gauß-Prozess-Regression zur Beschreibung der Ausgangsgrößen, wie beispielsweise von Schadstoffemissionen  $\varepsilon_{NO_x}$ ,

$\varepsilon_{PM}$  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

**[0043]** 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)

$$m(t_k^{A\ddot{O}}) = m(t_k^{PI}) + (m_k^{PI} + m_k^{MI})$$

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

$$m^{O_2}(t_k^{A\ddot{O}}) = m^{O_2}(t_k^{PI}) - \mu^{O_2}(m_k^{PI} + m_k^{MI})$$

$\mu^{O_2}$  : stöchiometrischer Faktor (Sauerstoffbedarf)

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

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

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

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

$$\varepsilon_{NO_x} \approx M_{GPR,NO_x}^{A\ddot{O}}(x(t_k^{PI}), u_{e,k}, p_r, n_E)$$

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

- [0044]** Die Berechnung des indizierten Mitteldrucks des gesamten Arbeitsspiels  $p_{mi,k}^{Arbeitsspiel}$  erfolgt entsprechend

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

- [0045]** Die Bestimmung der Korrektoreinspritzparameter  $\Delta u_{e,k}$  in Anpassungsblock 12 kann durch eine optimierungsbasierte Inversion des Verbrennungszyklusmodells  $\Sigma_C$  erreicht werden, um das Korrektoreinspritzparametermodell zu erhalten und um damit die Korrektoreinspritzparameter  $\Delta u_{e,k}$  zu bestimmen. Dazu wird das Verbrennungszyklusmodell  $\Sigma_C$  hinsichtlich der Einspritzparameter invertiert, um ein invertiertes Verbrennungszyklusmodell  $\Sigma_C^{-1}$  zu erhalten. Die Invertierung eines Gaußprozessmodells ist aus dem Stand der Technik bekannt und kann beispielsweise mithilfe eines Newton-Verfahrens vorgenommen werden.

- [0046]** 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  $\varepsilon_{NO_x}$ ,  $\varepsilon_{PM}$ , den Kraftstoffverbrauch oder dergleichen zu optimieren und dabei andererseits das für das Ar-

- beitsspiel gewünschte Sollmoment  $M_{soll}^{Arbeitsspiel}$  bzw. den damit korrelierten indizierten Mitteldruck  $p_{pmi,soll}^{Arbeitsspiel}$  unter Berücksichtigung des Gaswechsels und der Kompression zu erzielen.

- [0047]** Für die Bestimmung der Korrektoreinspritzparameter  $\Delta u_{e,k}$  werden die für die Verbrennungsphase gültigen

Gauß-Prozess-Modelle (bezüglich Stickoxidemissionen  $\varepsilon_{NO_x}$ , Rußemissionen  $\varepsilon_{PM}$  oder des indizierten Mitteldrucks

$p_{mi}^{Verbrennung}$  der Verbrennungsphase, ...) entsprechend einer Optimierung invertiert, so dass man abhängig von frei formulierbaren Optimierungszielen für die Schadstoffemissionen  $\varepsilon_{NO_x}$ ,  $\varepsilon_{PM}$  und dem für das Arbeitsspiel einzuhaltenden

indizierten Mitteldruck  $p_{pmi,soll}^{Arbeitsspiel}$  die entsprechenden Korrektur-Einspritzparameter  $\Delta u_{e,k}$  des Einspritzprofils erhalten kann.

**[0048]** Die Optimierung, die durch eine Minimierung einer Gütefunktion unter Beachtung von vorgegebenen Randbedingungen erfolgen kann, kann die folgende mathematische Struktur aufweisen:

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

**[0049]** Nebenbedingung der Optimierung:

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

**[0050]** Dies entspricht einem physikalisch / datenbasierten Modell der Gaswechsel-,Kompressions- und Verbrennungsphase entsprechend des Verbrennungszyklusmodells  $\Sigma_C$  mit  $\Delta u_{e,k}$  als zulässigen Wertebereich der Korrektur-Einspritzparameter  $\Delta u_{e,k}$ ,  $w_{...}$  den Gewichtungsfaktoren der jeweiligen Gütefunktionselemente und der Gesamteinspritz-

menge  $m_k^{PI} + m_k^{MI}$ , hier beispielhaft für 2 Einspritzungen.

