

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

(19) Weltorganisation für geistiges
Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales
Veröffentlichungsdatum
14. Januar 2016 (14.01.2016)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2016/005414 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
F02D 41/14 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2015/065526

(22) Internationales Anmeldedatum:
7. Juli 2015 (07.07.2015)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2014 213 316.5 9. Juli 2014 (09.07.2014) DE
10 2014 213 328.9 9. Juli 2014 (09.07.2014) DE

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

(72) Erfinder: **REMELE, Jörg**; Am Sonnenbühl 34, 88709
Hagnau (DE). **FRANK, Tobias**; Ettostr. 11, 88048
Friedrichshafen (DE). **NIEMEYER, Jens**; Montafonstr.
11, 88045 Friedrichshafen (DE).

(74) Anwälte: **KORDEL, Mattias** et al.; Gleiss Große Schrell
und Partner mbB, Leitzstraße 45, 70469 Stuttgart (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW,
BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK,
DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM,
GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP,
KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME,
MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ,
OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA,
SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM,
TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM,
ZW.

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

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR OPERATING AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE, CONTROL DEVICE FOR AN INTERNAL
COMBUSTION ENGINE, AND INTERNAL COMBUSTION ENGINE

(54) Bezeichnung : VERFAHREN ZUM BETREIBEN EINER BRENNKRAFTMASCHINE, STEUEREINRICHTUNG FÜR
EINE BRENNKRAFTMASCHINE UND BRENNKRAFTMASCHINE

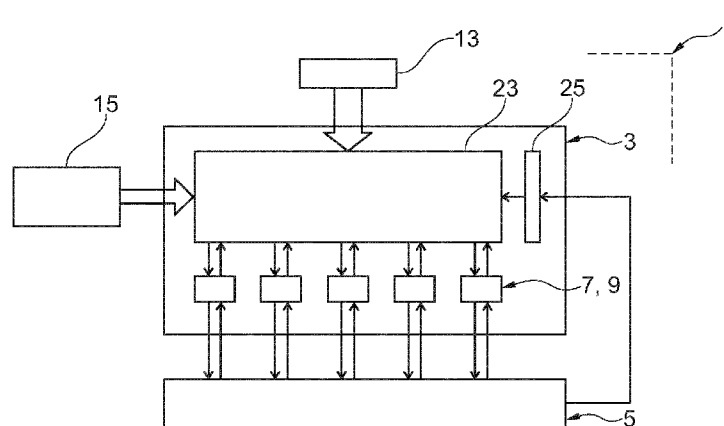


Fig. 3

(57) Abstract: The invention relates to a method for operating an internal combustion engine (1), wherein at least one figure (A) is used for the open-loop or closed-loop control of the internal combustion engine (1), said figure describing at least one physical target variable (G) of the internal combustion engine (1) depending on a plurality of control variables (u) of the internal combustion engine (1), wherein at least one condition for the at least one physical target variable (G) is established, wherein control variable values for the control variables (u) are determined in real time and based on the figure (A), by means of which control variable values the at least one condition is fulfilled by the at least one physical target variable (A), wherein the internal combustion engine (1) is controlled using the control variable values determined in this way.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



WO 2016/005414 A1

**Erklärungen gemäß Regel 4.17:**

- hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, ein Patent zu beantragen und zu erhalten (Regel 4.17 Ziffer ii)
- Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv)

Veröffentlicht:

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

Es wird ein Verfahren zum Betreiben einer Brennkraftmaschine (1) vorgeschlagen, wobei zur Steuerung oder Regelung der Brennkraftmaschine (1) wenigstens eine Abbildung (A) verwendet wird, welche wenigstens eine physikalische Zielgröße (G) der Brennkraftmaschine (1) in Abhängigkeit von einer Mehrzahl von Stellgrößen (u) der Brennkraftmaschine (1) beschreibt, wobei wenigstens eine Bedingung für die wenigstens eine physikalische Zielgröße (G) aufgestellt wird, wobei in Echtzeit anhand der Abbildung (A) Stellgrößenwerte für die Stellgrößen (u) ermittelt werden, mit denen die wenigstens eine Bedingung durch die wenigstens eine physikalische Zielgröße (A) erfüllt ist, wobei die Brennkraftmaschine (1) mit den derart ermittelten Stellgrößenwerten angesteuert wird.

