

**Veröffentlicht:**

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur prädiktiven Steuerung und/oder Regelung einer Brennkraftmaschine mit Stellgrößen unter Vorgabe eines Modells der Brennkraftmaschine mit kennzeichnenden Größen und eines Regelkreises für die Stellgrößen, wobei - in dem Verfahren die Stellgrößen der Brennkraftmaschine geregelt oder gesteuert eingestellt werden und das Verfahren die Schritte aufweist: - Messung von Ist-Werten und Vorgabe von Soll-Werten der kennzeichnenden Größen der Brennkraftmaschine, sowie optional in Abhängigkeit von Rand- und/oder Umwelt- und/oder Alterungs-Bedingungen. Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass die kennzeichnenden Größen unter Vorgabe eines Modells der Brennkraftmaschine mit den kennzeichnenden Größen und eines Regelkreises mit den Stellgrößen geregelt werden, wobei das Regeln im Rahmen eines modellbasierten prädiktiven Regelns erfolgt, bei dem die kennzeichnenden Größen des Modells der Brennkraftmaschine berechnet werden und die Stellgrößen der Brennkraftmaschine prädiktiv geregelt eingestellt werden. Erfindungsgemäß ist weiter vorgesehen, dass zum Regeln ein modellbasierter prädiktiver nichtlinearer Regler verwendet wird, der modular mit einer Anzahl von modellbasierten prädiktiven Regelmodulen aufgebaut ist.

BESCHREIBUNG

5 Verfahren und Einrichtung zum prädiktiven Steuern und/oder Regeln einer Brennkraftmaschine sowie Brennkraftmaschine mit der Einrichtung zur Ausführung des Verfahrens

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur prädiktiven Steuerung und/oder Regelung einer Brennkraftmaschine mit Stellgrößen unter Vorgabe eines Modells der Brennkraftmaschine mit
10 kennzeichnenden Größen und eines Regelkreises für die Stellgrößen, wobei

- in dem Verfahren die Stellgrößen der Brennkraftmaschine geregelt oder gesteuert eingestellt werden und das Verfahren die Schritte aufweist:
- Messung von Ist-Werten und Vorgabe von Soll-Werten der kennzeichnenden Größen der Brennkraftmaschine, sowie optional in Abhängigkeit von Rand- und/oder Umwelt- und/oder

15 Alterungs-Bedingungen. Die Erfindung führt auch auf eine Einrichtung zum prädiktiven Steuern und/oder Regeln der Brennkraftmaschine, die ausgebildet ist zur Durchführung des Verfahrens. Weiter führt die Erfindung auf eine Brennkraftmaschine mit der Einrichtung zum prädiktiven Steuern und/oder Regeln der Brennkraftmaschine.

Das Regeln von kennzeichnenden Größen kann unter Vorgabe eines Modells der
20 Brennkraftmaschine mit den kennzeichnenden Größen und eines Regelkreises mit den Stellgrößen erfolgen, wobei das Regeln im Rahmen eines modellbasierten prädiktiven Regelns erfolgt, bei dem die kennzeichnenden Größen des Modells der Brennkraftmaschine berechnet werden und die Stellgrößen der Brennkraftmaschine prädiktiv geregelt eingestellt werden. Prädiktive Regelkonzepte gehören zur Klasse der modellbasieren Regelungsverfahren und

25 gestatten es im Allgemeinen, eine Vorhersage in die Zukunft für den Regelkreis zu machen, nämlich für einen sogenannten Prädiktionshorizont. Solche prädiktiven Regelkonzepte haben sich bewährt, da sie es erlauben, im Rahmen der Prädiktion des Systemverhaltens eine optimierte Regelung zu gestalten; diese kann bereits Informationen über zukünftiges Betriebsverhalten des Systems berücksichtigen. Dies führt dazu, dass Sollwertangaben sowie Randbedingungen für

30 einen Regelkreis optimiert gestaltet und/oder eingehalten werden können. Insgesamt kann dadurch eine höhere Regelgüte und/oder ein schnellerer Regelvorgang erreicht werden. Es können komplexere Regelungsziele definiert werden und Begrenzungen in Stellgrößen oder physikalischen Größen des Systems systematisch berücksichtigt werden.

Problematisch bei solchen und anderen prädiktiven Regelkonzepten ist jedoch regelmäßig der vergleichsweise hohe Rechenaufwand, sodass sich prädiktive Regelkonzepte bislang allenfalls für Teilkomponenten eines Motors einer Brennkraftmaschine angeboten haben. Maßgeblich für den Erfolg eines prädiktiven Regelkonzeptes ist die Gestaltung eines geeigneten Modells der
5 Teilkomponente eines Motors. Bislang war es insbesondere nicht möglich, optimierte prädiktive Regelkonzepte in Echtzeit auf einem Motorsteuergerät zur globalen Steuerung und Regelung der gesamten Brennkraftmaschine, z.B. auch unter Berücksichtigung einer Komponente einer Abgasnachbehandlung, mit geeigneten Güteanforderungen für die Regelung und in Echtzeit zu realisieren.

10 Soweit prädiktive Regelkonzepte für Dieselmotoren bekannt sind, beschränken sich diese auf stark vereinfachte Modelle eines Systems, das heißt insbesondere auf lediglich linearisierte Systemmodelle, die zudem statisch oder nur mit ungenügenden Zeitskalen, insbesondere Prozesszeiten und/oder Prozessskalen, gestaltet sind. Außerdem mangelt es den bisher bekannten prädiktiven Regelkonzepten an der Berücksichtigung von ausreichenden Randbedingungen –
15 bislang kommt noch der ungenügende Einsatz von Kennfeldstrukturen zustande. Dies führt sowohl zu einem vergleichsweise hohen Aufwand zur Parametergewinnung der Kennfelder als auch dazu, dass diese Regelkonzepte vergleichsweise unflexibel sind, z.B. wenn eine Änderung der Brennkraftmaschine oder der Umweltbedingungen erfolgt ist. Kennfelder- und Korrekturfaktoren- basierte stark linearisierte Modelle für prädiktive Regelansätze ermöglichen
20 deswegen keinen optimalen Betrieb des Gesamtsystems einer Brennkraftmaschine, insbesondere eines Dieselmotors.

An solchen und anderen Nachteilen leiden Regelkonzepte wie sie beispielsweise in DE 10 2011 013 481 A1 und EP 1 864 012 B1 offenbart sind.

25 So beschränkt sich DE 10 2011 013 481 A1 lediglich auf einen Teilaspekt eines Dieselmotors; nämlich ein Stellglied des Verbrennungsmotors, bei dem in Abhängigkeit von der Gesamtgasmasse, dem Sauerstoffgehalt, der Soll-Gesamtgasmasse und dem Soll-Sauerstoffgehalt das Stellglied eingestellt wird. Eine solche starke Reduzierung der Anzahl von Stellgliedern wird einem ganzheitlichen (globalen) prädiktiven Regelansatz für die gesamte Brennkraftmaschine nicht gerecht.

30 EP 1 864 012 B1 betrifft einen multivariablen modellprädiktiven Regler für Kraftstoff- und/oder Luft betreffende Parameter unter Berücksichtigung eines zentralen Optimierungsalgorithmus,

der mit Zustands- und/oder Aktuatoreinschränkungen arbeitet. Außerdem ist das dort zugrunde gelegte übermäßige Heranziehen von Kennfeldstrukturen nachteilig für das Regelkonzept.

Wünschenswert wäre eine ganzheitliche modellbasierte prädiktive Regelung einer Brennkraftmaschine, die es erlaubt, die gesamte Brennkraftmaschine, vorzugsweise global, insbesondere unter Berücksichtigung von Komponenten einer Abgasnachbehandlung, im Rahmen eines modellbasierten prädiktiven Regelns in Echtzeit auf einem Motorsteuergerät (ECU) zu regeln. Dabei sollte das prädiktive Regelkonzept die Nichtlinearitäten des Systems der Brennkraftmaschine bzw. des Modells der Brennkraftmaschine berücksichtigen. Bislang erweisen sich nicht-lineare modellprädiktive Regler für ein Gesamtmodell einer Brennkraftmaschine aufgrund der größeren Komplexität als nicht echtzeitfähig auf einem Motorsteuergerät (ECU). Oben genannte stark vereinfachte Modelle sind dagegen nicht praxistauglich, jedenfalls nicht global über den gesamten Betriebsbereich.

An dieser Stelle setzt die Erfindung an, deren Aufgabe es ist, ein Verfahren zur prädiktiven Steuerung und/oder Regelung einer Brennkraftmaschine mit Stellgrößen unter Vorgabe eines Modells der Brennkraftmaschine mit kennzeichnenden Größen und eines Regelkreises für die Stellgrößen, oder der direkten Ansteuerung der Stellgrößen, anzugeben, wobei die kennzeichnenden Größen des Modells der Brennkraftmaschine in Echtzeit auf einem Motorsteuergerät für die gesamte Brennkraftmaschine (global) im Rahmen eines nicht-linearen modellbasierten prädiktiven Regelns erfolgen kann. Aufgabe der Erfindung ist es auch, eine entsprechende Einrichtung zum prädiktiven Steuern und Regeln sowie eine Brennkraftmaschine mit der Einrichtung anzugeben.

Betreffend des Verfahrens wird die Aufgabe durch die Erfindung mittels einem Verfahren des Anspruchs 1 gelöst. Bei dem Verfahren der eingangs genannten Art ist erfindungsgemäß vorgesehen, dass

- die kennzeichnenden Größen unter Vorgabe eines Modells der Brennkraftmaschine mit den kennzeichnenden Größen und eines Regelkreises mit den Stellgrößen geregelt werden, wobei das Regeln im Rahmen eines modellbasierten prädiktiven Regelns erfolgt, bei dem die kennzeichnenden Größen des Modells der Brennkraftmaschine berechnet werden und die Stellgrößen der Brennkraftmaschine prädiktiv geregelt eingestellt werden,
- zum Regeln ein modellbasierter prädiktiver nichtlinearer Regler verwendet wird, der modular mit einer Anzahl von modellbasierten prädiktiven Regelmodulen aufgebaut ist, wobei

- wenigstens einem ersten modellbasierten prädiktiven Regelmodul eine erste Zeitskala, insbesondere schnellere Prozesszeit und/oder kürzere Prozessskala, zugeordnet ist, und
 - wenigstens einem zweiten, vorzugsweise modellbasierten prädiktiven, Regelmodul eine zweite Zeitskala, insbesondere langsamere Prozesszeit und/oder längere Prozessskala, zugeordnet ist,
- 5 wobei
- die wenigstens eine erste und wenigstens eine zweite Zeitskala, insbesondere Prozesszeit und/oder Prozessskala, unterschiedlich sind.

Das Konzept der Erfindung führt zur Lösung der Aufgabe betreffend eine Vorrichtung auch auf eine Einrichtung zum prädiktiven Steuern und/oder Regeln der Brennkraftmaschine gemäß dem

10 Anspruch 18 sowie auf eine Brennkraftmaschine gemäß dem Anspruch 19.

Die Erfindung geht von der Überlegung aus, dass bislang kein optimaler Betrieb eines Gesamtregelelements für eine Brennkraftmaschine in Echtzeit auf einem Motorsteuergerät (ECU) realisiert werden konnte, da entweder modellbasierte prädiktive Regelkonzepte durch starke Vereinfachungen und/oder Linearisierungen unzureichend sind beziehungsweise über das

15 Einbringen von Kennfeldern und Korrekturfaktoren zu unflexibel sind; theoretisch grundsätzlich bekannte modellprädiktive Regler für ein Gesamtmodell erweisen sich --ohne die oben genannten starken Vereinfachungen oder Einschränkungen-- als nicht echtzeitfähig.

Die Erfindung geht weiter von der Überlegung aus, dass unter Berücksichtigung der verfügbaren Rechenleistung von Reglern und Motorsteuergeräten (ECU) eine Echtzeitfähigkeit

20 dennoch erreicht werden kann, wenn man die im Gesamtsystem einer Brennkraftmaschine maßgeblichen Zeitskalen, insbesondere Prozesszeiten und/oder Prozessskalen, berücksichtigt. Die Erfindung hat, ausgehend von diesen Überlegungen erkannt, dass im Gesamtsystem einer Brennkraftmaschine unterschiedlich schnell und/oder lang ablaufende Prozesse vorhanden sind. Ausgehend von dieser Erkenntnis schlägt das Konzept dieser Erfindung vor, das Gesamtsystem

25 der Brennkraftmaschine beziehungsweise das Modell der Brennkraftmaschine hinsichtlich der unterschiedlichen Zeitskalen, insbesondere Prozesszeiten und/oder Prozessskalen, einzelner Vorgänge zu modularisieren; bevorzugt die Module zeitlich hinsichtlich der Zeitskalen zu staffeln.

Ausgehend von dieser Erkenntnis schlägt die Erfindung deshalb einen modellbasierten

30 prädiktiven nicht linearen Regler vor, der gleichwohl echtzeitfähig auf einem Motorsteuergerät ist, da dieser modular mit einer Anzahl von Reglermodulen aufgebaut ist, insbesondere mit einer

Anzahl von modellbasierten prädiktiven Regelmodulen aufgebaut ist, wobei

- wenigstens einem ersten modellbasierten prädiktiven Regelmodul eine erste Zeitskala, insbesondere schnellere Prozesszeit und/oder kürzere Prozessskala, zugeordnet ist, und
 - wenigstens einem zweiten, vorzugsweise modellbasierten prädiktiven, Regelmodul eine zweite
- 5 Zeitskala, insbesondere langsamere Prozesszeit und/oder längere Prozessskala zugeordnet ist, wobei
- die wenigstens eine erste und wenigstens eine zweite Zeitskala, insbesondere Prozesszeit und/oder Prozessskala, unterschiedlich sind.

Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind den Unteransprüchen zu entnehmen und geben

10 im Einzelnen vorteilhafte Möglichkeiten an, das oben erläuterte Konzept im Rahmen der Aufgabenstellung zu sowie hinsichtlich weiterer Vorteile zu realisieren.

Vorzugsweise ist vorgesehen, dass

- zum Berechnen die kennzeichnende Größen eines globalen Modells der Brennkraftmaschine in Echtzeit auf einem Motorsteuergerät (ECU) für die gesamte Brennkraftmaschine im Rahmen
- 15 eines nichtlinearen modellbasierten prädiktiven Regelns berechnet werden, und/oder
- auf Basis des globalen Modells der Brennkraftmaschine, insbesondere des Motors, Soll-Werte und Stellgrößen für das erste und/oder zweite Regelmodul bestimmt werden, welche einer aktuellen Betreibssituation im Sinne eines Gütemaßes angepasst werden.

Eine Weiterbeildung hat darüber hinaus erkannt, dass sich das Gesamtsystem einer

20 Brennkraftmaschine beziehungsweise eines Modells der Brennkraftmaschine unter Betrachtung der relevanten Prozesse jedenfalls über ein erstes modellbasiertes prädiktives Regelmodul mit einer ersten Zeitskala, insbesondere Prozesszeit und/oder Prozessskala, und über ein zweites modellbasierten prädiktives Regelmodul mit einer zweiten Zeitskala, insbesondere Prozesszeit und/oder Prozessskala, beschreiben lässt, wobei die erste und zweite Zeitskala, insbesondere

25 erste und zweite Prozesszeit und/oder Prozessskala, unterschiedlich sind. Insbesondere hat die Erfindung erkannt, dass für die erste Zeitskala, eine schnellere Prozesszeit beziehungsweise kürzere Prozessskala relevant ist und für die zweite Zeitskala eine zweite langsamere Prozesszeit beziehungsweise längere Prozessskala relevant ist.

Als eine bevorzugte Weiterbildung schlägt die Erfindung für eine Brennkraftmaschine die

30 Modularisierung in Teilkomponenten bzw. in Teilmodelle vor, wobei die Brennkraftmaschine eine oder mehrere der folgenden Komponenten aufweist:

- (i) einen eine Anzahl von Zylindern aufweisenden Motor, insbesondere mit einer vergleichsweise schnell ablaufenden Komponente der Verbrennung,
- (ii) insbesondere ein ein Common-Rail aufweisendes Einspritzsystem mit einer Anzahl von den Zylindern zugeordneten Injektoren, wobei einem Injektor ein Einzelspeicher
5 zugeordnet ist, der zum Vorhalten von Kraftstoff aus dem Common-Rail für den Injektor ausgebildet ist, insbesondere mit einer vergleichsweise schnell ablaufenden Komponente des Einspritzvorgangs, oder
- (iii) insbesondere einen Gasmischer und einen Zündezeitpunktgeber, vorzugsweise für einen Gasmotor,
- 10 (iv) eine Gas- und Abgasführung, insbesondere eine Abgasrückführung, mit einem Gas- und Abgaspfad, vorzugsweise mit einer auf mittlerer Zeitskala und mittlerer Schnelligkeit ablaufenden Komponente des Gas- und Abgaspfades, nämlich beispielsweise mit einer vergleichsweise mittleren, eher langsamer, ablaufenden Komponente der maßgeblichen Massenströme,
- 15 (v) eine Abgasnachbehandlung, insbesondere mit einem Katalysator, vorzugsweise für eine vergleichsweise langsam ablaufenden Komponente eines Prozesses beispielsweise einer ersten langsamen Zeitskala von Temperaturänderungen in der Abgasnachbehandlung oder einer zweiten langsamen Zeitskala von Alterungsprozessen.

Die vorgenannten Komponenten mit Zeitskalen von (grob) hoher Schnelligkeit (i) und
20 mittelhoher Schnelligkeit (ii, iii), mittlerer Schnelligkeit (iv) und die Komponenten vorgenannter eher langsameren Abläufen (v) finden sich in etwa auf einer Prozesszeit und/oder Prozessskala von Millisekunden (schnell), bzw. Sekunden (mittel), bzw. Minuten oder Stunden oder länger (langsam).

Im Rahmen einer besonders bevorzugten Weiterbildung ist vorgesehen, dass die Berechnung
25 kennzeichnender Größen des ersten Regelmoduls für das Modell der Brennkraftmaschine im ersten modellbasierten prädiktiven Regelmodul abhängig von der Berechnung kennzeichnender Größen des zweiten Regelmoduls für das Modell der Brennkraftmaschine im zweiten, vorzugsweise modellbasierten prädiktiven, Regelmodul erfolgt. Die weitgehend zunächst unabhängige Berechnung in dem ersten und zweiten Regelmodul sowie gegebenenfalls weiteren
30 Regelmodulen ist gewährleistet letztlich aufgrund der Zeitskalen-Trennung und den von der

Erfindung erkannten unterschiedlichen Zeitskalen, insbesondere Prozesszeiten und/oder Prozessskalen der Systemkomponenten, wie insbesondere der motorbasierten Verbrennung, dem einspritzsystembasierten Einspritzvorgang, der gaspfadbasierten Gasbewegung und/oder den Temperatur- und Alterungs-Entwicklungen im Abgasnachbehandlungssystem bzw. Katalysator oder Partikelfiltersystem. Eine Abhängigkeit ist gleichwohl vorhanden und berücksichtigt vorzugsweise mittels Kopplungen oder dergleichen. So ist im Rahmen einer besonders bevorzugten Weiterbildung ist vorgesehen, dass die Berechnung kennzeichnender Größen des ersten Regelmoduls für das Modell der Brennkraftmaschine im ersten modellbasierten prädiktiven Regelmodul einer ersten Zeitskala, insbesondere schnelleren Prozesszeit und/oder kürzeren Prozessskala, unter Vorgabe von berechneten kennzeichnenden Größen des zweiten Regelmoduls für das Modell der Brennkraftmaschine im zweiten, vorzugsweise modellbasierten prädiktiven, Regelmodul einer zweiten Zeitskala, insbesondere langsameren Prozesszeit und/oder längeren Prozessskala, erfolgt. Diese Weiterbildung nutzt die Tatsache, dass schnellablaufende Prozesse einer schnellen Systemkomponente die Vorgaben der langsam ablaufenden Systemkomponente als „quasi-statische“ Randbedingungen berücksichtigen können. Dies reduziert Kopplungseffekte realistisch auf das Notwendige und beschränkt die Freiheitsgrade jedes Teilmoduls in ebenfalls realistischer Weise. Dies kann einher gehen mit einer Reduzierung der Anzahl von Stellgrößen – nämlich mittels einer Aufteilung derselben auf die Regelmodule, die jedoch aufgrund der Zeitskalentrennung realistisch ist und zur Echtzeitfähigkeit des gesamtheitlichen prädiktiven Regelansatzes beiträgt.

Bevorzugt ist, insbesondere für ein Motormanagement, dass das erste modellbasierte prädiktive Regelmodul der ersten Zeitskala, insbesondere schnelleren Prozesszeit und/oder kürzeren Prozessskala, ein Regelmodul für den einen Zylinder aufweisenden Motor ist, insbesondere wobei verbrennungs-kennzeichnende Größen des Motors berechnet werden. Vorzugsweise werden für das Motormanagement Größen einer Verbrennung, nämlich eines NO_x- und/oder Ruß-Wertes, und/oder kennzeichnende Größen, nämlich ein Lambda-Wert und/oder eine Abgasrückführrate, berechnet.

Bevorzugt ist, insbesondere für ein Einspritzmanagement, dass das erste modellbasierte prädiktive Regelmodul der ersten Zeitskala, insbesondere schnelleren Prozesszeit und/oder kürzeren Prozessskala, ein Regelmodul umfasst für das ein Common-Rail aufweisendes Einspritzsystem mit einer Anzahl von den Zylindern zugeordneten Injektoren, wobei einem Injektor ein Einzelspeicher zugeordnet ist, der zum Vorhalten von Kraftstoff aus dem Common-Rail für den Injektor ausgebildet ist, wobei Injektion-kennzeichnende Größen des

Einspritzsystems berechnet werden. Vorzugsweise werden für das Einspritzmanagement ein Spritzbeginn (BOI), ein Spritzende (SE) und/oder ein Raildruck (p-Rail) berechnet. Vorzugsweise werden für einen Gasmotor, ein Zündzeitpunkt und/oder eine Gasmasse berechnet.

- 5 Bevorzugt ist, insbesondere für ein Gas- und Abgasrückführmanagement, dass
- dem ersten modellbasierten prädiktiven Regelmodul der ersten Zeitskala, insbesondere schnelleren Prozesszeit und/oder kürzeren Prozessskala, ein Regelmodul für die Gas- und Abgasrückführung mit einem Gas- und Abgaspfad zeitlich gestaffelt nachgeordnet und/oder mit diesem zusammengefasst ist, wobei diesem modellbasierten prädiktiven Regelmodul für die Gas- und Abgasrückführung eine dritte Zeitskala, insbesondere mittelschnelle Prozesszeit und/oder mittelkurze Prozessskala, zugeordnet ist, wobei Gas- und Abgaspfad -kennzeichnende Größen der Gas- und Abgasführung berechnet werden. Vorzugsweise werden für das Gas- und Abgasrückführmanagement Größen einer Abgasrückführung berechnet, insbesondere einer Abgasrückführrate (AGN), einer oder mehrerer Drosselklappen (Stellung DK), einer oder

10 und Abgasrückführung eine dritte Zeitskala, insbesondere mittelschnelle Prozesszeit und/oder mittelkurze Prozessskala, zugeordnet ist, wobei Gas- und Abgaspfad -kennzeichnende Größen der Gas- und Abgasführung berechnet werden. Vorzugsweise werden für das Gas- und Abgasrückführmanagement Größen einer Abgasrückführung berechnet, insbesondere einer Abgasrückführrate (AGN), einer oder mehrerer Drosselklappen (Stellung DK), einer oder

15 mehrerer Spenderklappen (Stellung SK) und/oder einer oder mehrerer Turbinenbypasse (Rate TP), berechnet werden.

- Bevorzugt ist, insbesondere für ein Abgasnachbehandlungs-Management, dass
- das zweite modellbasierte prädiktive Regelmodul der zweiten Zeitskala, insbesondere langsameren Prozesszeit und/oder längeren Prozessskala, ein Regelmodul für die
- 20 Abgasnachbehandlung (AGN), insbesondere mit einem Katalysator, ist, wobei abgasnachbehandlungs-kennzeichnende Größen der Abgasnachbehandlung, insbesondere mit einem Katalysator, berechnet werden, insbesondere eine Abgas- und/oder Katalysator Temperatur, eine Aufwärm/Abkühlrate und/oder eine Umsatzrate

- Vorzugsweise werden, insbesondere infolge der unterschiedlichen Zeitskalen, insbesondere
- 25 Prozesszeiten und/oder Prozessskalen, dem ersten Regelmodul Größen der Abgasnachbehandlung, nämlich eine Gas- und/oder Abgastemperatur, insbesondere ein Emissionswert von Stickoxiden oder sonstige Emissionswerte eines Katalysators, vorgegeben.

- Im Rahmen einer Weiterbildung ermöglicht die Modularisierung, dass
- im ersten modellbasierten prädiktiven Regelmodul, insbesondere abhängig vom zweiten, vorzugsweise modellbasierten prädiktiven, Regelmodul, berücksichtigt werden:
- 30 - Rand- und/oder Umwelt- und/oder Alterungs-Bedingungen, der kennzeichnenden Größen der Brennkraftmaschine, und/oder

- Ist-Werte und Soll-Werte der kennzeichnenden Größen der Brennkraftmaschine, und/oder
- Schätzungen durch nichtlineare Beobachter, und/oder
- ein Optimierungsalgorithmus.

Vorzugsweise ist vorgesehen, dass die kennzeichnenden Größen des Modells der Brennkraftmaschine des zweiten, vorzugsweise modellbasierten prädiktiven, Regelmoduls einer zweiten Zeitskala, insbesondere langsameren Prozesszeit und/oder längeren Prozessskala, dynamisch berechnet werden und die kennzeichnenden Größen des Modells der Brennkraftmaschine des ersten modellbasierten prädiktiven Regelmoduls einer ersten Zeitskala, insbesondere schnelleren Prozesszeit und/oder kürzeren Prozessskala, statisch berechnet werden.

