

(19)



(11)

EP 4 158 176 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:

14.05.2025 Patentblatt 2025/20

(21) Anmeldenummer: **21729461.0**

(22) Anmeldetag: **25.05.2021**

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):

F02D 41/14 ^(2006.01) **F02D 35/02** ^(2006.01)

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):

F02D 41/1406; F02D 35/02; F02D 2041/1412;
F02D 2041/1433; F02D 2200/0402

(86) Internationale Anmeldenummer:

PCT/EP2021/063945

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:

WO 2021/239752 (02.12.2021 Gazette 2021/48)

(54) **VERFAHREN ZUR MODELLBASIERTEN STEUERUNG UND REGELUNG EINER BRENNKRAFTMASCHINE**

METHOD FOR THE MODEL-BASED OPEN-LOOP AND CLOSED-LOOP CONTROL OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE

PROCÉDÉ DE COMMANDE REPOSANT SUR UN MODÈLE EN BOUCLE OUVERTE ET EN BOUCLE FERMÉE D'UN MOTEUR À COMBUSTION INTERNE

(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**

(30) Priorität: **27.05.2020 DE 102020003174**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:

05.04.2023 Patentblatt 2023/14

(73) Patentinhaber: **Rolls-Royce Solutions GmbH
88045 Friedrichshafen (DE)**

(72) Erfinder:

- **NIEMEYER, Jens**
88045 Friedrichshafen (DE)
- **GEISELHART, Roman**
89134 Blaustein (DE)
- **GRAICHEN, Knut**
90562 Heroldsberg (DE)

• **BERGMANN, Daniel**

88339 Bad Waldsee (DE)

(74) Vertreter: **Kordel, Mattias et al**

Gleiss Große Schrell und Partner mbB

Patentanwälte Rechtsanwälte

Leitzstrasse 45

70469 Stuttgart (DE)

(56) Entgegenhaltungen:

WO-A1-2018/234093 DE-A1- 102017 114 731

- **MAKAROW ARTEMI ET AL: "Model Predictive Trajectory Set Control with Adaptive Input Domain Discretization", 2018 ANNUAL AMERICAN CONTROL CONFERENCE (ACC), AACC, 27 June 2018 (2018-06-27), pages 3159 - 3164, XP033387513, DOI: 10.23919/ACC.2018.8431313**

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).

EP 4 158 176 B1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur modellbasierten Steuerung und Regelung einer Brennkraftmaschine, bei dem von einem Optimierer ein Gütemaß berechnet und als maßgeblich für den Betriebspunkt der Brennkraftmaschine gesetzt wird.

[0002] Das Verhalten einer Brennkraftmaschine wird maßgeblich über ein Motorsteuergerät in Abhängigkeit eines Leistungswunsches bestimmt. Hierzu sind in der Software des Motorsteuergeräts üblicherweise entsprechende Kennlinien und Kennfelder appliziert. Über diese werden aus dem Leistungswunsch die Stellgrößen der Brennkraftmaschine berechnet, zum Beispiel der Spritzbeginn und ein erforderlicher Raildruck. Mit Daten bestückt werden diese Kennlinien/-

Kennfelder beim Hersteller der Brennkraftmaschine auf einem Prüfstand. Die Vielzahl dieser Kennlinien/Kennfelder und die Korrelation der Kennlinien/Kennfelder untereinander verursachen allerdings einen hohen Abstimmungsaufwand.

[0003] In der Praxis wird daher versucht den Abstimmungsaufwand durch die Verwendung von mathematischen Modellen zu reduzieren. So beschreibt zum Beispiel die DE 10 2006 004 516 B3 ein Bayesnetz mit Wahrscheinlichkeitstabellen zur Festlegung einer Einspritzmenge und die US 2011/0172897 A1 ein Verfahren zur Adaption des Spritzbeginns sowie der Spritzmenge über Verbrennungsmodelle mittels neuronaler Netze. Da hierbei trainierten Daten abgebildet werden, müssen diese zuerst bei einem Prüfstandslauf gelernt werden.

[0004] Aus der DE 10 2017 005 783 A1 ist ein Verfahren zur modellbasierten Steuerung und Regelung einer Brennkraftmaschine bekannt, bei dem über ein Verbrennungsmodell die Sollwerte für die Einspritzsystem-Stellglieder und über ein Gaspfadmodell die Sollwerte für die Gaspfad-Stellglieder berechnet werden. Sowohl das Verbrennungsmodell als auch das Gaspfadmodell basieren auf Gauß-Prozessmodellen. Aus den Sollwerten bestimmt ein Optimierer wiederum ein Gütemaß und prognostiziert wie sich das Gütemaß bei einer Veränderung der Sollwerte innerhalb eines Prädiktionshorizonts entwickeln würde. Ist das bestmögliche Gütemaß berechnet, so setzt der Optimierer die Einspritzsystem-Sollwerte und die Gaspfad-Sollwerte als maßgeblich für den Betriebspunkt der Brennkraftmaschine.

[0005] Aus der WO 2018/234093 A1 ist ein Verfahren zur modellbasierten Steuerung und Regelung einer Brennkraftmaschine bekannt, die eine Optimierung aufweist.

[0006] Bei Prüfstandsversuchen hat es sich gezeigt, dass die Einbindung von Stellgrößen mit diskreten Schaltzuständen in das zuvor beschriebene modellbasierte Verfahren noch nicht zufriedenstellend ist. Unter Stellgrößen mit diskreten Schaltzuständen sind zum Beispiel die Zuschaltung des zweiten Abgasturboladers bei einer Registeraufladung, eine Zylinderbank-Abschaltung, die Aktivierung einer Vor- oder Nacheinspritzung und die Auf- oder Schließstellung diverser Klappen zu verstehen. Sogenannte Branch- und Boundverfahren zur optimalen Lösungsfindung bei diskreten Stellgrößen sind sehr rechenaufwendig, da im schlechtesten Fall alle kombinatorischen Möglichkeiten der diskreten Stellgrößen untersucht werden müssen. Deren Anwendung bei einer Brennkraftmaschine führt rasch zu sehr komplexen Strukturen, welche auf einem Motorsteuergerät nicht darstellbar sind.

[0007] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, das zuvor beschriebene modellbasierte Verfahren hinsichtlich der Einbindung von Stellgrößen zu verbessern.

[0008] Gelöst wird diese Aufgabe durch die Merkmale von Anspruch 1. Die Ausgestaltungen sind in den Unteransprüchen dargestellt.

[0009] Das Verfahren wird in drei Schritten ausgeführt. Im ersten Schritt berechnet der Optimierer in Abhängigkeit der Betriebssituation ein voroptimiertes Gütemaß, wobei die diskrete Stellgrößen mit diskreten Einstellwerten als kontinuierliche Stellgrößen mit einem kontinuierlichen Einstellbereich interpretiert werden. Das voroptimierte Gütemaß ist eine Rechengröße, das heißt, dieses wird nicht der Brennkraftmaschine aufgeschaltet. Im zweiten Schritt werden dann diese kontinuierlichen Stellgrößen quantisiert und als neue diskrete Stellgrößen mit diskreten Einstellwerten gesetzt. Die Quantisierung erfolgt anhand von Schaltschwellen nebst Hysterese. Schließlich wird dann im dritten Schritt vom Optimierer ein nachoptimiertes Gütemaß in Abhängigkeit der neuen diskreten Stellgrößen und der Betriebssituation der Brennkraftmaschine berechnet und als maßgeblich für den Betriebspunkt der Brennkraftmaschine gesetzt. Bei der Berechnung des nachoptimierten Gütemaßes werden allerdings die neuen diskreten Stellgröße als fest angenommen. Sie stellen insofern keinen Freiheitsgrad mehr für die Optimierung innerhalb des prädierten Horizonts dar. Die übrigen kontinuierlichen Stellgrößen werden so reoptimiert, dass die Lösung bezüglich der fixierten neuen Stellgrößen bestmöglich ist.