BESCHREIBUNG

5 Verfahren zum Betreiben einer Brennkraftmaschine, Steuereinrichtung für eine Brennkraftmaschine und Brennkraftmaschine

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben einer Brennkraftmaschine, eine Steuereinrichtung für eine Brennkraftmaschine, und eine Brennkraftmaschine.

Beim Betrieb einer Brennkraftmaschine ist es typischerweise erforderlich, wenigstens eine physikalische Zielgröße, beispielsweise eine Stickoxid-Konzentration oder eine Rußkonzentration im Abgas, einen Spitzendruck in einem Brennraum der Brennkraftmaschine, einen Abgasmassenstrom, eine Abgastemperatur, ein abgegebenes Moment der Brennkraftmaschine, oder einen Brennstoffverbrauch, einzustellen, insbesondere zu steuern oder zu regeln. Gegebenenfalls ist es auch notwendig, eine solche physikalische Zielgröße auf einen – insbesondere gesetzlich vorgegebenen – Maximalwert zu begrenzen. Zusätzlich oder alternativ kann es erforderlich oder wünschenswert sein, für eine solche physikalische Zielgröße ein Extremum anzustreben, beispielsweise um einen Verbrauch der Brennkraftmaschine zu optimieren, insbesondere zu minimieren. Zur Beeinflussung einer solchen physikalischen Zielgröße wird üblicherweise eine Stellgröße, beispielsweise eine Klappenposition oder ein Parameter zur Ansteuerung eines Injektors, beeinflusst. Insbesondere werden im Betrieb der Brennkraftmaschine typischerweise eine Mehrzahl physikalischer Zielgrößen eingestellt, wobei den jeweiligen physikalischen Zielgrößen separat zugeordnete Stellgrößen jeweils durch einzelne, separate Regelkreise beeinflusst werden. Somit werden letztlich die physikalischen Zielgrößen voneinander separat betrachtet, wobei sie jedoch tatsächlich im Motorbetrieb miteinander gekoppelt sind. Physikalische Wechselwirkungen zwischen den einzelnen physikalischen Zielgrößen werden nicht oder höchstens stark vereinfacht berücksichtigt. Insbesondere werden Abweichungen einer physikalischen Zielgröße von einem Sollwert üblicherweise nur durch einen Reglereingriff auf genau eine Stellgröße ausgeglichen. Dies bedingt, dass die Abweichung nicht zwingend auf eine Weise ausgeglichen wird, welche für das Gesamtsystem der Brennkraftmaschine optimal ist, beispielsweise in Bezug auf Betriebskosten, insbesondere einen Verbrauch der Brennkraftmaschine an Brennstoff, oder in Hinblick auf

Emissionen der Brennkraftmaschine. Die verschiedenen Stellgrößen, die zur Einstellung der einzelnen physikalischen Zielgrößen beeinflusst werden, interagieren miteinander in hochkomplexer Weise, was durch bestehende Regel- und Steuerstrukturen nicht oder kaum berücksichtigt wird. Speziell beim Umgang mit Stellerbegrenzungen, beispielsweise einem Klappenanschlag, ist eine Betrachtung der einzelnen Stellgrößen begrenzt, da durch die Aufteilung in voneinander separate Regel- oder Steuerstrukturen nicht alle Freiheitsgrade der Steller zum Ausgleich auftretender Abweichungen genutzt werden können.