- 5 Der Verbrennungsprozeß kann beispielsweise von Arbeitspiel zur Arbeitsspiel mit einem Stationärmodell ohne dynamische Anteile berechnet werden. Bei der Berechnung des Gaspfades kann beispielsweise die Dynamik der Klappen und Turbolader berücksichtigt werden. Zur besseren Ausnutzung der Rechenleistung kann besonders bevorzugt ein Berechnungsprozess eines prädiktiven nichtlinearen Reglers der Verbrennung in einer schnelleren Zykluszeit bzw.
- 15 mit einer höheren Abtastrate eines Soll/Ist-Wert-Abgleichs durchlaufen werden; d.h. auf einer schnelleren Zeitskala umgesetzt werden und der Berechnungsprozeß des Gaspfades kann mit seiner eher aufwändigen Dynmik in einer langsameren Zykluszeit, d.h. auf einer längeren Zeitskala berchnet werden.

- Insbesondere ist vorteilhaft vorgesehen, dass die statische Berechnung mittels nichtlinearer Polynome und die dynamische Berechnung mittels eines Differentialgleichungsmodells erfolgt; insbesondere eines dynamischen Modells mittels Differentialgleichungen.
- 20

- Zur Reduktion der Komplexität der Berechnungen kann dabei auch das dynamische Verhalten einer geregelten Komponente durch ein dynamisches Modell wiedergegeben werden, welches das zeitliche Verhalten von Regler und Teilkomponente zu einem Modell für das Verhalten der geregelten Komponente zusammenfaßt. Die Stellgrößen der Komponente können dann durch den dort vorteilhaft verwendeten klassischen Regler berechnet werden. Das überlagerte Regelmodul kann dann Soll-Werte für das geregelte Teilsystem vorgeben. Überlagerte Berechnungen vereinfachen sich, da die Bestimmung der Stellgrößen dieser Teilkomponente nicht durch eine überlagerte Optimierung des Reglers sondern innerhalb der Teilkomponente erfolgt.
- 25
- 30

Mit besonderem Vorteil umfasst die Zuordnung unterschiedlicher Prozesszeiten und/oder Prozessskalen, die erste Zeitskala, insbesondere schnellere Prozesszeit und/oder kürzere Prozessskala, und/oder die zweite Zeitskala, insbesondere langsamere Prozesszeit und/oder längere Prozessskala, maßgeblich ist für die Festlegung einer zeitlichen Regelung gemäß einem
5 der Paramter, die ausgewählt sind aus der Gruppe bestehend aus: Zeitskala eines Regelungszeitraumes, Zeitschritt eines Regelintervalls, Abtastrate eines Soll/Ist-Wert-Abgleichs, Rechenzykluszeit eines Reglers und sonstige Berechnungsraten, Prädiktionshorizont. Auf diese Weise kann der Zeitablauf der jeweiligen Systemkomponente hinsichtlich Schnelligkeit und Dauer per Zeittaktung und Zeitskala und der weiteren genannten Paramter der Regelung
10 angemessen berücksichtigt werden und dennoch eine Echtzeitfähigkeit auf einem Motorsteuergerät gewährleistet werden.

Ausführungsformen der Erfindung werden nun nachfolgend anhand der Zeichnung beschrieben. Diese soll die Ausführungsformen nicht notwendigerweise maßstäblich darstellen, vielmehr ist die Zeichnung, wo zur Erläuterung dienlich, in schematisierter und/oder leicht verzerrter Form
15 ausgeführt. Im Hinblick auf Ergänzungen der aus der Zeichnung unmittelbar erkennbaren Lehren wird auf den einschlägigen Stand der Technik verwiesen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass vielfältige Modifikationen und Änderungen betreffend die Form und das Detail einer Ausführungsform vorgenommen werden können, ohne von der allgemeinen Idee der Erfindung abzuweichen. Die in der Beschreibung, in der Zeichnung sowie in den Ansprüchen offenbarten
20 Merkmale der Erfindung können sowohl einzeln als auch in beliebiger Kombination für die Weiterbildung der Erfindung wesentlich sein. Zudem fallen in den Rahmen der Erfindung alle Kombinationen aus zumindest zwei der in der Beschreibung, der Zeichnung und/oder den Ansprüchen offenbarten Merkmale. Die allgemeine Idee der Erfindung ist nicht beschränkt auf die exakte Form oder das Detail der im folgenden gezeigten und beschriebenen bevorzugten
25 Ausführungsformen oder beschränkt auf einen Gegenstand, der eingeschränkt wäre im Vergleich zu dem in den Ansprüchen beanspruchten Gegenstand. Bei angegebenen Bemessungsbereichen sollen auch innerhalb der genannten Grenzen liegende Werte als Grenzwerte offenbart und beliebig einsetzbar und beanspruchbar sein. Der Einfachheit halber sind nachfolgend für identische oder ähnliche Teile oder Teile mit identischer oder ähnlicher Funktion gleiche
30 Bezugszeichen verwendet.

Weitere Vorteile, Merkmale und Einzelheiten der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung der bevorzugten Ausführungsformen sowie anhand der Zeichnung; diese zeigt in:

- Fig.1 eine schematische Darstellung einer Brennkraftmaschine mit einer Einrichtung zum prädiktiven Steuern und/oder Regeln der Brennkraftmaschine, deren prädiktiver Regler gemäß einer bevorzugten Zeitskalen-Trennung modularisiert ist;
- Fig.2 eine Darstellung der in Fig.1 entworfenen Zeitskalentrennung, wobei bevorzugte prädiktive Regelmodule der Einrichtung zum prädiktiven Steuern und/oder Regeln zeitlich gestaffelt sind;
- Fig.3 eine schematische Darstellung eines Ersatzmodells für das modellbasierte prädiktive Regelmodul des Abgaspfads;
- Fig.4 eine Darstellung des Prädiktionshorizonts mit Soll- und Ist-Werten für eine beispielhafte Stellgröße bei einer modellprädiktiven Regelung der Fig.1;
- Fig.5 eine Liste von Zuständen (kennzeichnende Größen), Messgrößen sowie weiteren Sollgrößen und/oder Schranken für kennzeichnende Größen (Randbedingungen), Stellgrößen und Stellgrößenbeschränkungen (Randbedingungen) für eine beispielhafte Regelbeschreibung einer prädiktiven modellbasierten nicht-linearen Regelung einer Brennkraftmaschine;
- Fig.6 ein Beispiel eines Gütemaßes einer nicht-linearen modellbasierten prädiktiven Regelbeschreibung für eine Brennkraftmaschine, hier zunächst ohne Abgasnachbehandlung (selektiver katalytischer Reaktor, SCR);
- Fig.6A ein Beispiel eines Gütemaßes einer nicht-linearen modellbasierten prädiktiven Regelbeschreibung für ein geeignetes Regelmodul betreffend die Abgasnachbehandlung (SCR)
- Fig.6B ein Beispiel einer Kopplung der Regelbeschreibung der Fig.6A mit einem übergeordneten modellbasierten prädiktiven Regelmodul des Motors in Fig.6;
- Fig.6C das Beispiel einer Regelbeschreibung für einen modellbasierten prädiktiven Regelansatz für einen Motor mit einer Abgasnachbehandlung unter ganzheitlicher Betrachtung.

Fig.1 zeigt schematisch den Aufbau einer Brennkraftmaschine 1000 mit einer Einrichtung 100 zum prädiktiven Steuern und/oder Regeln der Brennkraftmaschine 1000. Die Einrichtung 100 ist

bei der Ausführungsform gemäß dem Konzept der Erfindung als ein Motorsteuergerät ECU gebildet und in der Lage, die gesamte Brennkraftmaschine 1000 ganzheitlich (global) modellbasiert prädiktiv zu steuern und/oder zu regeln. Die Einrichtung 100 weist im Rahmen eines nicht-linearen modellbasierten prädiktiven Regelansatzes ein Modell 10 der Brennkraftmaschine auf; hier mit kennzeichnenden Größen G_i , ($i=1,2,3$) und einem Regelkreis hier für Stellgrößen SG_i ($i=1,2,3$) auf.

Das Modell 10 ist modularisiert und weist für eine Anzahl von modellbasierten prädiktiven nicht-linearen Regelmodulen 1, 2, 3 entsprechende modellbasierte prädiktive Regelmodule 11, 12, 13 im prädiktiven Regler 10 auf. Der prädiktive Regler 10 wird in Form von Optimierungsalgorithmen umgesetzt und unterstützt durch die Vorgabe von geeigneten Rand-, Umwelt-, oder Alterungsbedingungen der kennzeichnenden Größen G_i der Brennkraftmaschine; nämlich mittels der Bedingungen 20 oder Schätzungen durch nicht-lineare Beobachter 30. Auch die Bedingungen können entsprechend der Regelmodule 1, 2, 3 und den darin unterlagerten prädiktiven Reglern 11, 12, 13 modularisiert sein gemäß der --wie in Fig.1 dargestellten-- Aufteilung der Bedingungen 20 in modularisierte Bedingungsangaben 21, 22, 23 beziehungsweise modularisierte Beobachter 31, 32, 33 des Beobachtersystems 30.

Grundlage des Aufbaus des prädiktiven nicht-linearen Reglers 10 mit einer Anzahl von modellbasierten prädiktiven Regelmodulen 1, 2, 3 ist die Zeitskalentrennung, hier mit Prozesszeiten t_1 , t_2 , t_3 , (in Fig.2 auch Zeitskalen S_i und Zeitkonstanten T_i , ($i=1,2,3$)) für unterschiedlich schnell ablaufende Komponenten der Brennkraftmaschine 1000 beziehungsweise der Prozesse in diesen Komponenten.

So ist einem ersten prädiktiven modellbasierten Regelmodul 1 eine erste schnellere Prozesszeit t_1 auf vergleichsweise kurzer Zeitskala zugeordnet, einem zweiten modellbasierten prädiktiven Regelmodul 2 eine mittlere Prozesszeit t_2 auf mittlerer Zeitskala zugeordnet und einem dritten modellbasierten prädiktiven Regelmodul 3 eine langsamere Prozesszeit t_3 auf längerer Zeitskala zugeordnet.

Jedes der Regelmodule 1, 2, 3 berechnet kennzeichnende Größen G_1 , G_2 , G_3 im Rahmen der modularisierten prädiktiven Regelung 11, 12, 13 unter Berücksichtigung eines Gütemaßes. Falls dabei Sollwerte eines unterlagerten Regler bestimmt werden, so wird dieser Soll- und Ist-Werte der kennzeichnenden Größen G_i -IST bzw. G_i -SOLL; ($i=1,2,3$) einander angleichen. In anderen Fällen werden aus dem Reglermodul direkt Stellgrößen für die entsprechenden Stellglieder

ausgegeben. Unter prädiktiver Berechnung entsprechender kennzeichnender Betriebsgrößen BG_i ($i=1,2,3$) werden dann Stellgrößen SG_i ($i=1,2,3$) für die unterschiedlich schnell reagierenden Komponenten der Brennkraftmaschine 1000 vorgegeben.

Die Brennkraftmaschine 1000 weist als Komponenten für den hier gewählten modularisierten, zeitlich gestaffelten, modellbasierten prädiktiven Regelansatz auf: eine Anzahl von Zylinder aufweisenden Motor 200 und einem dem Motor 200 zugeordnetes Einspritzsystem 500 mit einem Common-Rail, wobei der Anzahl von Zylindern Injektoren zugeordnet sind und jedem Injektor ein Einzelspeicher zugeordnet ist, der zum Vorhalten von Kraftstoff aus dem Common-Rail für den Injektor ausgebildet ist. Des Weiteren weist die Brennkraftmaschine als Komponente eine Gas- und Abgasführung für Ladeluft LL und Abgas AG auf, insbesondere mit einer hier nicht explizit dargestellten Abgasrückführung, wobei die Gas- und Abgasführung 300 einen entsprechenden Gas- und Abgaspfad aufweist. Des Weiteren weist die Brennkraftmaschine 1000 eine Abgasnachbehandlung 400 auf, die hier mit einem Dieselpartikelfilter DPF und einem selektiven katalytischen Reaktor SCR dargestellt ist.

Gemäß dem Konzept der Erfindung im Rahmen dieser besonders bevorzugten Ausführungsform ist vorgesehen, die Prozesse in den Komponenten des Motors 200 mit Einspritzsystem 500, nämlich als verbrennungsrelevante Komponente 111 sowie die massenstromrelevante Komponente 222 des Gas- und Abgaspfades 300 sowie die langsamste Komponente 333 betreffend Temperaturänderungen des Abgasnachbehandlungssystems 400 unterschiedlichen Prozesszeiten und/oder Prozeßskalen zuzuordnen; nämlich der ersten, schnelleren Prozesszeit t_1 , beziehungsweise der zweiten schnellen etwas langsameren Prozesszeit t_2 , beziehungsweise der langsamsten dritten Prozesszeit t_3 (in etwa t_1 =Millisekunden, t_2 =Sekunden und t_3 =Stunden).

Fig.2 zeigt dazu die vorgenannte Zeitskalentrennung im Rahmen des Verfahrens zur prädiktiven Steuerung und/oder Regelung der Brennkraftmaschine 1000 entsprechend der Fig.1. Diese hier entworfene modellprädiktive Regelung erlaubt eine nicht-lineare Modellberücksichtigung und ist dennoch in der Lage auf einem Motorsteuergerät ECU in Echtzeit ausgeführt zu werden.

Dies wird erreicht durch die in Fig.1 schematisch dargestellte geschickte Modularisierung des nicht-linearen modellbasierten prädiktiven Reglers 10 mit entsprechenden Regelprozessen, 11, 12, 13 und den zugeordneten prädiktiven Regelmodulen 1, 2, 3.