[0010] Unter Betriebssituation der Brennkraftmaschine sind sowohl die äußeren Rahmenbedingungen, insbesondere die Emissionsgrenzwerte oder der Leistungswunsch, als auch der aktuelle Betriebspunkt zu verstehen. Sowohl das voroptimierte Gütemaß als auch das nachoptimierte Gütemaß werden bestimmt, indem über das Verbrennungsmodell die Einspritzsystem-Sollwerte zur Ansteuerung der Einspritzsystem-Stellglieder, zum Beispiel der Soll-Raildruck, berechnet werden, über ein Gaspfadmodell die Gaspfad-Sollwerte zur Ansteuerung der Gaspfad-Stellglieder berechnet werden und anschließend vom Optimierer diese Sollwerte mit dem Ziel einer Minimumfindung verändert werden.

[0011] Die Erfindung gestattet die Lösung von Optimierungsaufgaben mit teilweise wertkontinuierlichen und teilweise wertdiskreten Eingangsgrößen bei beschränkter Rechenkapazität für das verwendete Optimierungsverfahren. Anstelle einer parallelen Berechnung der Stellgrößen, wie es für die Umsetzung von Branch- und-Bound-Verfahren erforderlich ist,

verwendet die Erfindung eine serielle Methodik. Erst hierdurch können das Gütemaß und die hieraus sich ergebenden Werte für die Stellgrößen vollumfänglich auf einem Motorsteuergerät berechnet werden.

[0012] In den Figuren ist ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel dargestellt. Es zeigen:

- 5 Fig. 1 ein Systemschaubild,
- Fig. 2 ein modellbasiertes Systemschaubild,
- Fig. 3 ein Blockschaltbild,
- Fig. 4 einen Programm-Ablaufplan,
- Fig. 5 ein Unterprogramm,
- 10 Fig. 6 ein Unterprogramm,
- Fig. 7 ein Unterprogramm,
- Fig. 8 Zeitdiagramme und
- Fig. 9 Zeitdiagramme.

15 **[0013]** Die Figur 1 zeigt ein Systemschaubild einer elektronisch gesteuerten Brennkraftmaschine 1 mit einem Common-Railsystem. Das Common-Railsystem umfasst folgende mechanische Komponenten: eine Niederdruckpumpe 3 zur Förderung von Kraftstoff aus einem Kraftstofftank 2, eine veränderbare Saugdrossel 4 zur Beeinflussung des durchströmenden Kraftstoff-Volumenstroms, eine Hochdruckpumpe 5 zur Förderung des Kraftstoffs unter Druckerhöhung, ein Rail 6 zum Speichern des Kraftstoffs und Injektoren 7 zum Einspritzen des Kraftstoffs in die Brennräume der Brennkraftmaschine 1. Optional kann das Common-Railsystem auch mit Einzelspeichern ausgeführt sein, wobei dann zum
20 Beispiel im Injektor 7 ein Einzelspeicher 8 als zusätzliches Puffervolumen integriert ist. Die weitere Funktionalität des Common-Railsystem wird als bekannt vorausgesetzt. Der dargestellte Gaspfad umfasst sowohl die Luftzuführung als auch die Abgasabführung. In der Luftzuführung sind angeordnet: der Verdichter eines Abgasturboladers 11, eine Ladeluftkühler 12, eine Drosselklappe 13, eine Einmündungsstelle 14 zur Zusammenführung der Ladeluft mit dem rückgeführten Abgas und ein variabel ansteuerbares Einlassventil 15. In der Abgasführung sind angeordnet: ein variabel
25 ansteuerbares Auslassventil 16, ein AGR-Stellglied 17, die Turbine des Abgasturboladers 11 und ein Turbinen-Bypassventil 18.

[0014] Die Betriebsweise der Brennkraftmaschine 1 wird durch ein elektronisches Steuergerät 10 (ECU) bestimmt. Das elektronische Steuergerät 10 beinhaltet die üblichen Bestandteile eines Mikrocomputersystems, beispielsweise einen
30 Mikroprozessor, I/O-Bausteine, Puffer und Speicherbausteine (EEPROM, RAM). In den Speicherbausteinen sind die für den Betrieb der Brennkraftmaschine 1 relevanten Betriebsdaten als Modelle appliziert. Über diese berechnet das elektronische Steuergerät 10 aus den Eingangsgrößen die Ausgangsgrößen. In der Figur 1 sind exemplarisch folgende Eingangsgrößen dargestellt: Ein Sollmoment $M(SOLL)$, welches von einem Bediener vorgegeben wird, der Ist-Raildruck p_{CR} , der mittels eines Rail-Drucksensors 9 gemessen wird, die Motordrehzahl n_{IST} , der Ladeluftdruck p_{LL} , die Ladelufttemperatur T_{LL} , die Feuchte ϕ der Ladeluft, die Abgastemperatur T_{Abgas} , das Luft-Kraftstoffverhältnis λ , der NO_x -Istwert, optional der Druck p_{ES} des Einzelspeichers 8 und eine Eingangsgröße EIN . Unter der Eingangsgröße EIN sind die weiteren nicht dargestellten Sensorsignale zusammengefasst, beispielsweise die Kühlmitteltemperaturen. In
35 Figur 1 sind als Ausgangsgrößen des elektronischen Steuergeräts 10 dargestellt: ein Signal PWM zur Ansteuerung der Saugdrossel 4, ein Signal ve zur Ansteuerung der Injektoren 7 (Spritzbeginn/ Spritzende), ein Stellsignal DK zur Ansteuerung der Drosselklappe 13, ein Stellsignal VVT zur Ansteuerung des Einlass- bzw. Auslassventils, ein Stellsignal AGR zur Ansteuerung des AGR-Stellglieds 17, ein Stellsignal TBP zur Ansteuerung des Turbinen-Bypassventils 18 und eine Ausgangsgröße AUS . Die Ausgangsgröße AUS steht stellvertretend für die weiteren Stellsignale zur Steuerung und Regelung der Brennkraftmaschine 1, beispielsweise für ein Stellsignal zur Aktivierung eines zweiten Abgasturboladers bei einer Registeraufladung. Bei der Darstellung der Figur 1 sind beispielsweise die Drosselklappe 13, das AGR-Stellglied
40 17, das Turbinen-Bypassventil 18 oder die Saugdrossel 4 mit einem kontinuierlichen Stellsignal ansteuerbar und sind daher in einem kontinuierlichen Wertebereich einstellbar. Eine diskrete Stellgröße wäre hingegen das Stellsignal zur Aktivierung eines zweiten Abgasturboladers, da dieses Stellsignal nur einzelne diskrete Werte annehmen kann, Zwischenwerte also nicht existieren.

[0015] Die Figur 2 zeigt ein modellbasiertes Systemschaubild. Bei dieser Darstellung sind innerhalb des elektronischen Steuergeräts 10 ein Verbrennungsmodell 19, ein Gaspfadmodell 20 und ein Optimierer 21 aufgeführt. Sowohl das Verbrennungsmodell 19 als auch das Gaspfadmodell 20 bilden das Systemverhalten der Brennkraftmaschine als
50 mathematische Gleichungen ab, beispielsweise in Form von Gauß-Prozessmodellen. Das Verbrennungsmodell 19 bildet statisch die Vorgänge bei der Verbrennung ab. Im Unterschied hierzu bildet das Gaspfadmodell 20 das dynamische Verhalten der Luftführung und der Abgasführung ab. Das Verbrennungsmodell 19 beinhaltet Einzelmodelle zum Beispiel für die NO_x - und Rußentstehung, für die Abgastemperatur, für den Abgasmassenstrom und für den Spitzendruck. Diese Einzelmodelle wiederum sind abhängig von den Randbedingungen im Zylinder und den Parametern der Einspritzung. Bestimmt wird das Verbrennungsmodell 19 bei einer Referenz-Brennkraftmaschine in einem Prüfstandslauf, dem sogenannte DoE-Prüfstandslauf (DoE: Design of Experiments). Beim DoE-Prüfstandslauf werden systematisch Be-
55

triebsparameter und Stellgrößen mit dem Ziel variiert, das Gesamtverhalten der Brennkraftmaschine in Abhängigkeit von motorischen Größen und Umweltrandbedingungen abzubilden. Der Optimierer 21 wertet das Verbrennungsmodell 19 aus und zwar hinsichtlich des Sollmoments $M(\text{SOLL})$, der Emissionsgrenzwerte, der Umweltrandbedingungen, zum Beispiel die Feuchte ϕ der Ladeluft, und der Betriebssituation der Brennkraftmaschine. Definiert wird die Betriebs-
 5 situation durch die Motordrehzahl n_{IST} , die Ladelufttemperatur T_{LL} , den Ladeluftdruck p_{LL} usw.. Die Funktion des Optimierers 21 besteht nun darin die Einspritzsystem-Sollwerte zur Ansteuerung der Einspritzsystem-Stellglieder und die Gaspfad-Sollwerte zur Ansteuerung der Gaspfad-Stellglieder zu bewerten. Hierbei wählt der Optimierer 21 diejenige Lösung aus, bei der ein Gütemaß minimiert wird. Berechnet wird das Gütemaß als Integral der quadratischen Soll-
 10 Istabweichungen innerhalb des Prädiktionshorizonts. Beispielsweise in der Form:

$$(1) \quad J = \int [w_1(N_{\text{Ox}}(\text{SOLL}) - N_{\text{Ox}}(\text{IST}))^2 + [w_2(M(\text{SOLL}) - M(\text{IST}))]^2 + [w_3(\dots)] +$$