Hinzu kommt die Problematik, dass zum Ausgleich von Umwelt- oder Alterungseinflüssen lediglich eindimensionale Ausgleichsbewegungen voneinander separater Regel- oder Einstellstrukturen möglich sind. Umwelteinflüsse umfassen beispielsweise die Höhe oder die Umgebungstemperatur, in oder bei der die Brennkraftmaschine betrieben wird, eine Luftfeuchtigkeit, sowie andere, entsprechende Randbedingungen, die insbesondere aus einer Umgebung der Brennkraftmaschine resultieren. Alterungseinflüsse, beispielsweise Verschleiß oder Verschmutzung, betreffen beispielsweise Injektoren, Klappen, oder ein

Abgasnachbehandlungssystem der Brennkraftmaschine. Solche Umwelt- und/oder Alterungseinflüsse werden mithilfe einer Vielzahl von für die separaten Regel- und/oder Einstellstrukturen zur Beeinflussung der Stellgrößen jeweils aufgespannten Korrekturkennfelder berücksichtigt. Die hierdurch entstehende, kaum überschaubare Komplexität wird noch dadurch vergrößert, dass Querverbeeinflussungen der einzelnen Stellgrößen und/oder physikalischen Zielgrößen nur dadurch berücksichtigt werden können, dass die Korrekturkennfelder zusätzlich noch Betriebspunktabhängig bedatet sind. Damit vervielfacht sich die Anzahl und/oder Größe der Korrekturkennfelder, die nur unter sehr hohem Aufwand mit einer Vielzahl von Prüfstandsversuchen bedatbar sind, wobei kaum vorhersagbar ist, wie die Brennkraftmaschine auf bestimmte Änderungen ihrer Betriebsbedingungen reagieren wird. Insbesondere kann kaum gewährleistet werden, dass Ausgleichsbewegungen der Brennkraftmaschine in Reaktion auf geänderte Anforderungen oder Einflüsse in einem multidimensionalen Parameterraum in eine Richtung weisen, die für das Gesamtsystem – insbesondere in Hinblick auf Emissionen und/oder einen Brennstoffverbrauch – günstig ist. Es zeigt sich somit, dass insbesondere Abweichungen der Brennkraftmaschine von einem Normbetrieb und/oder von Normumgebungsbedingungen nur durch sehr komplexe Kennfeldstrukturen ausgeglichen werden können, welche stark interagieren. Es ist damit nicht möglich, optimale Verbrauchsbedingungen zu berücksichtigen, da diese eine sehr hohe Komplexität aufweisen. Sie sind zusätzlich in ihrer hohen Dimensionalität kaum verständlich. Eine verbrauchsoptimierte Einstellung kann es daher mit

herkömmlichen Verfahren zum Betreiben einer Brennkraftmaschine prinzipiell nur für eine neue Normmaschine geben, die unter Normbedingungen betrieben wird.

Als weiteres Problem tritt hinzu, dass Anforderungen an die Brennkraftmaschine, beispielsweise gesetzliche Emissionsanforderungen, Anforderungen an die Lebensdauer, Anforderung an die Stabilität über die Betriebsdauer sowie spezifische Kundenanforderungen nur durch geeignete Bedatung der Vielzahl von Kennfeldern berücksichtigt werden können, was sehr aufwendig und nur mit einer Vielzahl von Versuchen überprüfbar ist.

Erschwerend kommt weiter hinzu, dass ein starr in Form von Kennfeldern und Korrekturkennfeldern hinterlegtes Wissen über die Betriebsweisen der Brennkraftmaschine keine Betriebssituationen abbilden kann, welche nicht zuvor in Form von Prüfstandsversuchen und/oder Simulationen vorhergesehen worden sind. Treten solche unvorhergesehenen Betriebssituationen auf, kann der Betrieb der Brennkraftmaschine hierauf nicht adäquat ausgerichtet werden.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zum Betreiben einer Brennkraftmaschine, ein Steuergerät für eine Brennkraftmaschine, und eine Brennkraftmaschine zu schaffen, wobei die genannten Nachteile nicht auftreten.

Die Aufgabe wird gelöst, indem die Gegenstände der unabhängigen Ansprüche geschaffen werden. Vorteilhafte Ausgestaltungen ergeben sich aus den Unteransprüchen.