Diese sind in Fig.2 als Regelprozesse 11, 12, 13 mit den Prozesszeiten t_1 , t_2 , t_3 (Millisekunden, Sekunden, Minuten oder Stunden) dargestellt. Als Maßgabe für die Prozesszeiten t_1 , t_2 , t_3 ist

jedem Regelprozess 11, 12, 13 eine entsprechende Zeitkonstante T_i und Zeitskala S_i ($i=1,2,3$), nämlich für die verbrennungsspezifischen Prozesse im Motor (Regelmodul 1 mit Zeiten/auf einer Zeitskala/Zeitkonstante t_1, S_1, T_1), die gasdynamischen Prozesse im Gaspfad (Regelmodul 2, mit Zeiten/auf einer Zeitskala/Zeitkonstante t_2, S_2, T_2) und in der Abgasnachbehandlung (Regelmodul 3 mit Zeiten/auf einer Zeitskala/Zeitkonstante t_3, S_3, T_3).

Beispiele der relevanten Stellgrößen SG_i , ($i=1,2,3$) und Betriebsgrößen BG_i , G_i ($i=1,2,3$) sind in Fig.2 für die einzelnen Regelmodule 1, 2, 3 dargestellt. Der Einfachheit halber wird hier auf die Fig.2 mit der Angabe der entsprechenden Soll- und Ist-Werte für die Betriebsgrößen BG_1, G_1 ($M_Soll, n_Soll, PT_Soll, NOx_Soll_nachSCR$) und Stellgrößen SG_1 (p_Rail, BOI, m_ks), SG_2 (u_TBP, u_Dr, u_AGR, u_SP) sowie SG_3 (Doser) verwiesen. Des Weiteren ist in Fig.2 auch die Vorgabe bestimmter Randbedingungen ($n_max_ATL_HD, n_max_ATL_ND, T_max_Soll, T_Soll, p_max$) gezeigt, die hier als Randbedingungen 21 für das erste Regelmodul aufgeführt sind und Randbedingungen ($T7_Soll, NOx_Soll$) gezeigt, die hier als Randbedingungen 22 für das zweite Regelmodul aufgeführt sind.

Im Rahmen dieser Ausführungsform ist das erste und zweite Regelmodul 1, 2 für ein Motormanagement 4 zusammengefasst, das mit einem Regelmodul 5 für die Abgasnachbehandlungsmanagement gekoppelt ist. Die Kopplung entsteht hier aufgrund der quasi-statischen Vorgaben aus dem dritten Regelmodul 3; dies mittels der Betriebskenngrößen $G3_Soll$ - hier (Temperatur und NOx - und/oder Ruß-Werte vor der Abgasnachbehandlung).

Die hier vorgeschlagene bevorzugte Ausführungsform sieht vor, dass die verbrennungskennzeichnende schnell ablaufende (t_1)-Komponente des ersten prädiktiven Regelmoduls 1 als statisches Modell berücksichtigt werden kann über statische Polynome (MPC-Motor, Model Predictive Controlled Motor).

Betreffend die in Fig.2 dargestellte Komponente 4 lassen sich statische Modelle für die Verbrennungsgrößen angeben, wie zum Beispiel für die NOx -Werte, Rußwerte, Momentenwerte, $T7$ (Temperatur AGN) und Spitzendruck. Weitere Größen wie die Drehzahlen für die Abgasturbolader $nATL_HD$ und $nATL_ND$ können durch Polynome oder auch andere Varianten beschrieben werden. Insbesondere Polynome haben als Eingangsgrößen die gemessenen motorischen Größen als IST-Werte, die Umweltbedingungen ($T0$, Feuchte, $P0$) und die Stellwerte der Verbrennung (BOI , Einspritzmenge, Raildruck) und die IST-Werte des unterlagerten Gaspfades (z.B. λ , AGR).

Die Eigenschaften der in Fig.1 und Fig.2 dargestellten Modularisierung ergeben sich für die Komponente 4 daraus, dass die statischen Verbrennungsmodelle und das Modell des dynamischen Verhaltens des geregelten Gaspfades ausgewertet werden. Unter einer statischen Verbrennung wird vor allem verstanden: wenn der Zylinder geschlossen ist, steht das Ergebnis der Verbrennung fest - nämlich durch die aktuellen Randbedingungen am Zylinder kann das Ergebnis der Verbrennung verändert werden. Durch die Beschreibung in Form von Polynomen kann das Verhalten der Verbrennung über den gesamten Bereich der Eingangsgrößen abgebildet werden.

Auch hier zeigt sich wieder, dass die Ausgangswerte des langsameren Regelmoduls 2 als quasi-statische Eingangswerte für das schnellere Regelmodul 1 gelten. Die Kopplung der Polynommodelle mit Gaspfadregler erfolgt über ein dynamisches Modell für das Verhalten des geregelten Gaspfades, das heißt über die Einflüsse der Abgasrückführrate und λ -Werte oder auch andere Werte-Paare, nämlich hier der Sollwerte derselben. Mittels einer Vorgabe an die Ziele des Systems: zum Beispiel Zielwert Emission, Erreichen-Soll-Moment/Drehzahl, minimaler Verbrauch, Beschränkungen Steller (zum Beispiel Einspritzdruck, Einspritzmenge), Beschränkungen innermotorischer Größen, die eingehalten werden müssen (zum Beispiel Spitzendruck, Drehzahl Turbolader).

Betreffend den Gaspfad können die Größen G nicht-statisch betrachtet werden, da sie sich über den zeitlichen Verlauf T_2 ändern. Zur Vereinfachung der Komplexität kann aber mit einem Ersatzmodell des geregelten Gaspfades gerechnet werden. Der Vorteil besteht darin, dass das Optimierungsverfahren die Sollwerte für den Gaspfad bestimmen muss, aber nicht direkt die Stellgrößen für den Gaspfadsteller. Es ist möglich, das Verhalten des geregelten Gaspfades durch einfache Ersatzmodelle zu beschreiben. Damit werden die Rechnungen des Optimierungsverfahrens vereinfacht. Der Optimierer arbeitet mit dem Ersatzmodell und muss kein detailliertes Modell des Gaspfades rechnen (Fig.3).

Der Gaspfad kann also mit einem in Fig.3 unterlagerten Regelkreis beschrieben werden. Der in Fig.3 dargestellte Regler sieht als Soll-Werte von kennzeichnenden Größen die Abgasrückführrate und den zu erreichenden Lambda-Wert als SOLL-Werte vor. Als Stellgrößen sind hier vorgesehen eine oder mehrere der Abgasrückführklappe, der Spenderklappe, der Bypass-Klappe und der Ansaugdrossel durch ihren Klappenwinkel. Die Stellgrößen SG_3 werden entsprechend der Differenz von SOLL- und IST-Werten G_3 -SOLL bzw. G_3 -IST eingeregelt unter Zugrundelegung eines Simulationsmodells des realen Motors. Das daraus abgeleitete

Ersatzmodell für einen Optimierer 31, 32 berücksichtigt die im unteren Teil der Fig.3 dargestellten Verläufe der Abgasrückführaten und der Lambda-Werte und die modellbasierten gerechneten Werte AGR-R bzw. Lambda-R.

Das Gaspfadmodell des Motors ist nicht-linear und besitzt im einfachsten Fall deutlich mehr als
5 zehn Zustände, beispielsweise vierzehn Zustände. Als Vereinfachung kann hier bereits vorgesehen sein, dass die Klappendynamik im Einzelnen nicht dynamisch berücksichtigt wird und sämtliche Volumina zusammengefasst werden sowie womöglich statische Annahmen gemacht werden. Insofern reduziert der in Fig.3 dargestellte geregelte Gaspfad das Modell auf
10 ein System mit zwei Zuständen, die sich durch entkoppelte nicht-lineare Systeme beschreiben lassen. Dies führt zu einer massiven Reduktion des Rechenaufwandes bei der Berechnung der optimalen Stellgrößen. Außerdem besteht die Möglichkeit zum Austausch des in Fig.3 gezeigten Reglers durch einen komplexeren Regler soweit dies erforderlich und möglich ist.

Damit wird in dem Modul MPC AGN (Komponente 5) die statischen Verbrennungsmodelle und das Modell des dynamischen Verhaltens der Temperaturdynamik ausgewertet. Da der
15 Gaspfadregler auf einer viel langsameren Zeitskala operiert, wird hierfür dessen Dynamik vernachlässigt, sodass diese als Randbedingung im schnelleren Reglermodul 1 berücksichtigt wird. Die erhaltene Lösung muss eine erweiterte Form der grundlegenden Randbedingungen des untergeordneten Moduls MPC Motor erfüllen. Eine globale Lösung auf der großen Zeitskala der AGN, die alle Wünsche erfüllt, wäre aber mit sehr großem Rechenaufwand verbunden, da hierzu
20 das große Zeitintervall mit der feinen zeitlichen Auflösung der kleineren Zeitskala des Gaspfades betrachtet werden müsste. Durch die gemäß dem Konzept der Erfindung vorgeschlagene Trennung der Zeitskalen wird der Einfluss der Stellgrößen auf unterschiedlichen Zeitskalen getrennt betrachtet. Dadurch kann jeweils mit der erforderlichen zeitlichen Auflösung und damit sehr effizient gerechnet werden.

25 Analog zum Gaspfad kann eine Abgasnachbehandlung, hier eine selektive katalytische Reaktion, durch einen entsprechenden typischen Regelkreis, wie er in Fig.2 dargestellt ist, geregelt werden. Die in Fig.2 dargestellte Regelung für die Abgasnachbehandlung (SCR-Regler) kann im Modul MPC AGN (Komponente 5) für eine Wirkungsgradadaptation ($\eta_{SCR} = \eta_{SCR}(T_{SCR} \dot{m}_{Abgas})$) zur Betriebskostenminimierung genutzt werden. Dazu kann es möglich sein, dass lediglich eine
30 Betrachtung der langsameren Temperaturdynamik im Vergleich zur viel schnelleren Gaspfaddynamik erfolgt. Hier zeigt sich, dass die Umwelt und Randbedingungen in den

einzelnen modularen prädiktiven Regelmodulen berücksichtigt werden können, ohne dass eine separate Kennfeldstruktur erforderlich wäre.

Sämtliche Umwelteinflüsse wie Außendruck, Außentemperatur und Luftfeuchte sind in den hinterlegten Teilmodellen der Regelmodule enthalten. Somit kann jeder Komponente des Gesamtsystems auf aktuelle Betriebssituationen richtig reagieren. Grundsätzlich sind keine separaten Kennfeldstrukturen zur Bestimmung der SOLL-Werte G-SOLL erforderlich. Die in Fig.1 schematisch dargestellten Randbedingungen umfassen auch Modelladaptionen zur Anpassung von Abweichungen der einzelnen Motoren oder eine Motoralterung (Bezugszeichen 21 in Fig.1).

- 10 Zur Umsetzung der vorgestellten Reglerstruktur wird ein numerisches Optimierungsverfahren eingesetzt; dies dient zur Bestimmung welcher Stellgrößenverlauf die Anforderungen an das geregelte System in der aktuellen Betriebssituation am besten erreichen kann; insbesondere prädiktiv über einen gewissen Zeitraum, der in die Zukunft reicht (Prädiktionshorizont) erreichen kann – ein Beispiel für eine Prädiktion beim ersten Regelmodul 1 ist in Fig.4 gezeigt, etwa für
15 einen Massenstrom in Motor oder eine Abgasrückführrate oder einen λ -Wert, die in der Grafik der Fig.4 mit G bezeichnet ist.

- Grundsätzlich wird mit unterlagerten Modellen anhand von Optimierungsproblemen eine bestmögliche Stellgröße ausgewählt. Die Stellgröße SG, iSG ist über dem Prädiktionshorizont optimal und hält die Randbedingungen ein, das heißt die zum Beispiel prädiktive Regelung weiß
20 frühzeitig vom Erreichen der Spitzendruckgrenze und berücksichtigt dies. Als Hauptunterschiede zum klassischen Regler führt dies zu einer intuitiven Parametrierung der Regelung zu einer Austauschbarkeit der Modelle und Gütekriterien sowie Nebenbedingungen und zu einer expliziten Berücksichtigung von Beschränkungen – eine Stellgröße kann bezüglich mehrerer Abtastschritte optimal sein.

- 25 Fig.5 listet nun beispielhaft die relevante Zustände und Größen für eine in Fig.2 dargestellte modellbasierte prädiktive Regelung.

- Fig.6 gibt das Beispiel eines Gütemaßes einer nicht-linearen modellbasierten prädiktiven Regelbeschreibung für eine Brennkraftmaschine als Optimierungsproblem in integraler Form für das erste Regelmodul 1 (MPC Motor) in Kombination mit der Gaspfaddynamik im Regelmodul
30 2 --das heißt Komponente 4-- wieder.

Fig.6A gibt ein Beispiel des Gütemaßes einer nicht-linearen modellbasierten prädiktiven Regelbeschreibung für ein geeignetes Regelmodul als ein vereinfachtes integrales Problem wieder, das die Abgasnachbehandlung nicht berücksichtigt.

5 Fig.6B gibt ein Beispiel einer Kopplung der Regelbeschreibung der Fig.6A mit einem übergeordneten modellbasierten prädiktiven Regelmodul des Motors in Fig.6 und das Optimierungsproblem in integraler Form wieder für die Komponente 5 wieder.