[0016] Hierin bedeuten w_1 , w_2 und w_3 einen entsprechenden Gewichtungsfaktor. Bekanntermaßen ergeben sich die Stickoxidemission aus der Feuchte ϕ der Ladeluft, der Ladelufttemperatur T_{LL} , dem Spritzbeginn SB und dem Raildruck p_{CR} .
 15

[0017] Vom Optimierer 21 wird das bestmögliche Gütemaß über Minimumfindung ermittelt, indem zu einem ersten Zeitpunkt ein erstes Gütemaß berechnet wird, die Einspritzsystem-Sollwerte sowie die Gaspfad-Sollwerte variiert werden und anhand dieser ein zweites Gütemaß innerhalb des Prädiktionshorizonts prognostiziert wird. Anhand der Abweichung der beiden Gütemaße zueinander legt dann der Optimierer 21 ein minimales Gütemaß fest und setzt dieses als maßgeblich für die Brennkraftmaschine. Für das in der Figur dargestellte Beispiel ist dies für das Einspritzsystem der Soll-Raildruck $p_{\text{CR}}(\text{SL})$. Der Soll-Raildruck $p_{\text{CR}}(\text{SL})$ ist die Führungsgröße für den unterlagerten Raildruck-Regelkreis 22. Die Stellgröße des Raildruck-Regelkreises 22 entspricht dem PWM-Signal zu Beaufschlagung der Saugdrossel. Für den Gaspfad bestimmt der Optimierer 21 mittelbar die Gaspfad-Sollwerte. Bei dem dargestellten Beispiel sind dies ein Lambda-Sollwert $\text{LAM}(\text{SL})$ und ein AGR-Sollwert $\text{AGR}(\text{SL})$ zur Vorgabe für die beiden unterlagerten Regelkreise 23 und 24. Die rückgeführten Messgrößen MESS werden vom elektronischen Steuergerät 10 eingelesen. Unter den Messgrößen MESS sind sowohl unmittelbar gemessene physikalische Größen als auch daraus berechnete Hilfsgrößen zu verstehen. Bei dem dargestellten Beispiel werden der Lambda-Istwert $\text{LAM}(\text{IST})$ und der AGR-Istwert $\text{AGR}(\text{IST})$ eingelesen. Mit dem Bezugszeichen SG sind die Stellgrößen der Brennkraftmaschine zusammengefasst. Hierunter fallen sowohl die kontinuierlichen Stellgrößen mit einem kontinuierlichen Einstellbereich als auch die diskreten Stellgrößen mit diskreten Einstellwerten. Kontinuierliche Stellgrößen können zwischen einem minimalen und maximalen Wert stufenlos verstellt werden, beispielsweise der Spritzbeginn und das Spritzende mit welchen der Injektor (Fig. 1: 7) unmittelbar beaufschlagt wird. Diskrete Stellgrößen mit diskreten Einstellwerten können nur gestuft in Festwerten eingestellt werden, beispielsweise eine Zylinderabschaltung.
 20
 25
 30

[0018] Die Figur 3 zeigt ein Blockschaltbild mit der Betriebssituation BS der Brennkraftmaschine als Eingangsgröße und dem Gütemaß als Ausgangsgröße, hier als nachoptimiertes Gütemaß $J(\text{NA})$ bezeichnet. Innerhalb des Blockschaltbilds sind eine Voroptimierung 25, eine Quantisierung 26 und eine Nachoptimierung 27, dargestellt. In einem ersten Schritt wird über die Voroptimierung 25 ein voroptimiertes Gütemaß $J(\text{VO})$ berechnet, bei dem die diskreten Stellgrößen mit diskreten Einstellwerten als kontinuierliche Stellgrößen mit einem kontinuierlich Einstellbereich interpretiert werden.
 35

[0019] Ein Beispiel für eine diskrete Stellgröße ist die Voreinspritzung, welche nur aktiviert oder deaktiviert sein kann. Durch den Einsatz der Voreinspritzung kann der Spitzendruck der Verbrennung deutlich abgesenkt werden. Daneben ändern sich bei aktivierter Voreinspritzung aber auch alle andere Verbrennungsgrößen wie beispielsweise die NOx -Emission oder die Partikelanzahl. Die Brennkraftmaschine wird einmal mit aktivierter Voreinspritzung und einmal mit deaktivierter Voreinspritzung vermessen. Damit ergeben sich zwei separate Verbrennungsmodelle. Bei der Berechnung des voroptimierten Gütemaßes $J(\text{VO})$ werden vom Optimierer Zwischenwerte interpoliert, dies bedeutet, dass durch die Interpolation zwischen diesen beiden Verbrennungsmodellen der Zustand Voreinspritzung aktiviert oder deaktiviert künstlich in eine kontinuierliche Eingangsgröße gewandelt werden. In der Voroptimierung 25 wird dann diese Größe kontinuierlich verwendet. In der Figur 3 sind diese kontinuierlichen Stellgrößen als $\text{SG}(\text{k})$ bezeichnet. Das voroptimierte Gütemaß $J(\text{VO})$ ist eine rein interne Rechengröße, welches keinen Zugriff auf die Stellglieder der Brennkraftmaschine hat. Mit anderen Worten: das voroptimierte Gütemaß $J(\text{VO})$ ist zugriffsfrei und wird der Brennkraftmaschine nicht aufgeschaltet. In einem zweiten Schritt werden über die Quantisierung 26 neue diskrete Stellgrößen $\text{SG}(\text{neu})$ aus den kontinuierlichen Stellgrößen $\text{SG}(\text{k})$ berechnet. Für die Voreinspritzung wird folglich in der Quantisierung wieder eine feste Zuordnung zu Voreinspritzung aktiviert oder Voreinspritzung deaktiviert vorgenommen. Die Quantisierung 26 bietet den Vorteil, dass zum Beispiel die variable Ventilsteuerung auf drei diskrete Werte, nämlich Minimum, Mittelwert und Maximum festgelegt werden, zum Beispiel 450° , 495° und 540° Kurbelwellenwinkel. Dies reduziert im erheblichen Maße den Rechenaufwand bei der nachfolgenden Bestimmung des nachoptimierten Gütemaßes. Bei der Quantisierung 26 werden zudem die berechneten Werte über optionale Hysteresebänder stabilisiert. In einem dritten Schritt werden die neuen diskreten Stellgrößen $\text{SG}(\text{neu})$ und die Betriebssituation zusammengeführt und vom Optimierer ein nachoptimier-
 40
 45
 50
 55

tes Gütemaß $J(\text{NA})$ berechnet. Bei der Berechnung des nachoptimierten Gütemaßes $J(\text{NA})$ werden die neuen diskreten Stellgrößen $\text{SG}(\text{neu})$ nicht verändert. Insofern sind diese kein Freiheitsgrad bei der Berechnung des nachoptimierten Gütemaßes $J(\text{NA})$. In der Nachoptimierung werden die tatsächlich kontinuierlichen Stellgrößen an den aus der Quantisierung vorgegebenen Verlauf zum Beispiel der Voreinspritzung angepasst. Mit anderen Worten: Bei der Nachoptimierung werden die Stellgrößen variiert, die auch real durch kontinuierliche Stellgrößen beschrieben werden. Das nachoptimierte Gütemaß $J(\text{NA})$ entspricht dem minimalen Gütemaß $J(\text{min})$, welches vom Optimierer als maßgeblich für den Betriebspunkt der Brennkraftmaschine (1) gesetzt wird, also der Brennkraftmaschine aufgeschaltet wird.