Die Aufgabe wird insbesondere gelöst, indem ein Verfahren zum Betreiben einer Brennkraftmaschine geschaffen wird, bei welchem zur Steuerung oder Regelung der Brennkraftmaschine wenigstens eine Abbildung verwendet wird, welche wenigstens eine physikalische Zielgröße der Brennkraftmaschine in Abhängigkeit von einer Mehrzahl von Stellgrößen der Brennkraftmaschine beschreibt. Es wird wenigstens eine Bedingung für die wenigstens eine physikalische Zielgröße aufgestellt, und es werden in Echtzeit – insbesondere in einem Steuergerät der Brennkraftmaschine – anhand der Abbildung Stellgrößenwerte für die Stellgrößen ermittelt, mit denen die wenigstens eine Bedingung durch die wenigstens eine physikalische Zielgröße erfüllt ist. Die Brennkraftmaschine wird dann mit den derart ermittelten Stellgrößenwerten angesteuert. Das Wissen über das Verhalten der Brennkraftmaschine ist somit nicht mehr in einer unübersichtlichen und verästelten Struktur von Kennfeldern und Korrekturkennfeldern hinterlegt, sondern ist vielmehr in der wenigstens einen Abbildung enthalten, wobei diese in Abhängigkeit von einer Mehrzahl von Stellgrößen definiert ist, sodass

sich das Verfahren von einer eindimensionalen Betrachtung der physikalischen Zielgröße löst, wobei vielmehr eine mehrdimensionale Betrachtung durchgeführt wird. Auf diese Weise werden Querverbeeinflussung und Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Stellgrößen und der wenigstens einen physikalischen Zielgröße berücksichtigt. Diese werden inhärent in der

5 Abbildung berücksichtigt, sodass es keiner Vielzahl von Korrekturkennfeldern mit hoher Komplexität mehr bedarf. Ein stets – in Hinblick auf sich gegebenenfalls zeitlich verändernde Anforderungen – optimierter Betrieb der Brennkraftmaschine kann durch die Wahl der wenigstens einen Bedingung an die wenigstens eine physikalische Zielgröße gewährleistet werden, wobei dadurch, dass die Stellgrößenwerte zur Ansteuerung der Brennkraftmaschine

10 derart ermittelt werden, dass die wenigstens eine Bedingung erfüllt ist, stets ein optimierter Betrieb der Brennkraftmaschine in Hinblick auf die betrachteten Anforderungen erreicht wird. Damit kann auch ein für das Gesamtsystem der Brennkraftmaschine optimales Verhalten gewährleistet werden, insbesondere wenn eine Mehrzahl von Bedingungen und/oder eine Mehrzahl von physikalischen Zielgrößen verwendet wird/werden. Dadurch, dass eine Mehrzahl

15 von Stellgrößen in die Abbildung einbezogen ist, existieren Freiheitsgrade für eine Optimierung des Betriebs des Gesamtsystems. Dies ist insbesondere vorteilhaft bei einem Umgang mit Stellerbegrenzungen. Mithilfe des Verfahrens ist es außerdem möglich, das Verhalten einzelner Komponenten zu koordinieren, wobei mithilfe der Abbildung reale, physikalische Systemkopplungen berücksichtigt werden. Auf diese Weise sind komplexe Reglereingriffe

20 möglich, durch welche Abweichungen vom Sollverhalten mittels optimaler Stellereingriffe ausgeglichen werden können. Insgesamt entsteht so ein ganzheitliches Motormanagement, bei welchen die Kopplungen des Systems vollständig berücksichtigt werden können. Auch Alterungs- und/oder Umwelteinflüsse können mithilfe der Abbildung berücksichtigt werden.

Ein wichtiger Vorteil ist insbesondere darin zu sehen, dass auf kombinatorische

25 Korrekturkennfelder verzichtet werden kann. Stattdessen wird eine optimale Kombination von Sollwerten nicht – wie bisher üblich – aus festen, einer bestimmten Betriebssituation angepassten Kennfeldern entnommen, sondern vielmehr zur Laufzeit gebildet, insbesondere berechnet. Durch die – vorzugsweise allgemeine – Gültigkeit der Abbildung, die auch als Motormodell aufgefasst werden kann, reagiert eine Korrektur für das System stets korrekt, ohne dass zuvor ein