Fig.6C gibt das Beispiel einer Regelbeschreibung für einen modellbasierten prädiktiven Regelansatz für einen Motor mit einer Abgasnachbehandlung unter ganzheitlicher Betrachtung wie das Beispiel in Fig.6B, jedoch mit einer Abwandlung betreffend die SCR wieder.

10 Optimierungsprobleme der in Fig.6 dargestellten Form sind können schlecht konditioniert sein, sodass trotz der geschickten Modularisierung keine Berechnung der Lösung auf dem Steuergerät erfolgen kann.

15 Daher werden die Nebenbedingungen insofern abgeschwächt, als dass lediglich sicherheitsrelevante Bedingungen wie zum Beispiel der maximale Spitzendruck oder die maximalen Turbolader-Drehzahlen als Ungleichungsbeschränkung eingehalten werden. Nicht sicherheitsrelevante Bedingungen wie zum Beispiel Ruß oder NO_x-Werte werden aufgeweicht, das heißt sie werden wie das Drehmoment über ein großes Gewicht und einen quadratischen Term in die Kostenfunktion aufgenommen, das heißt zum Beispiel nach dem Prinzip der minimierten Fehlerquadrate für die NO_x-Werte.

20 Diese Vorgehensweise erlaubt dem Optimierer, kurzzeitig ein wenig über oder unter dem Sollwert zu liegen, was mit dem Gewicht eingestellt werden kann. Dies ist von Vorteil, da der gewählte suboptimale MPC-Ansatz die zuletzt gefundene Stellgrößentrajektorie zur Reinitialisierung verwendet und es auf diese Weise zu einer Verbesserung der Lösung mit fortschreitender Zeit kommt. Dadurch sieht der Optimierer stets Verbesserungspotential und
25 nähert sich dem eigentlichen Sollwert an, wie er es auch beim Drehmoment machen würde. Ohne diese Aufweichung müsste die initiale Stellgröße stets zu einer exakten Einhaltung des Sollwerts führen.

Die bisher vorgestellten Optimierungsprobleme sind als Beispiele aufzufassen. Es sind beliebig viele andere Formulierungen denkbar. Zum Beispiel kann statt der Momente auch eine
30 Drehzahlabweichung minimiert werden – in diesem Fall spricht man von einem Drehzahlregler

anstatt eines Momentenreglers. Dazu kann eine vergleichsweise komplexe Lastmodellschätzung genutzt werden, wobei der Schätzer die Parameterdrehzahldifferenzialgleichung schätzt. Eine verbesserte Planung der Ressourcen kann erfolgen, da das Sollmoment nicht durch einen übergeordneten PI-Drehzahlregler vorgegeben wird, dessen zukünftige Momentenwünsche unbekannt sind. Die Reglerparametrierung ist dadurch intuitiv, da sie sich in erster Linie durch die Gewichtung der Regelziele ergibt.

Als weitere Feedback-Größe gibt es noch die Möglichkeit, die Stellgrößenschränken für die MPC-Blöcke anzupassen. Erkennt beispielsweise der Gaspfadregler, dass die Turbobyypassklappe nicht mehr funktioniert, gibt er den MPC-Blöcken weiter, in welchen Bereichen sich überhaupt noch λ variieren lässt. Allgemeiner können über Modulare Strukturen und Modelle online Änderungen der Motorkonfiguration durch Fehler/Alterung/etc bei der Regelung berücksichtigt werden, wenn diese von einem Diagnoseverfahren erkannt werden.

Des Weiteren kann in einem Modul eine Bankabschaltung berücksichtigt werden. So können parallele Modelle für beide Varianten rechnen und aktuell ungünstigere Varianten in Zeitintervallen berechnen sowie mit aktuell günstigeren Varianten abgleichen im Rahmen einer Kostenfunktion und dann auf die günstigere Variante umschalten. Generell können solche Verhalten auch im Rahmen von Polynommodellen oder sonstigen statischen Modellen berücksichtigt werden.

Alternativ, aber ein wenig aufwändiger, erfolgt eine Umschaltung im System für die Bankabschaltung. Die Rechnung der Optimierung erfolgt mit der aktuell verwendeten Konfiguration und in regelmäßigen Abständen wird mit anderen Modellvarianten verglichen. Falls die Kosten (Methode der minimierten Abweichungsquadrate) für die andere Variante geringer sind als die aktuell verwendete, dann wird die Umschaltung vorgenommen. Wenn die erforderlichen Messgrößen vorliegen, kann eine Adaption der verwendeten Modelle an das reale Systemverhalten vorgenommen werden. Das System kann diese Änderungen auch bei der Prädiktion berücksichtigen.

Zusammengefasst ergeben sich Vorteile, z.B. beim Umschalten des Turboladers, beim Berücksichtigen der Stellerdynamik, z.B. im Rahmen eines Raildruckmodells. Beim geregelten Gaspfad kann sich vorteilhaft z.B. ergeben: Reduktion der Freiheitsgrade, reduzieren der Anzahl der Stellgrößen, einer verbesserte Möglichkeit physikalisch mögliche Grenzen mitzuteilen sowie Änderungen betreffend Modelladaptionen, Alterungen, Modellabweichungen umzusetzen.

Die Prädiktion bringt Möglichkeiten einer leichteren Übertragbarkeit auf andere Systeme (Benzin, Gas, o.a. Motoren) mit sich und einen verringerten Bedatungsaufwand.

Komplexere klassische Strukturen können also mit den genannten Vorteilen durch kombinierte Module ersetzt werden gemäß dem Konzept der Erfindung; auch ohne aufwändige Vermessung
5 bei vorliegenden Modellen.

Bezugszeichenliste

	1000	Brennkraftmaschine
	100	Einrichtung zum prädiktiven Steuern und/oder Regeln
5	10	Modell
	200	Motor
	300	Abgas-/Gas-Pfad
	400	Abgasnachbehandlungssystem
	500	Einspritzsystem
10	600	Antriebsstrang
	11, 12, 13	Regler
	10	prädiktiver Regler
	20	Bedingungen
15	30	Beobachter
	21, 22, 23	modularisierte Bedingungsangaben
	31, 32, 33	modularisierte Beobachter
	1, 2, 3	prädiktiven Regelmodulen
	t1, t2, t3, T, S	Prozesszeiten und/oder Prozessskalen
20	1, 2, 3	Regelmodule
	G1, G2, G3	kennzeichnende Größen
	BG 1, BG2, BG 3	Betriebsgrößen
	SG 1, SG 2, SG3	Stellgrößen
	LL	Ladeluft
25	AG	Abgas
	DPF	Dieselpartikelfilter
	111	verbrennungsrelevante Komponente
	222	massenstromrelevante Komponente
30	333	Temperatur/Alterungs-relevante Komponente des AGN
	31, 32	Optimierer

ANSPRÜCHE

1. Verfahren zur prädiktiven Steuerung und/oder Regelung einer Brennkraftmaschine mit
5 Stellgrößen unter Vorgabe eines Modells der Brennkraftmaschine mit kennzeichnenden Größen
und eines Regelkreises für die Stellgrößen, wobei
- in dem Verfahren die Stellgrößen der Brennkraftmaschine geregelt oder gesteuert eingestellt
werden und das Verfahren die Schritte aufweist:
 - Messung von Ist-Werten und Vorgabe von Soll-Werten der kennzeichnenden Größen der
10 Brennkraftmaschine, sowie optional in Abhängigkeit von Rand- und/oder Umwelt- und/oder
Alterungs-Bedingungen, **dadurch gekennzeichnet, dass**
 - die kennzeichnenden Größen unter Vorgabe eines Modells der Brennkraftmaschine mit den
kennzeichnenden Größen und eines Regelkreises mit den Stellgrößen geregelt werden, wobei
das Regeln im Rahmen eines modellbasierten prädiktiven Regelns erfolgt, bei dem die
15 kennzeichnenden Größen des Modells der Brennkraftmaschine berechnet werden und die
Stellgrößen der Brennkraftmaschine prädiktiv geregelt eingestellt werden,
 - zum Regeln ein modellbasierter prädiktiver nichtlinearer Regler verwendet wird, der modular
mit einer Anzahl von modellbasierten prädiktiven Regelmodulen aufgebaut ist, wobei
 - wenigstens einem ersten modellbasierten prädiktiven Regelmodul eine erste Zeitskala,
20 insbesondere schnellere Prozesszeit und/oder kürzere Prozessskala, zugeordnet ist, und
 - wenigstens einem zweiten, vorzugsweise modellbasierten prädiktiven, Regelmodul eine zweite
Zeitskala, insbesondere langsamere Prozesszeit und/oder längere Prozessskala, zugeordnet ist,
wobei
 - die wenigstens eine erste und wenigstens eine zweite Zeitskala, insbesondere Prozesszeit
25 und/oder Prozessskala, unterschiedlich sind.
2. Verfahren nach Anspruch 1 **dadurch gekennzeichnet, dass**
- zum Berechnen die kennzeichnende Größen eines globalen Modells der Brennkraftmaschine in
Echtzeit auf einem Motorsteuergerät (ECU) für die gesamte Brennkraftmaschine im Rahmen
eines nichtlinearen modellbasierten prädiktiven Regelns berechnet werden, und/oder
30 - auf Basis des globalen Modells der Brennkraftmaschine, insbesondere des Motors, Soll-Werte
und Stellgrößen für das erste und/oder zweite Regelmodul bestimmt werden, welche einer
aktuellen Betreibssituation im Sinne eines Gütemaßes angepasst werden.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2 **dadurch gekennzeichnet, dass**
- die Berechnung kennzeichnender Größen des ersten Regelmoduls für das Modell der Brennkraftmaschine im ersten modellbasierten prädiktiven Regelmodul abhängig von der Berechnung kennzeichnender Größen des zweiten Regelmoduls für das Modell der Brennkraftmaschine im zweiten, vorzugsweise modellbasierten prädiktiven, Regelmodul erfolgt, und/oder
 - die Berechnung kennzeichnender Größen des ersten Regelmoduls für das Modell der Brennkraftmaschine im ersten modellbasierten prädiktiven Regelmodul einer ersten Zeitskala, insbesondere schnelleren Prozesszeit und/oder kürzeren Prozessskala, unter Vorgabe von berechneten kennzeichnenden Größen des zweiten Regelmoduls für das Modell der Brennkraftmaschine im zweiten, vorzugsweise modellbasierten prädiktiven, Regelmodul einer zweiten Zeitskala, insbesondere langsameren Prozesszeit und/oder längeren Prozessskala, erfolgt.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3 **dadurch gekennzeichnet, dass,** insbesondere für ein Motormanagement, das erste modellbasierte prädiktive Regelmodul der ersten Zeitskala, insbesondere schnelleren Prozesszeit und/oder kürzeren Prozessskala, ein Regelmodul für den eine Anzahl von Zylindern aufweisenden Motor ist, insbesondere wobei verbrennungs-kennzeichnende Größen des Motors berechnet werden.
5. Verfahren nach Anspruch 4 **dadurch gekennzeichnet, dass** für das Motormanagement
- Größen einer Verbrennung, nämlich eines NO_x- und/oder Ruß-Wertes, und/oder
 - kennzeichnende Größen, nämlich ein Lambda-Wert und/oder eine Abgasrückführrate, berechnet werden.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, dass,** insbesondere für ein Einspritzmanagement, das erste modellbasierte prädiktive Regelmodul der ersten Zeitskala, insbesondere schnelleren Prozesszeit und/oder kürzeren Prozessskala, ein Regelmodul umfasst für das ein Common-Rail aufweisendes Einspritzsystem mit einer Anzahl von den Zylindern zugeordneten Injektoren, wobei einem Injektor ein Einzelspeicher zugeordnet ist, der zum Vorhalten von Kraftstoff aus dem Common-Rail für den Injektor ausgebildet ist, wobei Injektion-kennzeichnende Größen des Einspritzsystems berechnet werden.

7. Verfahren nach Anspruch 6 **dadurch gekennzeichnet, dass**, für das Einspritzmanagement ein Spritzbeginn (BOI), ein Spritzende (SE) und/oder ein Raildruck (p-Rail) berechnet werden.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5 **dadurch gekennzeichnet, dass**,
5 insbesondere für einen Gasmotor, ein Zündzeitpunkt und/oder eine Gasmasse berechnet werden.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet, dass**, insbesondere für ein Gas- und Abgasrückführungsmanagement,
- dem ersten modellbasierten prädiktiven Regelmodul der ersten Zeitskala, insbesondere schnelleren Prozesszeit und/oder kürzeren Prozessskala, ein Regelmodul für die Gas- und
10 Abgasrückführung mit einem Gas- und Abgaspfad zeitlich gestaffelt nachgeordnet und/oder mit diesem zusammengefasst ist, wobei diesem modellbasierten prädiktiven Regelmodul für die Gas- und Abgasrückführung eine dritte Zeitskala, insbesondere mittelschnelle Prozesszeit und/oder mittelkurze Prozessskala, zugeordnet ist, wobei Gas- und Abgaspfad -kennzeichnende Größen der Gas- und Abgasführung berechnet werden.
- 15 10. Verfahren nach Anspruch 9 **dadurch gekennzeichnet, dass** für das Gas- und Abgasrückführmanagement Größen einer Abgasrückführung berechnet werden, insbesondere einer Abgasrückführrate (AGN), einer oder mehrerer Drosselklappen (Stellung DK), einer oder mehrerer Spenderklappen (Stellung SK) und/oder einer oder mehrerer Turbinenbypasse (Rate TP), berechnet werden.
- 20 11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet, dass** insbesondere für ein Abgasnachbehandlungs-Management, das zweite modellbasierte prädiktive Regelmodul der zweiten Zeitskala, insbesondere langsameren Prozesszeit und/oder längeren Prozessskala, ein Regelmodul für die Abgasnachbehandlung (AGN), insbesondere mit einem Katalysator, ist, wobei
25 abgasnachbehandlungs-kennzeichnende Größen der Abgasnachbehandlung, insbesondere mit einem Katalysator, berechnet werden.
12. Verfahren nach Anspruch 11 **dadurch gekennzeichnet, dass** für das Abgasnachbehandlungs-Management Größen der Abgasnachbehandlung und/oder eines Katalysators berechnet werden, nämlich eine Abgas- und/oder Katalysator Temperatur, eine
30 Aufwärm/Abkühlrate und/oder eine Umsatzrate.