**[0051]** 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 Einstellungsgrenzen 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.

**[0052]** Als Optimierungsverfahren zur Bestimmung der Korrektur-Einspritzparameter  $\Delta u_{e,k}$  kommen herkömmliche Optimierungsverfahren wie Gradientenabstiegsverfahren oder dergleichen in Betracht.

**[0053]** 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

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

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

**[0054]** Die Optimierungsvariablen sind die Korrektoreinspritzparameter  $\Delta u_{e,k}$ , die die gesuchten Korrekturwerte der durch Motordrehzahl  $n$  und Soll-Moment  $M_{\text{soll}}$  bestimmten stationären Einspritzparameter  $u_{e,k}$  darstellen.

**[0055]** Die Verbrennungsschwerpunktlage  $\varphi_{50}$  (beschreibt den Kurbelwellenwinkel, an dem 50% des eingebrachten Kraftstoffs chemisch umgesetzt wurden) und/oder andere Verbrennungsmerkmale  $z_k$  (z. B.  $\varphi_{10}$ ,  $\varphi_{90}$ , Kurbelwinkelposition und Wert des Zylinderspitzenendrucks, 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.

**[0056]** Man kann zusätzliche eine Korrektur des für die Optimierung verwendeten Verbrennungszyklusmodells vorsehen. Die Korrektur kann durch Anpassung von deren Eingangsgrößen erfolgen.

**[0057]** 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  $\varphi_{50}$ , sowie  $\varphi_{10}$ ,  $\varphi_{90}$  (Kurbelwinkelpositionen nach 10%iger oder 90%iger Verbrennung des Kraftstoffs), die Kurbelwinkelposition und der Wert des Zylinderspitzenendrucks 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  $\hat{z}_k$ , die anhand von Zustandsgrößen des Verbrennungsmotors 1 in einem Verbrennungsmerkmalblock 18 bestimmten werden, ergibt sich dabei eine Abweichung mit einem Fehler  $\Delta z_k$ .

**[0058]** 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  $\Delta z_k$  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.

## Patentansprüche

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 Korrektoreinspritzparametermodells, 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 Korrektoreinspritzparametern  $(\Delta u_{e,k})$ , um die angepassten Einspritzparameter  $(u_{e,k}^*)$  zu erhalten,

wobei die Korrektur-Einspritzparameter  $(\Delta u_{e,k})$  durch Invertieren eines vorgegeben Verbrennungszyklusmodell als das Korrektoreinspritzparametermodell 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, wobei das Optimierungsverfahren zur Optimierung einer oder mehrerer Schadstoffemissionen oder eines Kraftstoffverbrauchs mit jeweils individuell anpassbarer Gewichtung durchgeführt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei eine Randbedingung des Optimierungsverfahrens zur Optimierung so gewählt wird, dass ein generiertes Motormoment oder ein indizierter Mitteldruck  $(p_{mi,k}^{Arbeitsspiel})$  der Verbrennung konstant bleibt.

3. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Korrektoreinspritzparametermodell mithilfe eines offline gelernten vorgegebenen datenbasierten nicht-parametrischen Modell, insbesondere eines Gauß-Prozess-Modells, vorgegeben wird.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei für das Korrektoreinspritzparametermodell 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 ( $p_f(t)$ ),

- eine Motordrehzahl ( $n$ ),

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

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei eine oder mehrere der Eingangsgrößen des Korrektoreinspritzparametermodells abhängig von einem Unterschied zwischen einem oder mehreren tatsächlichen Verbrennungsmerkmalen 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.

6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei das eine oder die mehreren modellierten Verbrennungsmerkmale basierend auf mindestens einem Teil der Eingangsgrößen für das Korrektoreinspritzparametermodell und den angepassten Einspritzparametern ( $u_{e,k}^*$ ) gemäß einem Verbrennungszyklusmodell ermittelt werden, das insbesondere mithilfe eines datenbasierten nicht-parametrischen Modells, insbesondere eines Gauß-Prozess-Modells, vorgegeben ist.