30 Applikationsingenieur alle zu berücksichtigenden Betriebspunkte konkret anfahren müsste.

Unter einer Abbildung wird hier und im Folgenden insbesondere ein mathematischer Zusammenhang zwischen einer ersten Größe, nämlich der physikalischen Zielgröße, und eine Mehrzahl von zweiten Größen, nämlich von Stellgrößen, der Brennkraftmaschine verstanden. Mithilfe eines solchen mathematischen Zusammenhangs, der nicht notwendig als analytische Funktion definiert sein muss, sondern auch als künstliches neuronales Netz, oder in Form von Look-up-Tabellen, also in Form diskretisierter Funktionswerte, gegeben sein kann, ist es insbesondere möglich, flexibel auch auf Betriebssituationen zu reagieren, die nicht in Prüfstandsversuchen und/oder Simulationen zur Auslegung der Brennkraftmaschine berücksichtigt wurden. Das Wissen über das Verhalten der Brennkraftmaschine manifestiert sich hier nämlich nicht in bestimmten, vorgegebenen und im Vorfeld bei der Auslegung der Brennkraftmaschine vorhergesehenen Betriebssituationen, die in Kennfeldern und Korrekturkennfeldern hinterlegt sind, sondern vielmehr in dem wenigstens einen mathematischen Zusammenhang, der auch für unvorhergesehene Betriebssituationen auswertbar, gegebenenfalls interpolierbar ist. Es bedarf gerade deswegen keiner Vielzahl von Kennfeldern und Korrekturkennfeldern mehr, weil sich das Wissen über das Verhalten der Brennkraftmaschine in dem mathematischen Zusammenhang der wenigstens einen Abbildung manifestiert.

Vorzugsweise beschreibt die wenigstens eine Abbildung die wenigstens eine physikalische Zielgröße zusätzlich oder alternativ auch in Abhängigkeit von wenigstens einer Umweltbedingung, beispielsweise einer Umgebungstemperatur, einer geodätischen Höhe, auf welcher die Brennkraftmaschine betrieben wird, einer Luftfeuchtigkeit, und/oder einer anderen geeigneten Umgebungsbedingung. Somit können ohne weiteres und ohne zusätzliche Kennfelder oder Korrekturkennfelder auch Umgebungsbedingungen beim Betrieb der Brennkraftmaschine berücksichtigt werden.

Vorzugsweise beschreibt die wenigstens eine Abbildung die wenigstens eine physikalische Zielgröße zusätzlich oder alternativ auch in Abhängigkeit von wenigstens einem Alterungseinfluss, beispielsweise einem Verschleiß oder einer Verschmutzung eines Elements oder Teils der Brennkraftmaschine. Somit können ohne weiteres und ohne zusätzliche Kennfelder oder Korrekturkennfelder auch Alterungseinflüsse beim Betrieb der Brennkraftmaschine berücksichtigt werden.

Unter einer physikalischen Zielgröße wird insbesondere allgemein eine Größe verstanden, welche an der Brennkraftmaschine nicht direkt und/oder unmittelbar durch Beeinflussung eines

Stellers eingestellt werden kann, sondern die sich vielmehr im Betrieb der Brennkraftmaschine durch komplexes Zusammenwirken einer Vielzahl von Parametern und/oder Stellgrößen einstellt.

Unter einer Stellgröße wird insbesondere im Vergleich hierzu eine Größe der

- 5 Brennkraftmaschine verstanden, welche unmittelbar durch Beeinflussen eines Stellelements, welches der Stellgröße zugeordnet ist, eingestellt werden kann.