[0020] In der Figur 4 ist das Verfahren in einem Programm-Ablaufplan dargestellt. Nach der Initialisierung bei S1 wird bei S2 geprüft, ob der Startvorgang beendet ist. Läuft dieser noch, Abfrageergebnis S2: nein, wird zum Punkt A zurückverzweigt. Ist der Startvorgang beendet, so wird bei S3 die Betriebssituation der Brennkraftmaschine erfasst. Definiert wird die Betriebssituation durch die Motordrehzahl n_{IST} , die Ladelufttemperatur TLL, den Ladeluftdruck pLL usw.. Bei S4 wird das Unterprogramm Optimierer aufgerufen und die Anfangswerte, zum Beispiel der Spritzbeginn, bei S5 erzeugt. Bei den Schritten S6 bis S8 werden nacheinander die Unterprogramme Vorooptimierung, Quantisierung und Nachoptimierung aufgerufen. Diese Unterprogramme werden in Verbindung mit den Figuren 5 bis 7 beschrieben. Das im Unterprogramm Nachoptimierung berechnete nachoptimierte Gütemaß wird als minimiertes Gütemaß $J(\text{min})$ gesetzt, welches den Betriebspunkt der Brennkraftmaschine bestimmt. Im Anschluss daran wird bei S10 geprüft, ob ein Motorstopp initiiert wurde. Ist dies nicht der Fall, Abfrageergebnis S10: nein, wird zum Punkt B zurückverzweigt. Anderenfalls ist der Programm-Ablaufplan beendet.

[0021] In der Figur 5 ist das Unterprogramm Vorooptimierung als Programm-Ablaufplan dargestellt. Bei S1 wird ein erstes Gütemaß $J1(\text{VO})$ der Vorooptimierung anhand der Gleichung (1) berechnet. Wesentliches Merkmal ist hierbei, dass bei der Berechnung des ersten Gütemaßes $J1(\text{VO})$ neben den kontinuierlichen Stellgrößen mit einem kontinuierlichen Stellbereich, die diskreten Stellgrößen mit diskreten Werten über Interpolation als kontinuierliche Stellgrößen interpretiert werden. Bei S2 wird eine Laufvariable i auf null gesetzt. Danach werden bei S3 die Anfangswerte verändert und als neue Sollwerte für die Stellgrößen berechnet. Bei S4 wird die Laufvariable i um eins erhöht. Anhand der neuen Sollwerte wird dann bei S5 ein zweites Gütemaß $J2(\text{VO})$ der Vorooptimierung innerhalb des Prädiktionshorizonts, zum Beispiel für die nächsten 8 Sekunden, prognostiziert. Bei S6 wird das zweite Gütemaß $J2(\text{VO})$ vom ersten Gütemaß $J1(\text{VO})$ subtrahiert und mit einem Grenzwert GW verglichen. Über die Differenzbildung der beiden Gütemaße wird der weitere Fortschritt des Gütemaßes abgeprüft. Alternativ wird anhand des Vergleichs der Laufvariablen i mit einem Grenzwert i_{GW} geprüft, wie oft bereits eine Optimierung durchlaufen wurde. Die beiden Grenzwertbetrachtungen sind insofern ein Abbruchkriterium für eine weitere Optimierung. Ist eine weitere Optimierung möglich, Abfrageergebnis S6: nein, so wird zum Punkt A zurück verzweigt. Anderenfalls wird bei S7 vom Optimierer das zweite Gütemaß $J2(\text{VO})$ als voroptimiertes Gütemaß $J(\text{VO})$ zusammen mit den dabei berechneten Stellgrößen ausgegeben und in das Hauptprogramm der Figur 4 zurückgekehrt. Das voroptimierte Gütemaß $J(\text{VO})$ ist eine reine Rechengröße, das heißt, vom Optimierer werden die berechneten Einspritzsystem-Sollwerte, die berechneten Gaspfad-Sollwerte und die berechneten Stellgrößen nicht der Brennkraftmaschine aufgeschaltet.

[0022] In der Figur 6 ist das Unterprogramm Quantisierung dargestellt. Bei S1 wird das voroptimierte Gütemaß $J(\text{VO})$ mit den zugehörigen Stellgrößen eingelesen. Anschließend werden diejenigen Stellgrößen mit ursprünglichen diskreten Einstellwerten diskretisiert. Dies erfolgt bei S2 anhand von entsprechenden Schwellwerten mit einem Hystereseband. Über das Hystereseband werden pendelnde Berechnungswerte vermieden. Anstelle eines Hysteresebands lassen sich auch andere Logiken verwenden, welche ein schnelles Umschalten verhindern, zum Beispiel eine Zeitsteuerung. Danach werden bei S3 die neuen diskreten Stellgrößen $\text{SG}(\text{neu})$ ausgegeben und in das Hauptprogramm der Figur 4 zurückgekehrt.

[0023] In der Figur 7 ist das Unterprogramm Nachoptimierung als Programm-Ablaufplan dargestellt. Über das Unterprogramm Nachoptimierung wird ein nachoptimiertes Gütemaß aus der Betriebssituation der Brennkraftmaschine und den neuen diskreten Stellgrößen $\text{SG}(\text{neu})$ bestimmt. Bei der Berechnung des nachoptimierten Gütemaßes werden die neuen diskreten Stellgrößen nicht nachgeführt. Bei S1 wird ein erstes Gütemaß $J1(\text{NA})$ der Nachoptimierung anhand der Gleichung (1) berechnet. Bei S2 wird eine Laufvariable i auf null gesetzt. Danach werden bei S3 die Anfangswerte verändert und als neue Sollwerte für die Stellgrößen berechnet. Bei S4 wird die Laufvariable i um eins erhöht. Anhand der neuen Sollwerte wird dann bei S5 ein zweites Gütemaß $J2(\text{NA})$ der Nachoptimierung innerhalb des Prädiktionshorizonts, zum Beispiel für die nächsten 8 Sekunden, prognostiziert. Bei S6 wird das zweite Gütemaß $J2(\text{VO})$ vom ersten Gütemaß $J1(\text{VO})$ subtrahiert und mit einem Grenzwert GW verglichen. Über die Differenzbildung der beiden Gütemaße wird der weitere Fortschritt des Gütemaßes abgeprüft. Alternativ wird anhand des Vergleichs der Laufvariablen i mit einem Grenzwert i_{GW} geprüft, wie oft bereits eine Optimierung durchlaufen wurde. Die beiden Grenzwertbetrachtungen sind insofern ein Abbruchkriterium für eine weitere Optimierung. Ist eine weitere Optimierung möglich, Abfrageergebnis S6: nein, so wird zum Punkt A zurück verzweigt. Anderenfalls wird bei S7 vom Optimierer das zweite Gütemaß $J2(\text{VO})$ als minimales Gütemaß $J(\text{min})$ ausgegeben und in das Hauptprogramm der Figur 4 zurückgekehrt.

[0024] Die beiden Figuren 8 und 9 zeigen in einer Gegenüberstellung den Verlauf von ausgewählten Größen über der Zeit in Sekunden. Dargestellte Größen sind: die variabel Ventilsteuerung VVT in Grad Kurbelwellenwinkel, der Spritz-

beginn SB in Grad vor dem oberen Totpunkt (OT), der Verbrennungsdruck p_{ZYL} im Zylinder und die Motordrehzahl n_{MOT} . Für den Verbrennungsdruck p_{ZYL} ist ergänzend der maximal zulässige Verbrennungsdruck p_{MAX} als gestrichelte Linie eingezeichnet. Auf der linken Zeichnungsblatthälfte sind diese Größen bei Anwendung der bisherigen Optimierung dargestellt, während auf der rechten Zeichnungsblatthälfte diese Größen bei Anwendung der Erfindung dargestellt sind.