13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet, dass** dem ersten Regelmodul Größen der Abgasnachbehandlung, nämlich eine Gas- und/oder Abgastemperatur, insbesondere ein Emissionswert von Stickoxiden oder sonstige Emissionswerte eines Katalysators, vorgegeben werden.
- 5 14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet, dass**
- im ersten modellbasierten prädiktiven Regelmodul, insbesondere abhängig vom zweiten, vorzugsweise modellbasierten prädiktiven, Regelmodul, berücksichtigt werden:
 - Rand- und/oder Umwelt- und/oder Alterungs-Bedingungen, der kennzeichnenden Größen der Brennkraftmaschine, und/oder
 - 10 - Ist-Werte und Soll-Werte der kennzeichnenden Größen der Brennkraftmaschine, und/oder
 - Schätzungen durch nichtlineare Beobachter, und/oder
 - ein Optimierungsalgorithmus.
- 15 15. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet, dass** die kennzeichnenden Größen des Modells der Brennkraftmaschine des zweiten, vorzugsweise modellbasierten prädiktiven, Regelmoduls einer zweiten Zeitskala, insbesondere langsameren Prozesszeit und/oder längeren Prozessskala, dynamisch berechnet werden und die kennzeichnenden Größen des Modells der Brennkraftmaschine des ersten modellbasierten prädiktiven Regelmoduls einer ersten Zeitskala, insbesondere schnelleren Prozesszeit und/oder kürzeren Prozessskala, statisch berechnet werden.
- 20 16. Verfahren nach Anspruch 13 **dadurch gekennzeichnet, dass** die statische Berechnung mittels nichtlinearer Polynome und die dynamische Berechnung mittels eines Differentialgleichungsmodells erfolgt.
- 25 17. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 16 **dadurch gekennzeichnet, dass** die erste Zeitskala, insbesondere schnellere Prozesszeit und/oder kürzere Prozessskala, und/oder die zweite Zeitskala, insbesondere langsamere Prozesszeit und/oder längere Prozessskala, maßgeblich ist für die Festlegung einer zeitlichen Regelung gemäß einem der Parameter, die ausgewählt sind aus der Gruppe bestehend aus: Zeitskala eines Regelungszeitraumes, Zeitschritt eines Regelintervalls, Abtastrate eines Soll/Ist-Wert-Abgleichs, Rechenzykluszeit eines Reglers und sonstige Berechnungsraten, Prädiktionshorizont.

18. Einrichtung zum prädiktiven Steuern und/oder Regeln einer Brennkraftmaschine, mit wenigstens einem ersten modellbasierten prädiktiven Regelmodul und einem zweiten, vorzugsweise modellbasierten prädiktiven, Regelmodul;

- insbesondere für ein Motormanagement und/oder ein Einspritzmanagement und/oder ein Gas- und Abgasrückführmanagement und/oder ein Abgasnachbehandlungs-Management,
5 - die ausgebildet sind zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche 1 bis 17,

- insbesondere wobei dem ersten modellbasierten prädiktiven Regelmodul und/oder zweiten, vorzugsweise modellbasierten prädiktiven, Regelmodul ein Steuerkennfeld und/oder ein

10 Lernkennfeld zugeordnet ist.

19. Brennkraftmaschine mit einer Einrichtung zum prädiktiven Steuern und/oder Regeln der Brennkraftmaschine nach Anspruch 18, insbesondere einem Motorsteuergerät (ECU) für die gesamte Brennkraftmaschine zur Steuerung und/oder Regelung, im Rahmen eines nichtlinearen modellbasierten prädiktiven Regelns unter Vorgabe eines Modells der Brennkraftmaschine mit
15 kennzeichnenden Größen und eines Regelkreises für die Stellgrößen, **dadurch gekennzeichnet, dass**, die Einrichtung, insbesondere das Motorsteuergerät, zur Ausführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 17 ausgebildet ist, wobei

- die kennzeichnenden Größen unter Vorgabe eines Modells der Brennkraftmaschine mit den kennzeichnenden Größen und eines Regelkreises mit den Stellgrößen geregelt werden, wobei
20 das Regeln im Rahmen eines modellbasierten prädiktiven Regelns erfolgt, bei dem die kennzeichnenden Größen des Modells der Brennkraftmaschine berechnet werden und die Stellgrößen der Brennkraftmaschine prädiktiv geregelt eingestellt werden,

- zum Regeln ein modellbasierter prädiktiver nichtlinearer Regler verwendet wird, der modular mit einer Anzahl von modellbasierten prädiktiven Regelmodulen aufgebaut ist, wobei

25 - wenigstens einem ersten modellbasierten prädiktiven Regelmodul eine erste Zeitskala, insbesondere schnellere Prozesszeit und/oder kürzere Prozessskala, zugeordnet ist, und
- wenigstens einem zweiten, vorzugsweise modellbasierten prädiktiven, Regelmodul eine zweite Zeitskala, insbesondere langsamere Prozesszeit und/oder längere Prozessskala, zugeordnet ist, wobei

30 - die wenigstens eine erste und wenigstens eine zweite Zeitskala, insbesondere Prozesszeit und/oder Prozessskala, unterschiedlich sind.

20. Brennkraftmaschine nach Anspruch 18 **dadurch gekennzeichnet, dass**, die Brennkraftmaschine aufweist:

- einen eine Anzahl von Zylindern aufweisenden Motor,
insbesondere mit einem ein Common-Rail aufweisenden Einspritzsystem mit einer Anzahl von
den Zylindern zugeordneten Injektoren, wobei einem Injektor ein Einzelspeicher zugeordnet ist,
der zum Vorhalten von Kraftstoff aus dem Common-Rail für den Injektor ausgebildet ist,
- 5 oder insbesondere einen Gasmischer und einen Zündezeitpunktgeber,
- eine Gas- und Abgasrückführung mit einen Gas- und Abgaspfad,
- eine Abgasnachbehandlung, insbesondere mit einem Katalysator.