Unter einer Bedingung für die wenigstens eine physikalische Zielgröße wird eine Anforderung verstanden, welche – beispielsweise durch gesetzliche Vorgabe oder durch einen Wunsch eines

- 10 Betreibers der Brennkraftmaschine – an die wenigstens eine physikalische Zielgröße gestellt wird. Dabei kann es sich beispielsweise um einzuhaltende Emissionsgrenzwerte, um ein abzugebendes Sollmoment oder eine Leistungsanforderung, einen anzustrebenden Brennstoffverbrauch, beispielsweise die Anforderung, einen minimalen Brennstoffverbrauch anzustreben, oder um eine andere geeignete Anforderung handeln, die als mathematische Bedingung an die physikalische Zielgröße ausgedrückt werden kann. Beispielsweise kann eine
- 15 solche Anforderung auch eine erhöhte Abgastemperatur zur Regeneration eines Partikelfilters sein, die bedarfsgerecht und zeitabhängig aufgestellt werden kann. Eine solche Bedingung kann auch eine zulässige Einregeldauer für einen Emissionswert sein. In Hinblick auf Emissionsanforderungen kann noch unterschieden werden zwischen solchen Emissionsanforderungen, für die ein Gesetzgeber – gegebenenfalls betriebspunktabhängig – eine
- 20 Überschreitung des Grenzwerts erlaubt, und solchen Emissionsanforderungen, bei denen keine Abweichungen zulässig sind. Eine solche Bedingung kann sich auch auf die Lebensdauer der Brennkraftmaschine beziehen, wobei sie beispielsweise einen zulässigen Spitzendruck für einen Zylinder einer als Hubkolbenmaschine ausgebildeten Brennkraftmaschine darstellt, oder eine maximale Drehzahl für einen Turbolader. Weiterhin kann sich eine solche Bedingung auf eine
- 25 Stabilität der Brennkraftmaschine über ihre Betriebsdauer beziehen. Beispielsweise auf einen Drift des Funktionsverhaltens von Injektoren der Brennkraftmaschine oder auf eine Versottung eines Kühlers, insbesondere eines Abgaskühlers in einer Abgasrückführ-Einrichtung. Weiterhin kann sich eine solche Bedingung auch auf spezifische Kundenwünsche beziehen, beispielsweise in Hinblick auf einen Verbrauch der Brennkraftmaschine an Brennstoff sowie an eine Dynamik
- 30 derselben, insbesondere in einem Fahrbetrieb, wenn die Brennkraftmaschine zum Antrieb eines Kraftfahrzeugs verwendet wird.

Unter einem Stellgrößenwert wird insbesondere ein Parameterwert verstanden, mit dem ein einer Stellgröße zugeordnetes Stellelement – mittelbar oder unmittelbar – angesteuert wird, um die Stellgröße in gewünschter Weise zu beeinflussen. Dabei kann es sich beispielsweise um Sollwerte handeln, auf welche eine Stellgröße geregelt wird. Es ist aber auch eine Steuerung einer Stellgröße anhand eines Stellgrößenwerts möglich.

Dass die wenigstens eine Bedingung an die wenigstens eine Abbildung erfüllt ist, schließt vorzugsweise ein, dass diese Bedingung – insbesondere unter Berücksichtigung weiterer Bedingungen und/oder Nebenbedingungen – in einem Maß erfüllt ist, welches durch die weiteren Bedingungen und/oder Nebenbedingungen vorgegeben sein kann. Die Bedingung muss also nicht zwingend zu jedem Zeitpunkt in vollem Umfang erfüllt sein, sondern es können – insbesondere in Abhängigkeit weiterer Bedingungen und/oder Nebenbedingungen – Abweichungen von einer vollständigen Erfüllung der Bedingung zugelassen werden. Abhängig von der konkreten Bedingung kann aber auch ein vollständiges Erfüllen der Bedingung gefordert werden. Dies ist beispielsweise der Fall für eine Obergrenze für einen Zylinderspitzendruck, der nicht überschritten werden darf, um eine Beschädigung der Brennkraftmaschine zu vermeiden, oder für gesetzlich vorgegebene Emissionsgrenzwerte, die nicht überschritten werden dürfen. Allerdings ist es möglich, dass in einem Notfallbetrieb auch ein Überschreiten solcher Bedingungen zeitweise zugelassen wird, wenn dies aus übergeordneten Erwägungen, beispielsweise aus Sicherheitsgründen, notwendig ist.

Dass die Brennkraftmaschine mit den derart ermittelten Stellgrößenwerten angesteuert wird, bedeutet insbesondere, dass den Stellgrößen zugeordnete Stellelemente mit den Stellgrößenwerten – mittelbar oder unmittelbar – angesteuert werden. Unter dem Begriff „Ansteuern“ wird dabei sowohl eine Steuerung als auch eine Regelung verstanden.