7. 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 Korrektoreinspritzparametermodells, 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 Korrektoreinspritzparametern ( $\Delta u_{e,k}$ ) zu beaufschlagen, um

die angepassten Einspritzparameter ( $u_{e,k}^*$ ) zu erhalten,

wobei die Korrektur-Einspritzparameter ( $\Delta u_{e,k}$ ) durch Invertieren eines vorgegebenen Verbrennungszyklusmodell als das Korrektoreinspritzparametermodell 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, wobei das Optimierungsverfahren zur Optimierung einer oder mehrerer Schadstoffemissionen oder eines Kraftstoffverbrauchs mit jeweils individuell anpassbarer Gewichtung durchgeführt wird.

8. Motorsystem umfassend:

- einen Verbrennungsmotor (1);

- eine Vorrichtung nach Anspruch 7.

9. Computerprogramm, welches dazu eingerichtet ist, alle Schritte eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 6 auf einer Vorrichtung gemäß Anspruch 7 auszuführen.
10. Maschinenlesbares Speichermedium, auf welchem ein Computerprogramm nach Anspruch 9 gespeichert ist.

## Claims

1. Method for operating an internal combustion engine (1) by specifying 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 specified steady-state injection profile characteristic diagram;
- determining correction injection parameters  $(\Delta u_{e,k})$  on the basis of a specified correction injection parameter model which makes available correction injection parameters  $(\Delta u_{e,k})$  as a function of one or more state variables of an air feed system (3) and/or exhaust gas discharge system (4) of the internal combustion engine (1);
- applying the correction injection parameters  $(\Delta u_{e,k})$  to the steady-state injection parameters  $(u_{e,k})$ , in order to

obtain the adapted injection parameters  $(u_{e,k}^*)$ ,

wherein the correction injection parameters  $(\Delta u_{e,k})$  are determined by inverting a specified combustion cycle model as the correction injection parameter model using an optimization method, wherein the combustion cycle model corresponds to a combined physical/data-based model for describing physical processes in a cylinder (2) of the internal combustion engine (1), wherein the optimization method is carried out to optimize one or more pollutant emissions or a fuel consumption value with a respectively individually adaptable weighting.

2. Method according to Claim 1, wherein a boundary condition of the optimization method is selected for the optimization,

such that a generated engine torque or an indexed mean pressure  $(\rho_{mi,k}^{work\ cycle})$  of the combustion remains constant.

3. Method according to Claim 1, wherein the correction injection parameter model is specified using a specified, data-based, non-parametric model, in particular a Gaussian process model, which is learnt offline.

4. Method according to one of Claims 1 to 3, wherein input variables which are relevant for the correction injection parameter model comprise one or more of the following variables:

- a gas pressure  $(\rho_{IM}(t))$ , a gas temperature  $(T_{IM}(t))$  and an oxygen concentration  $(X_{IM}^{O_2}(t))$  in an inlet manifold of the internal combustion engine (1),
- a gas pressure  $(\rho_{EM}(t))$ , a gas temperature  $(T_{EM}(t))$  and an oxygen concentration  $(X_{EM}^{O_2}(t))$  in an outlet manifold of the internal combustion engine (1),
- a fuel pressure  $(\rho_f(t))$ ,
- an engine speed  $(n)$ ,
- a setpoint torque  $(\rho_{setp}^{work\ cycle})$  or an indexed setpoint mean pressure  $(\rho_{mi,setp}^{work\ cycle})$  of the work cycle.

5. Method according to one of Claims 1 to 4, wherein one or more of the input variables of the correction injection parameter model are corrected as a function of a difference between one or more actual combustion features of a combustion in the cylinder (2) of the internal combustion engine (1) and one or more modelled combustion features of the combustion in the cylinder (2) of the internal combustion engine (1).

6. Method according to Claim 5, wherein the one or more modelled combustion features are determined on the basis of at least some of the input variables for the correction injection parameter model and the adapted injection parameters  $(u_{e,k})$  according to a combustion cycle model which is specified, in particular, using a data-based, non-parametric model, in particular a Gaussian process model.