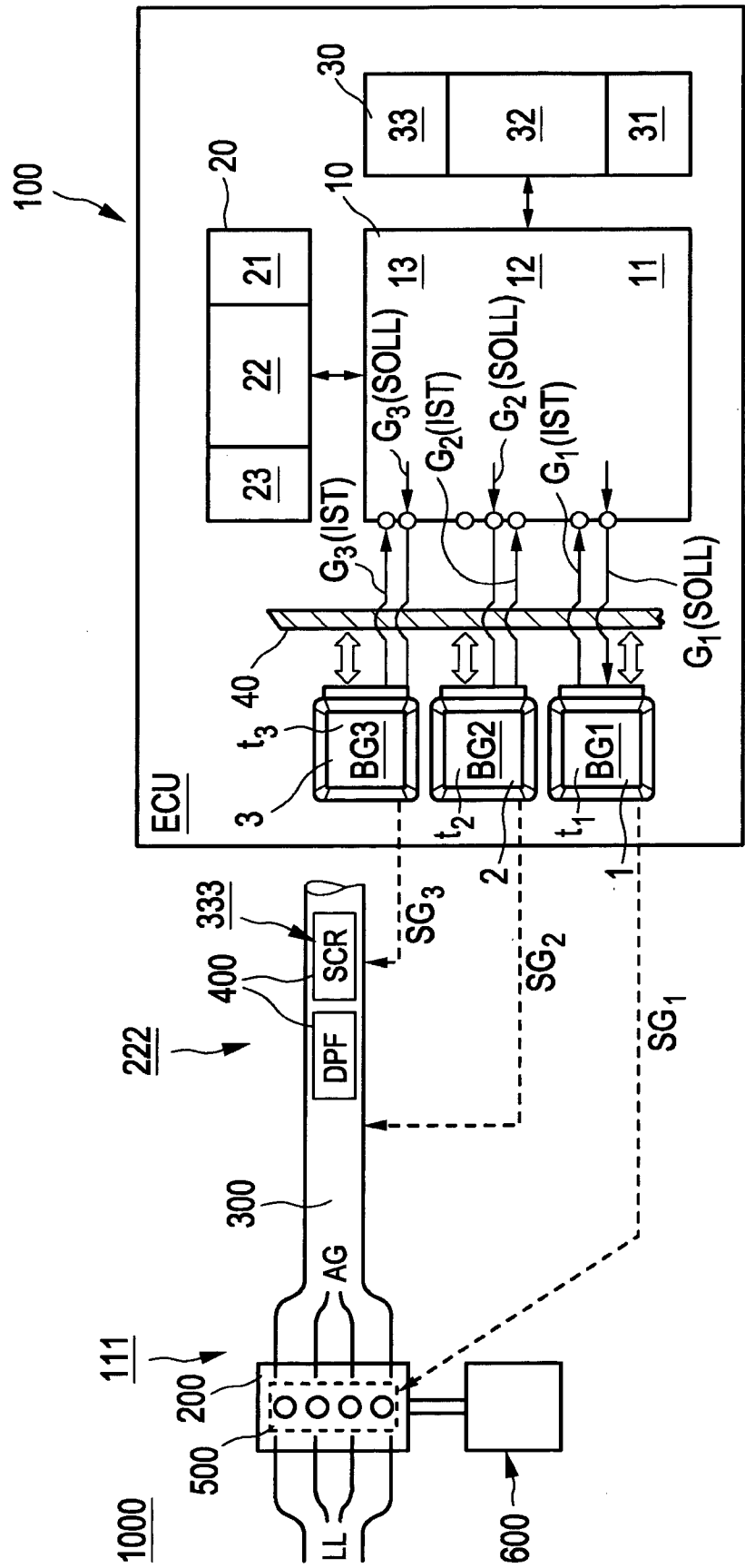


FIG. 1

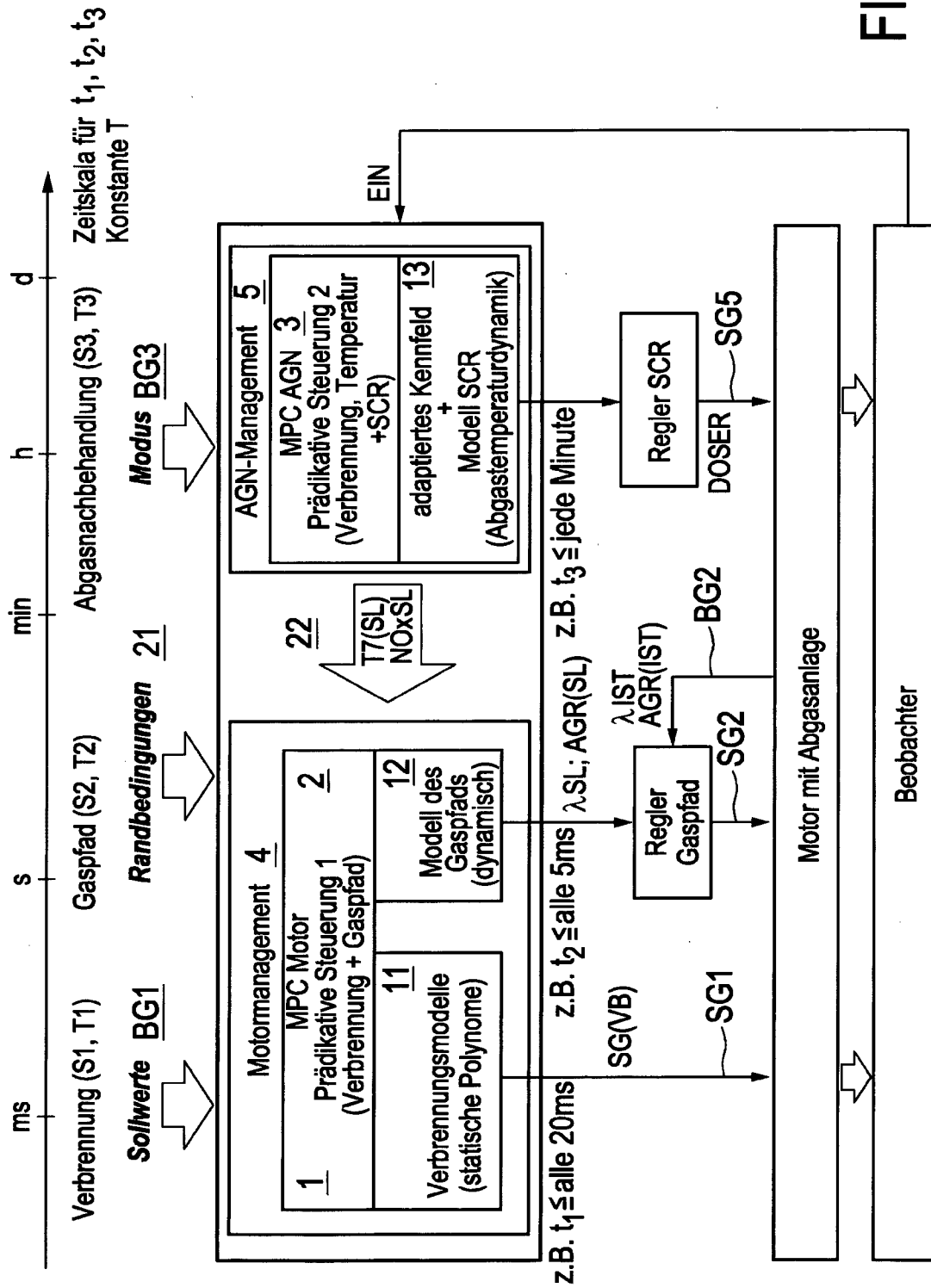
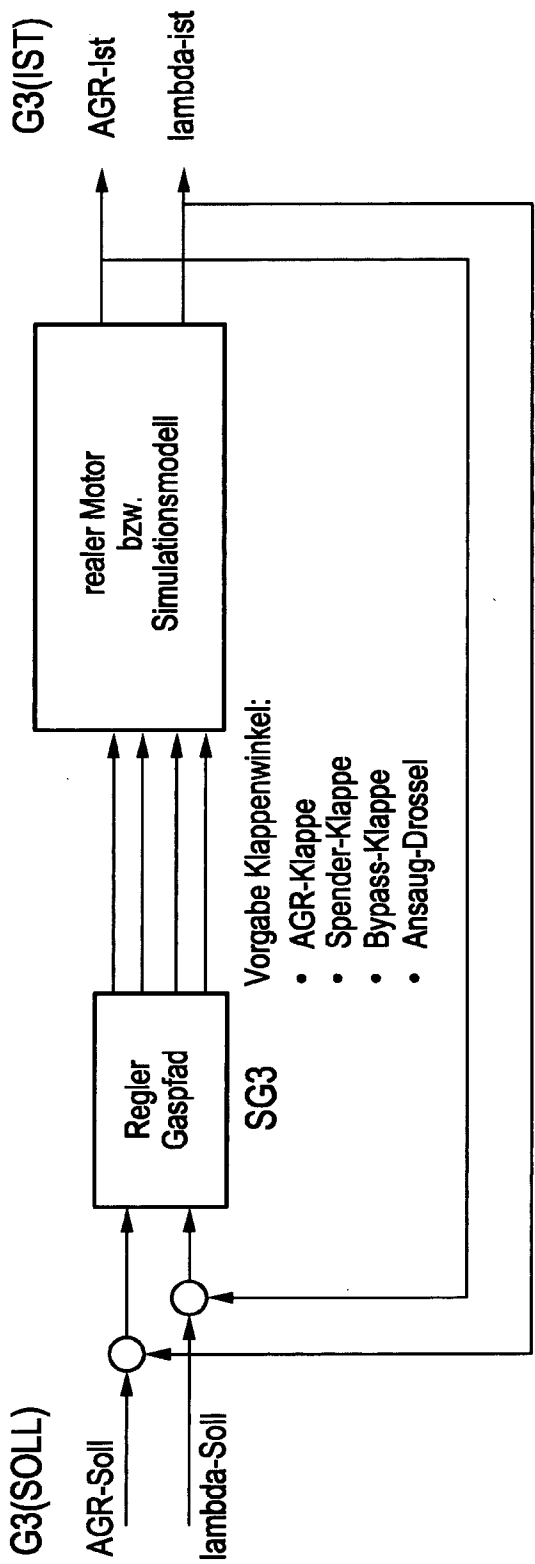


FIG. 2



abgeleitetes Ersatzmodell für Optimierer

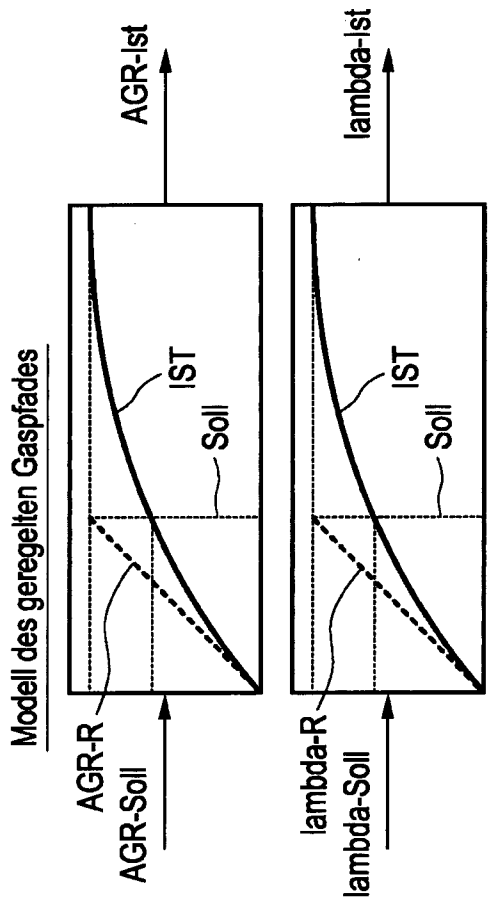
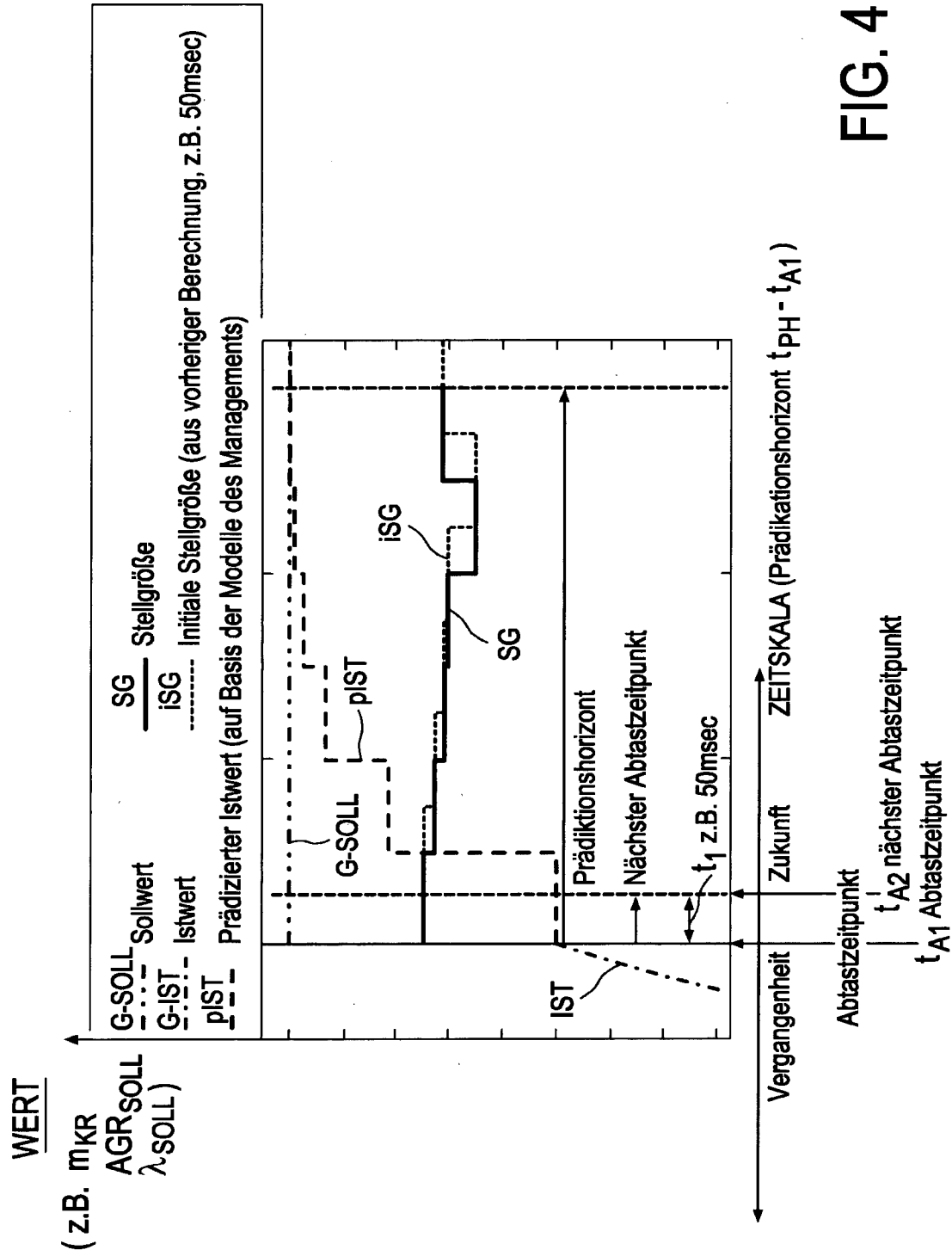


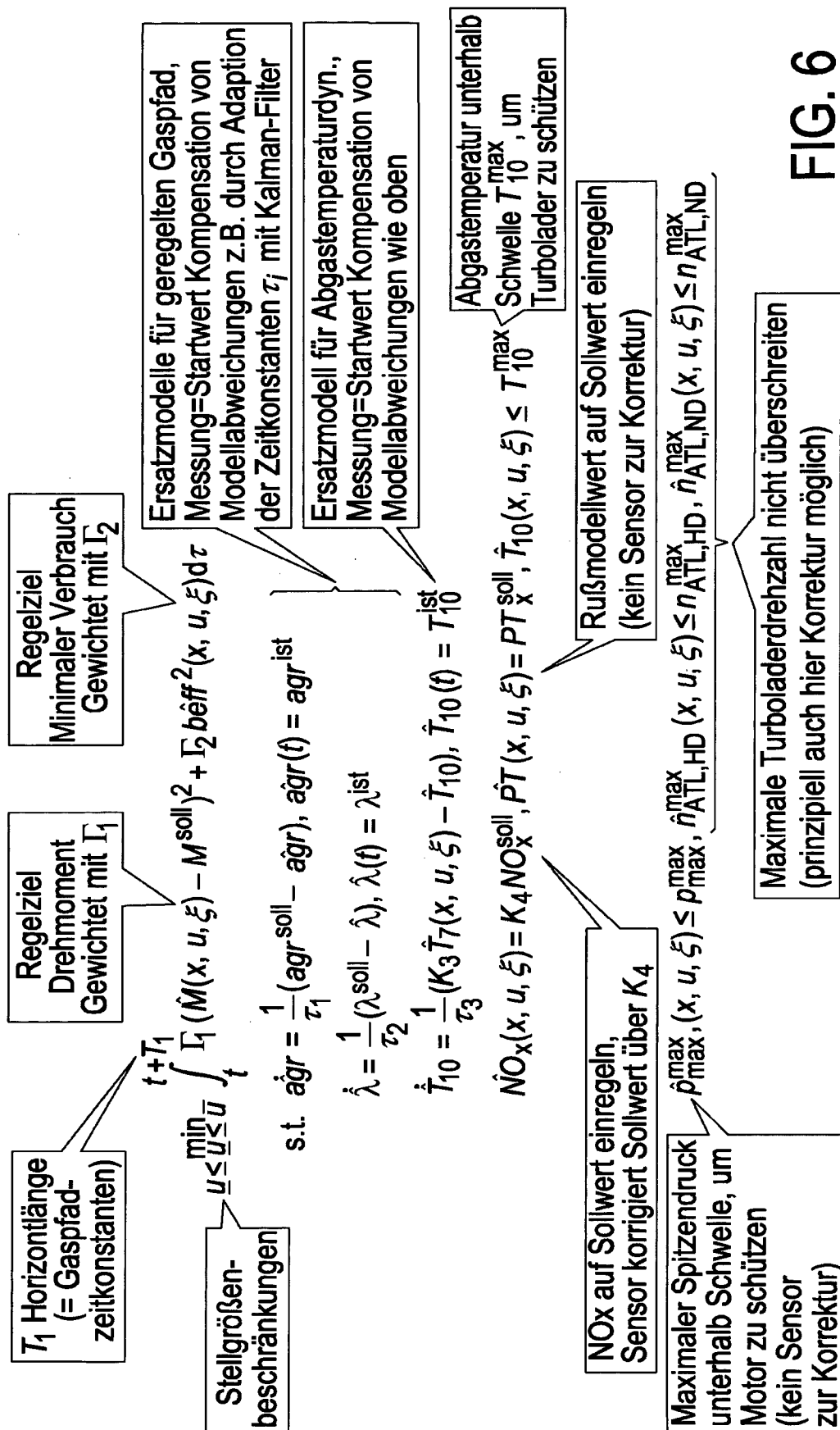
FIG. 3



- Zustände $x = [\hat{a}_{gr}, \hat{\lambda}, \hat{\tau}_{10}]^T$
- Messgrößen $\xi = [n_{mot}, T_0, p_0, L_0, T_5, p_{10}, T_{10}]^T$ (im Gegensatz zu Zuständen keine Prädiktion)
- Sollgrößen/Schranken $w = [M^{soll}, NO_x^{soll}, PT^{soll}, p_{max}^{max}, n_{ATL,HD}^{max}, n_{ATL,ND}^{max}, T_7^{soll}, T_{10}^{min}, T_{10}^{max}]^T$
- Stellgrößen MPC-Motor $u = [agr^{soll}, \lambda^{soll}, BOI, m_{ks}, p_{rail}]^T$
- Stellgrößenbeschränkungen: Minimum $\underline{u} = [\underline{agr}^{soll}, \underline{\lambda}^{soll}, \underline{BOI}, \underline{m}_{ks}, \underline{p_{rail}}]^T$
Maximum $\bar{u} = [\bar{agr}^{soll}, \bar{\lambda}^{soll}, \bar{BOI}, \bar{m}_{ks}, \bar{p_{rail}}]^T$
- Parameter $p = [\Gamma_1, \Gamma_2, \tau_1, \tau_2, K_3, \tau_3, K_4, K_5, \tau_5]^T$ (Gewichte Γ_i zur Reglerparametrierung und Adaptiongrößen τ_i, K_i aus Parameterschätzern zur Kompensation von Modellabweichungen)