Der Darstellung der Figur 8 und der Figur 9 ist ein stufenförmig ansteigendes Soll-Moment als Eingangsgröße zugrunde gelegt. Zunächst werden die Größen gemäß der Figur 8 beschrieben. In einem ersten Schritt wird vom Optimierer anhand der Betriebssituation über die Voroptimierung ein voroptimiertes Gütemaß berechnet. Bei dieser Berechnung werden die diskrete Stellgrößen mit diskreten Einstellwerten als kontinuierliche Stellgrößen mit einem kontinuierlichen Einstellbereich interpretiert. Für die variable Ventilsteuerung VVT ergibt sich dabei über den kompletten Zeitbereich ein kontinuierlicher Verlauf mit beliebigen Zwischenwerten. Für das VVT-Stellglied zur Ansteuerung des variablen Ventils mit drei definierten Stellerpositionen ist ein solcher Verlauf aber nicht darstellbar. Zum voroptimierten Gütemaß korrespondieren ein berechneter Spritzbeginn SB und der entsprechende Zylinderdruck p_{ZYL} . Beim Zylinderdruck p_{ZYL} wird der maximale Wert p_{MAX} eingehalten. Aus den Stellgröße resultiert eine ansteigende Motordrehzahl n_{MOT} im Betrachtungszeitraum. Nachfolgend wird die Figur 9 beschrieben. Der dargestellte VVT-Verlauf entspricht dem Verlauf nach der Quantisierung. Hierbei wird deutlich, dass im Unterschied zur Darstellung der Figur 8, der VVT-Verlauf nur drei diskrete Werte zeigt, nämlich 450° , 495° und 540° Kurbelwellenwinkel. Von Vorteil ist, dass das VVT-Stellglied mit lediglich drei Werten angesteuert werden kann, wodurch sich der Rechenaufwand deutlich reduziert. Aus dem VVT-Verlauf wird anhand der Betriebssituation der Brennkraftmaschine das nachoptimierte Gütemaß berechnet. Zu diesem korrespondiert der Verlauf des Spritzbeginns SB und der Zylinderdruck p_{ZYL} , der auch in diesem Fall unterhalb des maximalen Werts p_{MAX} bleibt.

Bezugszeichen

[0025]

- 1 Brennkraftmaschine
- 2 Kraftstofftank
- 3 Niederdruckpumpe
- 4 Saugdrossel
- 5 Hochdruckpumpe
- 6 Rail
- 7 Injektor
- 8 Einzelspeicher
- 9 Rail-Drucksensor
- 10 Elektronisches Steuergerät
- 11 Abgasturbolader
- 12 Ladeluftkühler
- 13 Drosselklappe
- 14 Einmündungsstelle
- 15 Einlassventil, variabel ansteuerbar
- 16 Auslassventil, variabel ansteuerbar
- 17 AGR-Stellglied (AGR: Abgasrückführung)
- 18 Turbinen-Bypassventil
- 19 Verbrennungsmodell
- 20 Gaspfadmodell
- 21 Optimierer
- 22 Raildruck-Regelkreis
- 23 Lambda-Regelkreis
- 24 AGR-Regelkreis
- 25 Voroptimierung
- 26 Quantisierung
- 27 Nachoptimierung

Patentansprüche

1. Verfahren zur modellbasierten Steuerung und Regelung einer Brennkraftmaschine (1), bei dem von einem Optimierer (21) in einem ersten Schritt ein voroptimiertes Gütemaß ($J(VO)$) in Abhängigkeit der Betriebssituation (BS) berechnet wird, wobei bei der Berechnung des voroptimierten Gütemaßes ($J(VO)$) neben weiteren kontinuierlichen Stellgrößen

mit einem kontinuierlichen Stellbereich diskrete Stellgrößen mit diskreten Einstellwerten als kontinuierliche Stellgrößen (SG(k)) mit einem kontinuierlichen Einstellbereich interpretiert werden, bei dem in einem zweiten Schritt diese kontinuierlichen Stellgrößen (SG(k)) quantisiert und als neue diskrete Stellgrößen (SG(neu)) mit diskreten Einstellwerten gesetzt werden, bei dem vom Optimierer (21) in einem dritten Schritt ein nachoptimiertes Gütemaß (J(NA)) in Abhängigkeit der neuen diskreten Stellgrößen (SG(neu)) und der Betriebssituation (BS) der Brennkraftmaschine (1) berechnet wird, wobei die neuen diskreten Stellgrößen (SG(neu)) als fest angenommen und die weiteren kontinuierlichen Stellgrößen reoptimiert werden, und vom Optimierer (21) das nachoptimierte Gütemaß (J(NA)) als maßgeblich für den Betriebspunkt der Brennkraftmaschine (1) gesetzt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** das voroptimierte Gütemaß (J(VO)) bestimmt wird, indem über ein Verbrennungsmodell (19) Einspritzsystem-Sollwerte zur Ansteuerung von Einspritzsystem-Stellgliedern berechnet werden, indem über ein Gaspfadmodell (20) Gaspfad-Sollwerte zur Ansteuerung von Gaspfad-Stellgliedern berechnet werden und indem die kontinuierlichen Stellgrößen (SG(k)) über Interpolation aus den diskreten Einstellwerten der diskreten Stellgrößen berechnet werden.

3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** das voroptimierte Gütemaß (J(VO)) der Brennkraftmaschine (1) nicht aufgeschaltet wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** im zweiten Schritt die kontinuierlichen Stellgrößen (SG(k)) über Schaltschwellen nebst Hysterese quantisiert werden.

5. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** das nachoptimierte Gütemaß (J(NA)) im dritten Schritt bestimmt wird, indem über das Verbrennungsmodell (19) Einspritzsystem-Sollwerte zur Ansteuerung von Einspritzsystem-Stellgliedern berechnet werden, über das Gaspfadmodell (20) Gaspfad-Sollwerte zur Ansteuerung von Gaspfad-Stellgliedern berechnet werden und indem vom Optimierer (21) die Einspritzsystem-Sollwerte und die Gaspfad-Sollwerte bei konstanten neuen diskreten Stellgrößen (SG(neu)) mit dem Ziel einer Minimumfindung innerhalb eines Prädiktionshorizonts verändert werden.

Claims

1. Method for the model-based open-loop and closed-loop control of an internal combustion engine (1), in which a pre-optimized quality measure (J(VO)) is calculated by an optimizer (21) in a first step in a manner dependent on the operating situation (BS), wherein, during the calculation of the pre-optimized quality measure (J(VO)), discrete control variables with discrete setting values are interpreted as continuous control variables (SG(k)) with a continuous range of setting in addition to further continuous control variables with a continuous range of adjustment, in which method these continuous control variables (SG(k)) are quantized and set as new discrete control variables (SG(new)) with discrete setting values in a second step, in which method a post-optimized quality measure (J(NA)) is calculated by the optimizer (21) in a third step in a manner dependent on the new discrete control variables (SG(new)) and the operating situation (BS) of the internal combustion engine (1), wherein the new discrete control variables (SG(new)) are assumed to be fixed and the further continuous control variables are re-optimized, and the post-optimized quality measure (J(NA)) is set by the optimizer (21) as being definitive for the operating point of the internal combustion engine (1).

2. Method according to Claim 1, **characterized in that** the pre-optimized quality measure (J(VO)) is determined by virtue of injection system setpoint values for the activation of injection system control elements being calculated by means of a combustion model (19), by virtue of gas path setpoint values for the activation of gas path control elements being calculated by means of a gas path model (20), and by virtue of the continuous control variables (SG(k)) being calculated from the discrete setting values of the discrete control variables by means of interpolation.

3. Method according to Claim 2, **characterized in that** the pre-optimized quality measure (J(VO)) of the internal combustion engine (1) is not offered.

4. Method according to Claim 3, **characterized in that** the continuous control variables (SG(k)) are quantized in the second step by means of switching thresholds together with hysteresis.

5. Method according to Claim 1, **characterized in that** the post-optimized quality measure (J(NA)) is determined in the third step by virtue of injection system setpoint values for the activation of injection system control elements being

calculated by means of the combustion model (19), gas path setpoint values for the activation of gas path control elements being calculated by means of the gas path model (20), and by virtue of the injection system setpoint values and the gas path setpoint values for constant new discrete control variables (SG(new)) being varied by the optimizer (21) with the aim of finding a minimum within a prediction horizon.