7. Device, in particular control unit (10), for operating an internal combustion engine (1) in an engine system by specifying an injection profile which is defined by adapted injection parameters  $(u_{e,k}^*)$ , wherein the device is designed:

5  
- to determine steady-state injection parameters  $(u_{e,k})$  on the basis of a specified steady-state injection profile characteristic diagram;  
- to determine correction injection parameters  $(\Delta u_{e,k})$  on the basis of a specified correction injection parameter model, which makes available correction injection parameters  $(\Delta u_{e,k})$  as a function of one or more state variables of an air feed system and/or exhaust gas discharge system (3, 4) of the internal combustion engine (1); and  
10  
- to apply the correction injection parameters  $(\Delta u_{e,k})$  to the steady-state injection parameters  $(u_{e,k})$ , in order to obtain the adapted injection parameters  $(u_{e,k}^*)$ ,

15 wherein the correction injection parameters  $(\Delta u_{e,k})$  are determined by inverting a specified combustion cycle model as the correction injection parameter model using an optimization method, wherein the combustion cycle model corresponds to a combined physical/data-based model for describing physical processes in a cylinder (2) of the internal combustion engine (1), wherein the optimization method is carried out to optimize one or more pollutant emissions or a fuel consumption value with a respectively individually adaptable weighting.

- 20  
8. Engine system comprising:

- an internal combustion engine (1); and  
25  
- a device according to Claim 7.

9. Computer program which is configured to carry out all the steps of a method according to one of Claims 1 to 6, on a device according to Claim 7.

- 30  
10. Machine-readable storage medium in which a computer program according to Claim 9 is stored.

## Revendications

- 35  
1. Procédé permettant de faire fonctionner un moteur à combustion interne (1) par spécification d'un profil d'injection qui est défini par des paramètres d'injection adaptés  $(u_{e,k}^*)$ , comprenant les étapes suivantes consistant à

40  
- établir des paramètres d'injection stationnaires  $(u_{e,k})$  à l'aide d'un diagramme caractéristique de profil d'injection stationnaire spécifié ;  
- établir des paramètres d'injection de correction  $(\Delta u_{e,k})$  à l'aide d'un modèle paramétrique d'injection de correction spécifié qui fournit des paramètres d'injection de correction  $(\Delta u_{e,k})$  en fonction d'une ou de plusieurs grandeurs d'état d'un système d'alimentation en air (3) et/ou d'un système d'évacuation de gaz d'échappement (4) du moteur à combustion interne (1) ;  
45  
- appliquer aux paramètres d'injection stationnaires  $(u_{e,k})$  des paramètres d'injection de correction  $(\Delta u_{e,k})$  afin d'obtenir les paramètres d'injection adaptés  $(u_{e,k}^*)$ ,

50 les paramètres d'injection de correction  $(\Delta u_{e,k})$  étant déterminés en inversant un modèle de cycle de combustion spécifié en tant que modèle paramétrique d'injection de correction à l'aide d'un procédé d'optimisation, le modèle de cycle de combustion correspondant à un modèle combiné basé sur des données et physique pour décrire des processus physiques dans un cylindre (2) du moteur à combustion interne (1), dans lequel le procédé d'optimisation est effectué avec une pondération pouvant respectivement être adaptée individuellement pour l'optimisation d'une ou de plusieurs émissions de polluants ou d'une consommation de carburant.

- 55  
2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel une contrainte du procédé d'optimisation pour l'optimisation est sélectionnée de telle sorte qu'un couple moteur généré ou une pression moyenne indexée  $(p_{mi,k}^{cycle\ de\ travail})$

de la combustion reste constant (e).

3. Procédé selon la revendication 1, dans lequel le modèle paramétrique d'injection de correction est spécifié à l'aide d'un modèle non paramétrique, basé sur des données, spécifié, appris hors ligne, en particulier d'un modèle de processus de Gauss.

4. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel des grandeurs d'entrée pertinentes pour le modèle paramétrique d'injection de correction comprennent une ou plusieurs des grandeurs suivantes :

- une pression de gaz ( $p_{IM}(t)$ ), une température de gaz ( $T_{IM}(t)$ ) et une concentration en oxygène ( $X_{IM}^{O_2}(t)$ ) dans un collecteur d'admission du moteur à combustion interne (1),

- une pression de gaz ( $p_{EM}(t)$ ), une température de gaz ( $T_{EM}(t)$ ) et une concentration en oxygène ( $X_{EM}^{O_2}(t)$ ) dans un collecteur d'échappement du moteur à combustion interne (1),

- une pression de carburant ( $p_f(t)$ ),

- un régime du moteur ( $n$ ),

- un couple théorique ( $M_{mi,théorique}^{cycle\ de\ travail}$ ) ou une pression moyenne théorique indexée ( $p_{mi,théorique}^{cycle\ de\ travail}$ ) du cycle de travail.

5. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel une ou plusieurs des grandeurs d'entrée du modèle paramétrique d'injection de correction sont corrigées en fonction d'une différence entre une ou plusieurs caractéristiques de combustion réelles d'une combustion dans le cylindre (2) du moteur à combustion interne (1) et une ou plusieurs caractéristiques de combustion modélisées de la combustion dans le cylindre (2) du moteur à combustion interne (1).

6. Procédé selon la revendication 5, dans lequel ladite une ou les plusieurs caractéristiques de combustion modélisées sont établies sur la base d'au moins une partie des grandeurs d'entrée pour le modèle paramétrique d'injection de correction et des paramètres d'injection adaptés ( $u_{e,k}^*$ ) selon un modèle de cycle de combustion qui est spécifié en particulier à l'aide d'un modèle non paramétrique basé sur des données, en particulier d'un modèle de processus de Gauss.

7. Dispositif, en particulier unité de commande (10), permettant de faire fonctionner un moteur à combustion interne (1) dans un système de moteur par spécification d'un profil d'injection qui est défini par des paramètres d'injection adaptés ( $u_{e,k}^*$ ), le dispositif étant réalisé pour :

- établir des paramètres d'injection stationnaires ( $u_{e,k}$ ) à l'aide d'un diagramme caractéristique de profil d'injection stationnaire spécifié ;

- établir des paramètres d'injection de correction ( $\Delta u_{e,k}$ ) à l'aide d'un modèle paramétrique d'injection de correction spécifié qui fournit des paramètres d'injection de correction ( $\Delta u_{e,k}$ ) en fonction d'une ou de plusieurs grandeurs d'état d'un système d'alimentation en air et/ou d'un système d'évacuation de gaz d'échappement (3, 4) du moteur à combustion interne (1) ; et

- appliquer aux paramètres d'injection stationnaires ( $u_{e,k}$ ) des paramètres d'injection de correction ( $\Delta u_{e,k}$ ) afin d'obtenir les paramètres d'injection adaptés ( $u_{e,k}^*$ ),

les paramètres d'injection de correction ( $\Delta u_{e,k}$ ) étant déterminés en inversant un modèle de cycle de combustion spécifié en tant que modèle paramétrique d'injection de correction à l'aide d'un procédé d'optimisation, le modèle de cycle de combustion correspondant à un modèle combiné basé sur des données et physique pour décrire des processus physiques dans un cylindre (2) du moteur à combustion interne (1), dans lequel le procédé d'optimisation est effectué avec une pondération pouvant respectivement être adaptée individuellement pour l'optimisation d'une ou de plusieurs émissions de polluants ou d'une consommation de carburant.

8. Système de moteur, comprenant :

### EP 3 436 681 B1

- un moteur à combustion interne (1),
- un dispositif selon la revendication 7.

5 9. Programme informatique qui est aménagé pour exécuter toutes les étapes d'un procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6 sur un dispositif selon la revendication 7.