FIG. 5

Beispiel Normalbetrieb für Motor ohne SCR:
Erklärung der Einzelelemente



Beispiel Thermomanagement für Motor ohne SCR:

MPC Motor berechnet Stellgröße durch approximative Lösung des Optimierungsproblems

$$\min_{\underline{u} \leq \underline{U} \leq \bar{u}} \int_t^{t+T_1} \Gamma_1 (\dot{M}(x, u, \xi) - M^{\text{soll}})^2 + d\tau$$

$$\text{s.t. } \dot{agr} = \frac{1}{\tau_1} (agr^{\text{soll}} - \hat{agr}), \quad \hat{agr}(t) = agr^{\text{ist}}$$

$$\dot{\lambda} = \frac{1}{\tau_2} (\lambda^{\text{soll}} - \hat{\lambda}), \quad \hat{\lambda}(t) = \lambda^{\text{ist}}$$

$$\dot{T}_{10} = \frac{1}{\tau_3} (K_3 \hat{T}_7(x, u, \xi) - \hat{T}_{10}), \quad \hat{T}_{10}(t) = T_{10}^{\text{ist}}$$

$$\dot{NO}_x(x, u, \xi) = K_4 NO_x^{\text{soll}}, \quad \hat{PT}(x, u, \xi) = PT_x^{\text{soll}}, \quad T_{10}^{\text{min}} \leq \hat{T}_{10}(x, u, \xi) \leq T_{10}^{\text{max}}$$

$$\hat{p}_{\text{max}}(x, u, \xi) \leq p_{\text{max}}^{\text{max}}, \quad \hat{n}_{\text{ATL,HD}}^{\text{max}}(x, u, \xi) \leq n_{\text{ATL,HD}}^{\text{max}}, \quad \hat{n}_{\text{ATL,ND}}^{\text{max}}(x, u, \xi) \leq n_{\text{ATL,ND}}^{\text{max}}$$

Unterschied zum Normalbetrieb: DPF ist zu kalt, daher muss seine Temperatur auf Mindestwert angehoben werden. Auf die Verbrauchsoptimalität wird hier verzichtet, da diese ein entgegengesetztes Interesse besitzt (nach dem Thermomanagement sinkt der Verbrauch i.A., was durch die selbst. Modelle nicht repräsentiert werden kann).

FIG. 6A

Beispiel Kopplung mit übergeordnetem „MPC AGN“ für Motor mit SCR:

MPC Motor berechnet Stellgröße durch approximative Lösung des Optimierungsproblems

$$\min_{\underline{u} \leq \underline{u} \leq \bar{u}} \int_t^{t+T_1} \Gamma_1 (\dot{M}(x, u, \xi) - M^{\text{soll}})^2 + \Gamma_2 \text{bëff}^2(x, u, \xi) d\tau$$

$$\text{s.t. } \dot{agr} = \frac{1}{\tau_1} (agr^{\text{soll}} - agr), \quad agr(t) = agr^{\text{ist}}$$

$$\dot{\lambda} = \frac{1}{\tau_2} (\lambda^{\text{soll}} - \lambda), \quad \lambda(t) = \lambda^{\text{ist}}$$

$$\dot{NO}_x(x, u, \xi) = \dot{NO}_{x, \text{vor SCR}}^{\text{soll}}, \quad \dot{P}T(x, u, \xi) = PT_x^{\text{soll}}, \quad \dot{T}_7(x, u, \xi) = T_7^{\text{soll}}$$

$$\hat{p}_{\text{max}}(x, u, \xi) \leq p_{\text{max}}^{\text{max}}, \quad \hat{n}_{\text{ATL,HD}}^{\text{max}}(x, u, \xi) \leq n_{\text{ATL,HD}}^{\text{max}}, \quad \hat{n}_{\text{ATL,ND}}^{\text{max}}(x, u, \xi) \leq n_{\text{ATL,ND}}^{\text{max}}$$

Unterschied zum Normalbetrieb:

sämtliche Temperatureffekte werden in „MPC AGN“ mit längerem Prädiktionshorizont beachtet und fallen daher aus. Γ_7^{soll} und NO_x^{max} sind Schnittstellen der beiden MPC Blöcke, um übergeordnete Ziele zu erreichen, die auf langsamerer Zeitskala geschehen. D.h. ohne dass es hier in „MPC Motor“ ersichtlich ist, wird durch die übergeordnete Instanz „MPC AGN“ ein übergeordnetes Ziel erreicht: Minimierung der Betriebskosten (d.h. AdBlue&Diesel). Dazu wird der SCR als neuer Freiheitsgrad ausgenutzt, mit dem sich die Grenze der vom Motor erzeugten NOx-Emissionen NO_x^{soll} verschieben lässt. Hierzu benötigt der SCR allerdings T_7^{soll} .

FIG. 6B

- Zustände $x = [\hat{T}_{10}, \hat{T}_{SCR}]^T$
- Messgrößen $\xi = [n_{\text{mot}}, T_0, p_0, L_0, T_5, p_{10}, T_{10}, T_{SCR}]^T$ (im Gegensatz zu Zuständen keine Prädiktion)
- Sollgrößen/Schranken $w = [M^{\text{soll}}, NO_x^{\text{soll}}, n_{\text{ach SCR}}, PT^{\text{soll}}, p_{\text{max}}, n_{\text{ATL,HD}}^{\text{max}}, n_{\text{ATL,ND}}^{\text{max}}, T_{SCR}^{\text{min}}, T_{SCR}^{\text{max}}, T_{10}^{\text{min}}, T_{10}^{\text{max}}]^T$
- Stellgrößen MPC-Motor $u = [agr^{\text{soll}}, \lambda^{\text{soll}}, BOI, m_{ks}, p_{rail}]^T$
- Stellgrößenbeschränkungen: Minimum $\underline{u} = [agr^{\text{soll}}, \lambda^{\text{soll}}, BOI, \underline{m}_{ks}, \underline{p}_{rail}]^T$
Maximum $\bar{u} = [agr^{\text{soll}}, \lambda^{\text{soll}}, BOI, \bar{m}_{ks}, \bar{p}_{rail}]^T$
- Parameter $p = [K_5, \tau_5, K_6]^T$ (Gewichte Γ_i und Adaptionsgrößen τ_i, K_i)
- Auf dieser Zeitskala Gaspfad statisch, d.h. Polynome werden mit $agr^{\text{soll}}, \lambda^{\text{soll}}$ ausgewertet
- MPC AGN approx. $t + T_2$
Lösung $\min_{u \leq \bar{u}} \int_t^{t+T_2} \Gamma_1 (\hat{M}(x, u, \xi) - M^{\text{soll}})^2 + \Gamma_3 \hat{m}_{br}(u, \xi) + \Gamma_4 \hat{m}_{ad}(x, u, \xi) d\tau$
(Normalbetrieb) s.t. $\dot{\hat{T}}_{10} = \frac{1}{\tau_3} (K_3 \hat{T}_7(u, \xi) - \hat{T}_{10}), \hat{T}_{10}(t) = T_{10}^{\text{ist}}$
 $\dot{\hat{T}}_{SCR} = \frac{1}{\tau_5} (K_5 \hat{T}_{10} - \hat{T}_{SCR}), \hat{T}_{SCR}(t) = T_{SCR}^{\text{ist}}$
 $(1 - n_{SCR}(T_{SCR}, \hat{m}_{Abgas}(u, \xi))) \hat{NO}_{x, \text{vorSCR}}(u, \xi) = K_6 NO_{x, \text{nachSCR}}^{\text{soll}}, \hat{P}T(u, \xi) = PT^{\text{soll}}, T_{SCR}^{\text{min}} \leq T_{SCR} \leq T_{SCR}^{\text{max}}$
 $\hat{p}_{\text{max}}^{\text{max}}(u, \xi) \leq p_{\text{max}}^{\text{max}}, \hat{n}_{\text{ATL,HD}}^{\text{max}}(u, \xi) \leq n_{\text{ATL,HD}}^{\text{max}}, \hat{n}_{\text{ATL,ND}}^{\text{max}}(u, \xi) \leq n_{\text{ATL,ND}}^{\text{max}}$
- Stellgrößen sind interne Größen, zur Plausibilisierung
- Ergebnisse $\hat{T}_7(u, \xi), \hat{NO}_{x, \text{vorSCR}}(u, \xi)$ werden an untergeordneten Block „Motor MPC“ als Sollwerte $\hat{T}_7^{\text{soll}}, \hat{NO}_{x, \text{vorSCR}}$ weitergegeben

T_2 Horonzlänge
(= Temperatur-
zeitkonstanten)

FIG. 6C

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2016/001671

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

INV. F02D41/14 F02D37/02
 ADD. F02D41/30 F02D41/00

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

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

F02D

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

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	EP 1 363 005 A2 (CATERPILLAR INC [US]) 19 November 2003 (2003-11-19) abstract; claims 1-4; figures 1-4 paragraph [0002] - paragraph [0006] paragraph [0015] - paragraph [0019] paragraph [0021] - paragraph [0028] -----	1-8, 13-19
X	DAVID J. KAPPAROS ET AL: "Integration of Diesel Engine, Exhaust System, Engine Emissions and Aftertreatment Device Models", SAE TECHNICAL PAPER SERIES, vol. 1, 11 April 2005 (2005-04-11), XP055329465, US ISSN: 0148-7191, DOI: 10.4271/2005-01-0947 the whole document ----- -/-	1,9-12, 18-20



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

19 December 2016

Date of mailing of the international search report

02/01/2017

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
 NL - 2280 HV Rijswijk
 Tel. (+31-70) 340-2040,
 Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Rocabruna Vilardell

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2016/001671

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2011/172897 A1 (TSUZUKI KOICHIRO [JP] ET AL) 14 July 2011 (2011-07-14) abstract; claims 1-20; figures 1,2,4,11,17,23-29 paragraph [0057] - paragraph [0064] paragraph [0103] - paragraph [0110] paragraph [0137] - paragraph [0148] -----	1,9-12, 18,19

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2016/001671

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date	
EP 1363005	A2	19-11-2003	EP 1363005 A2	19-11-2003
			JP 4365133 B2	18-11-2009
			JP 2003328837 A	19-11-2003
			US 2003217021 A1	20-11-2003
			US 2006184305 A1	17-08-2006

US 2011172897	A1	14-07-2011	JP 5006947 B2	22-08-2012
			JP 2011144753 A	28-07-2011
			US 2011172897 A1	14-07-2011

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2016/001671

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES

INV. F02D41/14 F02D37/02
ADD. F02D41/30 F02D41/00

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

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
F02D

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

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	EP 1 363 005 A2 (CATERPILLAR INC [US]) 19. November 2003 (2003-11-19) Zusammenfassung; Ansprüche 1-4; Abbildungen 1-4 Absatz [0002] - Absatz [0006] Absatz [0015] - Absatz [0019] Absatz [0021] - Absatz [0028] -----	1-8, 13-19
X	DAVID J. KAPPAROS ET AL: "Integration of Diesel Engine, Exhaust System, Engine Emissions and Aftertreatment Device Models", SAE TECHNICAL PAPER SERIES, Bd. 1, 11. April 2005 (2005-04-11), XP055329465, US ISSN: 0148-7191, DOI: 10.4271/2005-01-0947 das ganze Dokument ----- -/-	1,9-12, 18-20

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

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

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

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

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

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

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

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

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

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

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

19. Dezember 2016

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

02/01/2017

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde

Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Rocabruna Vilardell

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	US 2011/172897 A1 (TSUZUKI KOICHIRO [JP] ET AL) 14. Juli 2011 (2011-07-14) Zusammenfassung; Ansprüche 1-20; Abbildungen 1,2,4,11,17,23-29 Absatz [0057] - Absatz [0064] Absatz [0103] - Absatz [0110] Absatz [0137] - Absatz [0148] -----	1,9-12, 18,19

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2016/001671

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
EP 1363005	A2	19-11-2003	EP 1363005 A2 19-11-2003
		JP 4365133 B2 18-11-2009	
		JP 2003328837 A 19-11-2003	
		US 2003217021 A1 20-11-2003	
		US 2006184305 A1 17-08-2006	

US 2011172897	A1	14-07-2011	JP 5006947 B2 22-08-2012
		JP 2011144753 A 28-07-2011	
		US 2011172897 A1 14-07-2011	