Revendications

1. Procédé de commande et de régulation à base de modèle d'un moteur à combustion interne (1), selon lequel un optimiseur (21) calcule dans une première étape une mesure de qualité pré-optimisée (J(VO)) en fonction de la situation de fonctionnement (BS), dans lequel lors du calcul de la mesure de qualité pré-optimisée (J(VO)), en plus de grandeurs de réglage continues supplémentaires ayant une plage de réglage continue, des grandeurs de réglage discrètes ayant des valeurs de réglage discrètes sont interprétées comme des grandeurs de réglage continues (SG(k)) ayant une plage de réglage continue, selon lequel, dans une deuxième étape, ces grandeurs de réglage continues (SG(k)) sont quantifiées et définies comme de nouvelles grandeurs de réglage discrètes (SG(nouv)) avec des valeurs de réglage discrètes, selon lequel l'optimiseur (21) calcule dans une troisième étape une mesure de qualité post-optimisée (J(NA)) en fonction des nouvelles grandeurs de réglage discrètes (SG(nouv)) et de la situation de fonctionnement (BS) du moteur à combustion interne (1), dans lequel les nouvelles grandeurs de réglage discrètes (SG(nouv)) sont supposées fixes et les grandeurs de réglage continues supplémentaires sont ré-optimisées, et l'optimiseur (21) définit la mesure de qualité post-optimisée (J(NA)) comme étant décisive pour le point de fonctionnement du moteur à combustion interne (1).
2. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** la mesure de qualité pré-optimisée (J(VO)) est déterminée, **en ce qu'un** modèle de combustion (19) permet de calculer des valeurs de consigne de système d'injection pour piloter des actionneurs du système d'injection, **en ce qu'un** modèle de trajet de gaz (20) permet de calculer des valeurs de consigne de trajet de gaz pour piloter des actionneurs de trajet de gaz, et **en ce que** les grandeurs de réglage continues (SG(k)) sont calculées par interpolation à partir des valeurs de réglage discrètes des grandeurs de réglage discrètes.
3. Procédé selon la revendication 2, **caractérisé en ce que** la mesure de qualité pré-optimisée (J(VO)) du moteur à combustion interne (1) n'est pas activée.
4. Procédé selon la revendication 3, **caractérisé en ce que** dans la deuxième étape, les grandeurs de réglage continues (SG(k)) sont quantifiées par l'intermédiaire de seuils de commutation en plus de l'hystérésis.
5. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** la mesure de qualité post-optimisée (J(NA)) est déterminée à la troisième étape **en ce que** le modèle de combustion (19) permet de calculer des valeurs de consigne de système d'injection pour piloter des actionneurs de système d'injection, le modèle de trajet de gaz (20) permet de calculer des valeurs de consigne de trajet de gaz pour piloter des actionneurs de trajet de gaz, et **en ce que** l'optimiseur (21) modifie les valeurs de consigne de système d'injection et les valeurs de consigne de trajet de gaz en présence de nouvelles valeurs de consigne discrètes (SG(nouv)) constantes dans le but de trouver un minimum dans un horizon de prédiction.