10. Support de stockage lisible par machine sur lequel est stocké un programme informatique selon la revendication 9.

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

FIG. 1

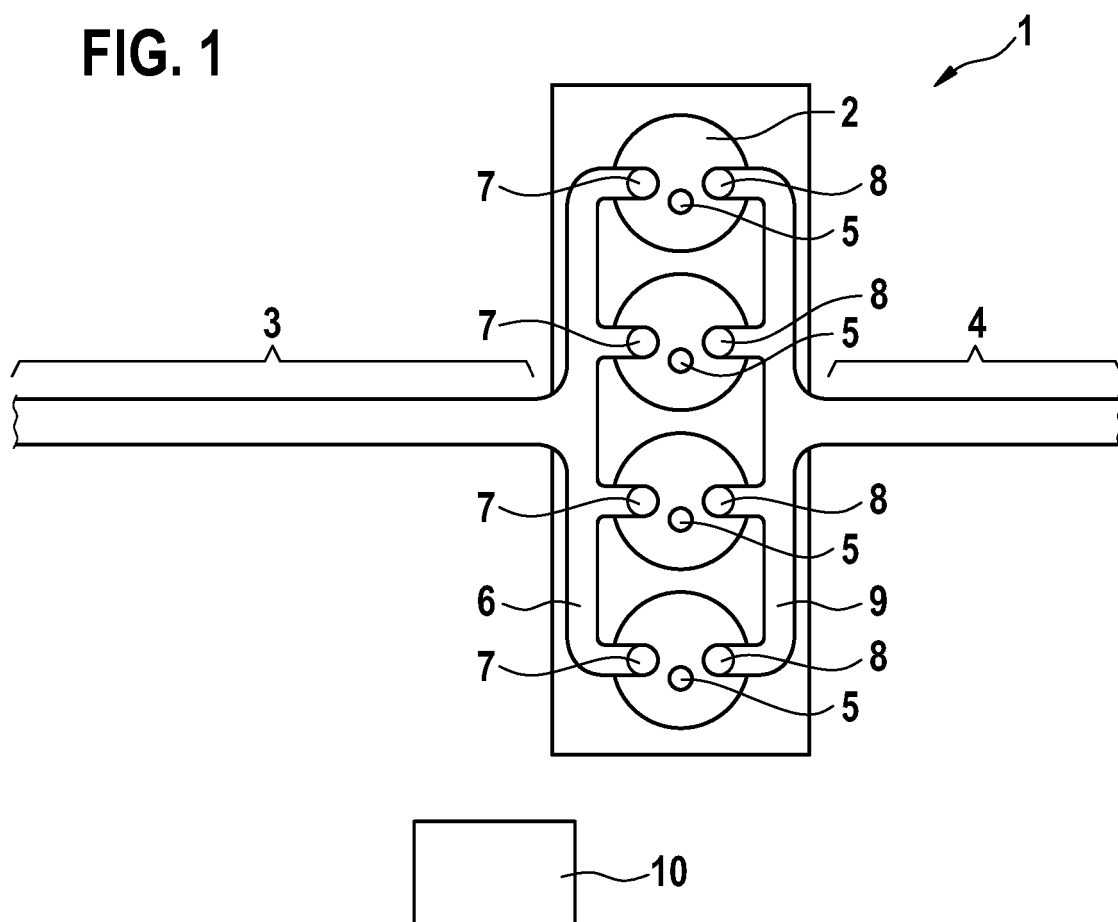


FIG. 2

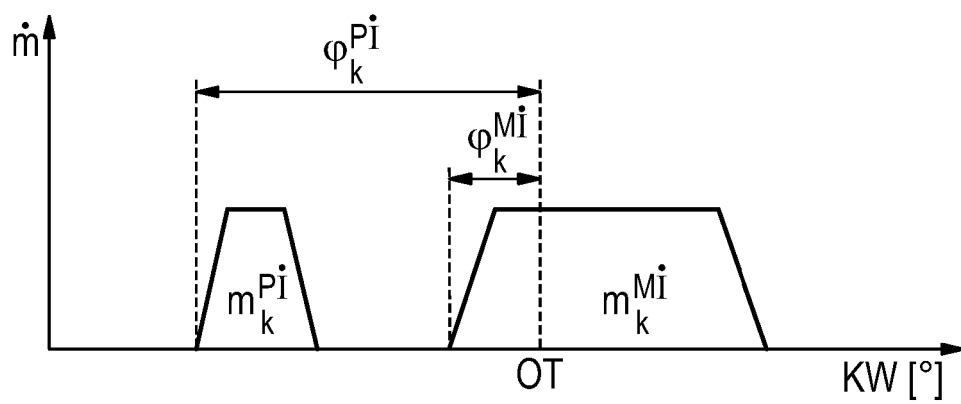
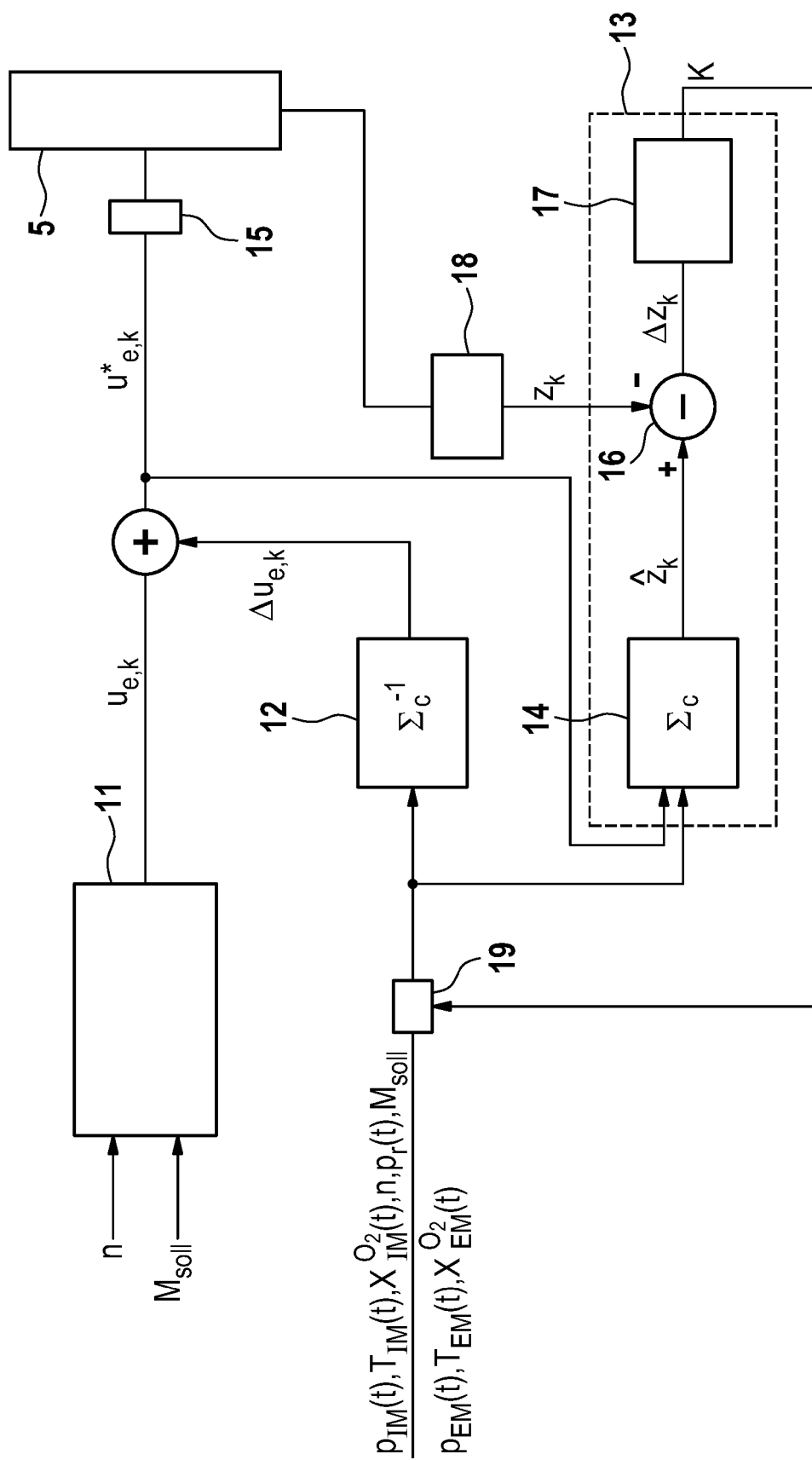


FIG. 3



**IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE**

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

**In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente**

- DE 102008001081 A1 **[0004]**

**In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur**

- **C. E. RASMUSSEN et al.** Gaussian Processes for Machine Learning. MIT Press, 2006 **[0034]**