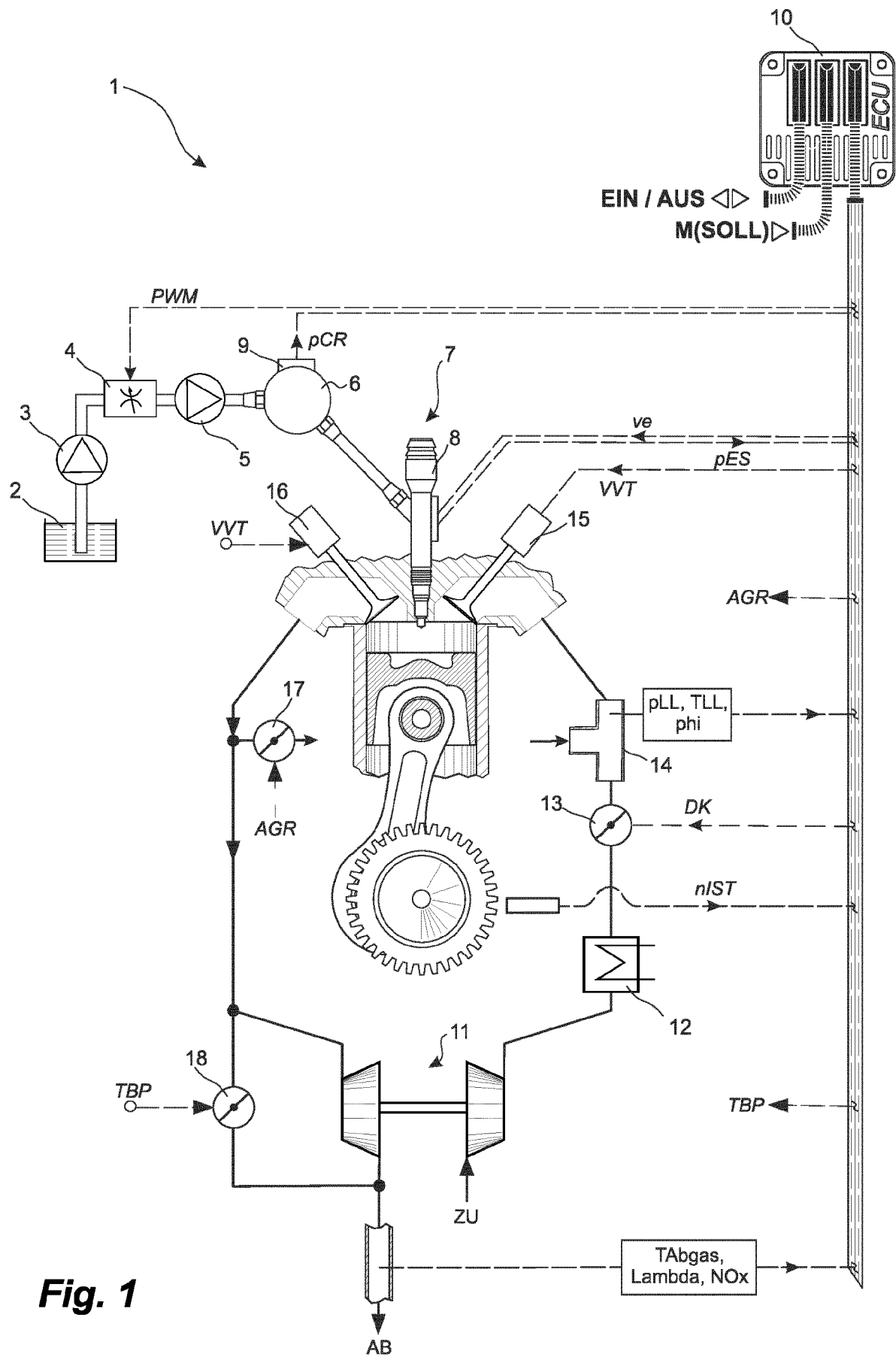


Fig. 1

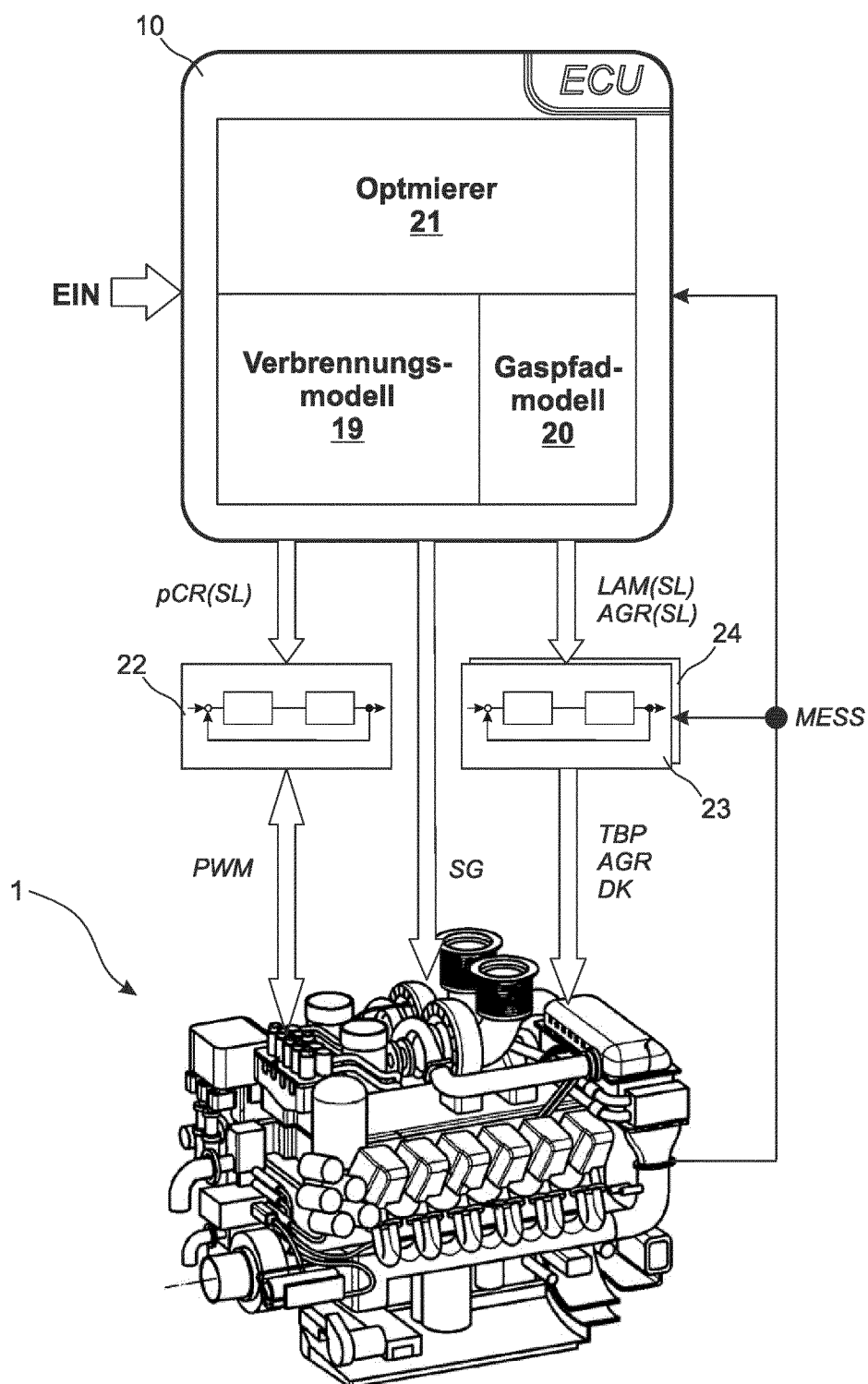


Fig. 2

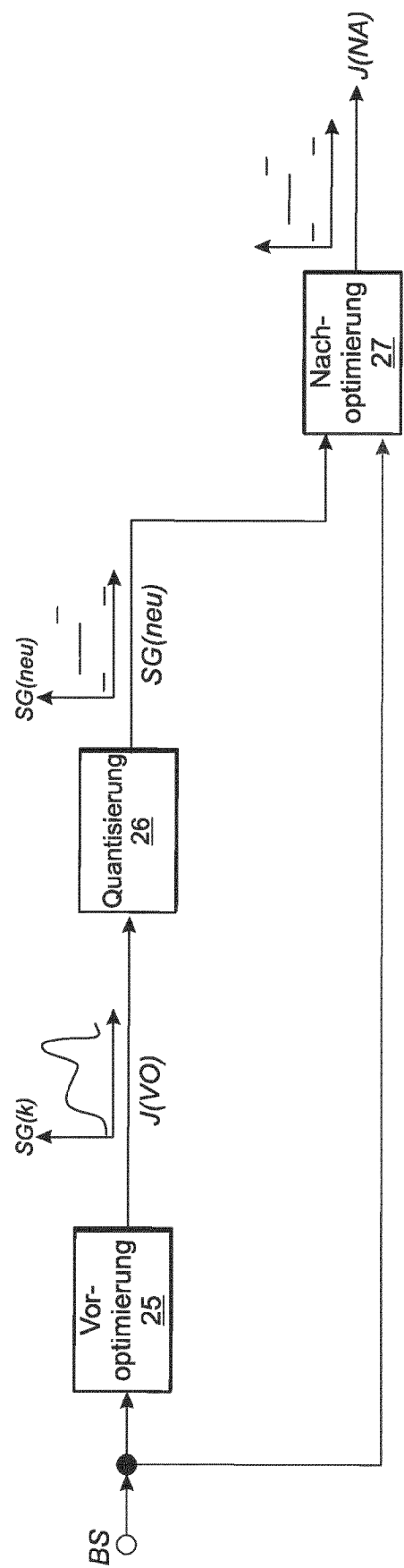
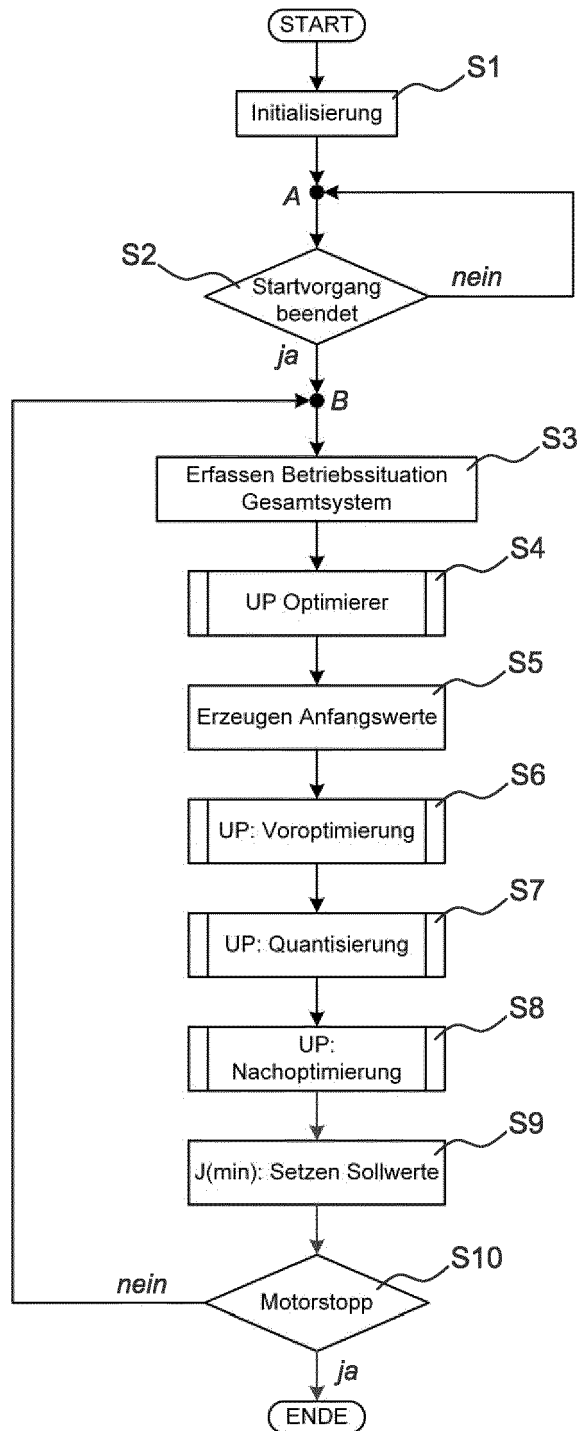


Fig. 3

**Fig. 4**

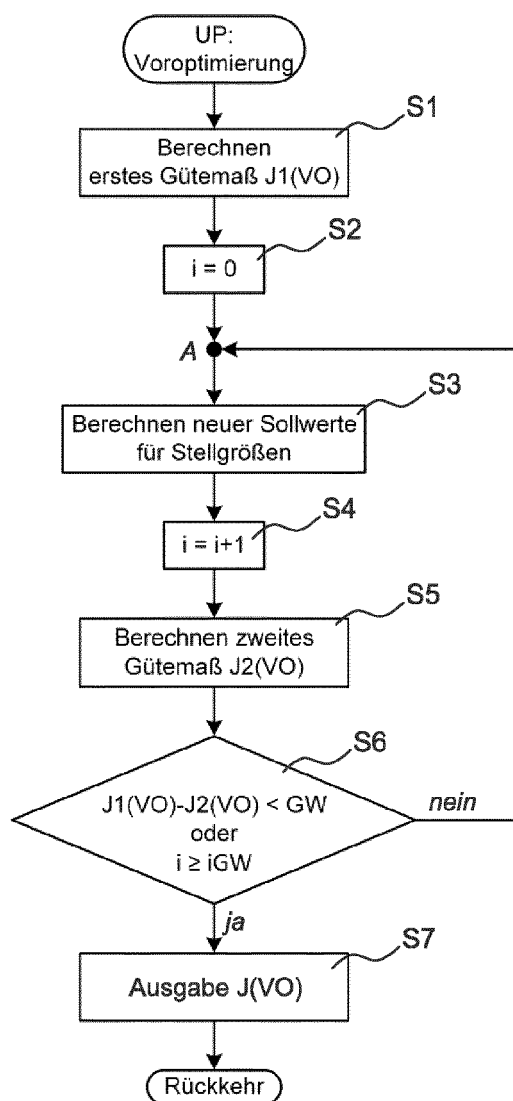
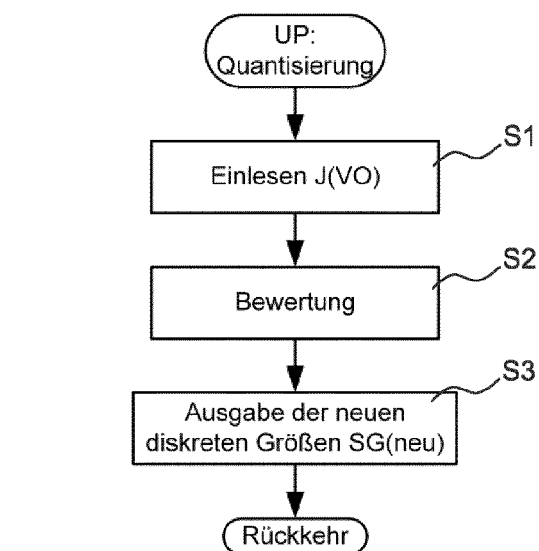
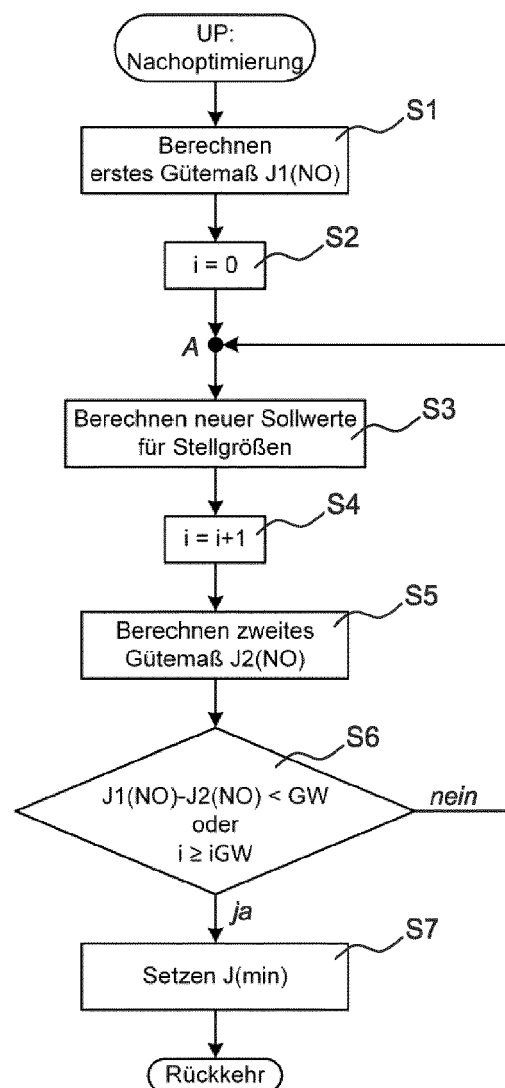
**Fig. 5****Fig. 6****Fig. 7**

Fig. 8

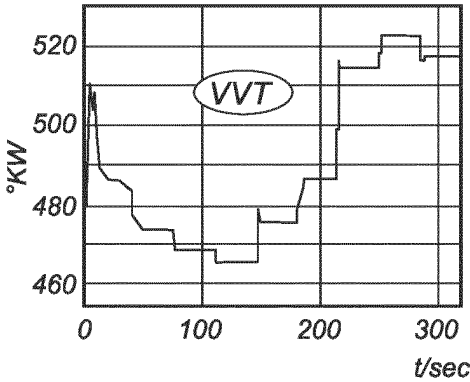
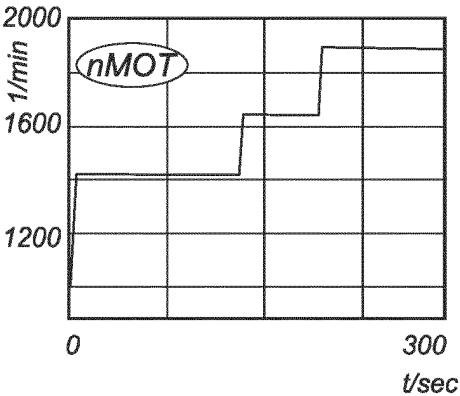
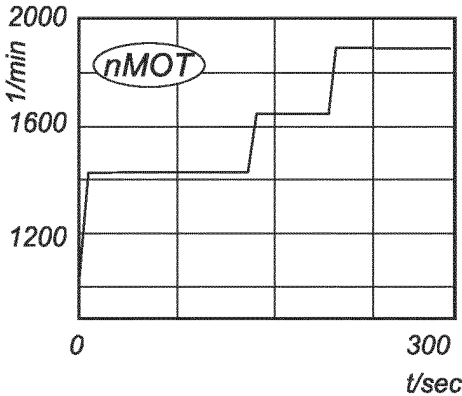
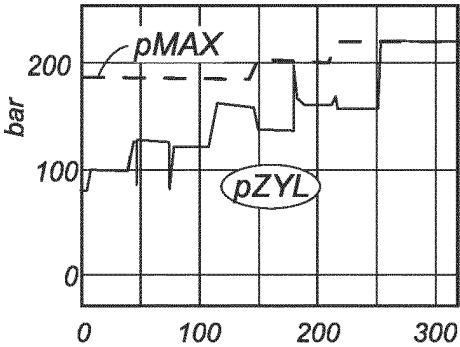
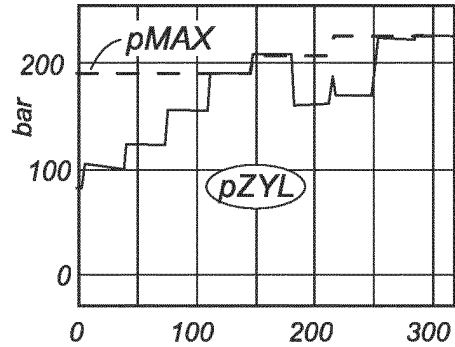
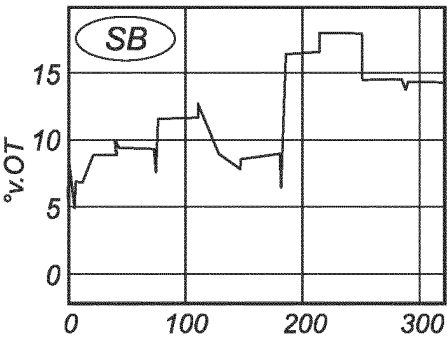
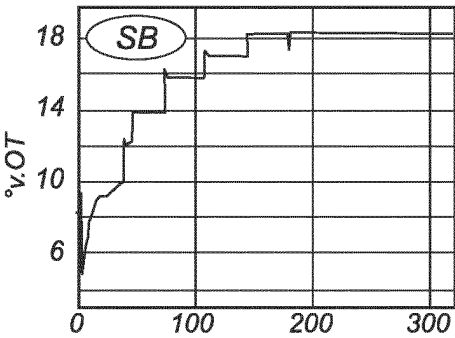
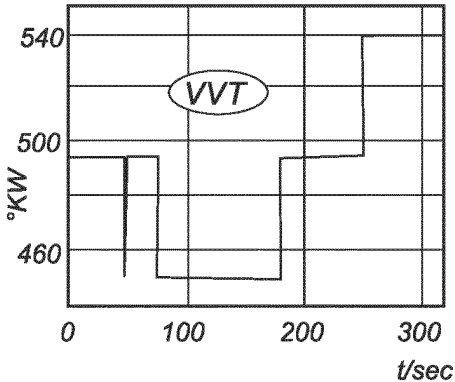


Fig. 9



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 102006004516 B3 [0003]
- US 20110172897 A1 [0003]
- DE 102017005783 A1 [0004]
- WO 2018234093 A1 [0005]