Es ist möglich, dass eine Abbildung existiert, welche eine Mehrzahl physikalischer Zielgrößen in Abhängigkeit von einer Mehrzahl von Stellgrößen beschreibt, wobei beispielsweise eine Abhängigkeit einer spezifischen physikalischen Zielgröße von einer Mehrzahl von Stellgrößen und anderen physikalischen Zielgrößen jeweils durch Umformen der Abbildung erhalten werden kann. Alternativ oder zusätzlich ist es möglich, dass eine Abbildung verwendet wird, welche nur eine physikalische Zielgröße in Abhängigkeit von einer Mehrzahl von Stellgrößen beschreibt.

Vorzugsweise wird zur Steuerung oder Regelung der Brennkraftmaschine eine Mehrzahl von Abbildungen verwendet, sodass eine Mehrzahl physikalischer Zielgrößen durch eine Mehrzahl

von Abbildungen beschrieben werden. Weiterhin wird bevorzugt eine Mehrzahl von Bedingungen an die wenigstens eine physikalische Zielgröße, vorzugsweise an eine Mehrzahl physikalischer Zielgrößen, aufgestellt, die – gegebenenfalls in verschiedenem Maße, das heißt mit verschiedener Gewichtung – erfüllt werden sollen.

- 5 Um Stellgrößenwerte zu ermitteln, mit denen die wenigstens eine Abbildung durch die wenigstens eine physikalische Zielgröße erfüllt ist, werden mathematische Operationen verwendet, welche auf einem mathematischen Raum definiert sind, auf welchem auch die Abbildung definiert ist. Dieser mathematische Raum, die Abbildung und die mathematischen Operationen werden gemeinsam im Folgenden auch als „Ermittlungsstruktur“ bezeichnet.
- 10 Mithilfe einer solchen Ermittlungsstruktur ist es möglich, das Verhalten einzelner Komponenten zu koordinieren, wobei reale, physikalische Systemkopplungen berücksichtigt werden können. Auf diese Weise sind komplexe Reglereingriffe möglich, durch welche Abweichungen vom Sollverhalten mittels optimaler Stelleingriffe ausgeglichen werden können.
- Die Abbildung ist besonders bevorzugt zwischen der wenigstens einen physikalischen Zielgröße
15 und allen Stellgrößen der Brennkraftmaschine definiert. Auf diese Weise können Zusammenhänge und Querverbeeinflussungen zwischen allen Stellgrößen und der wenigstens eine physikalischen Zielgröße berücksichtigt werden. Wird im Rahmen des Verfahrens eine Vielzahl von physikalischen Zielgrößen der Brennkraftmaschine gesteuert oder geregelt, wobei Abbildungen zwischen jeder dieser physikalischen Zielgrößen und allen Stellgrößen
20 berücksichtigt werden, ist eine besonders genaue und umfassende Betrachtung der physikalischen Kopplung der verschiedenen Stellgrößen und physikalischen Zielgrößen möglich, sodass ein verbessertes Verhalten der gesamten Brennkraftmaschine erreicht werden kann. Dabei können Abweichungen im Sollverhalten durch die übergeordnete Betrachtung des Gesamtsystems über weitere Bereiche ausgeglichen werden. Veränderungen in den
25 Umweltbedingungen können ebenfalls über weitere Bereiche ausgeglichen werden. Es ist zudem möglich, durch die übergeordnete Betrachtung des Gesamtsystems in bestimmten Betriebsbereichen einen Verbrauchsvorteil zu erreichen. Außerdem können gegebenenfalls Alterungsreserven und Sicherheitszuschläge auf bestimmte physikalische Zielgrößen geringer gehalten werden. Katalysatoren für ein Abgasnachbehandlungssystem der Brennkraftmaschine
30 lassen sich kleiner auslegen, da bei Erreichen einer Grenzsatzrate automatisch ein geringerer Emissionsbereich eingeregelt werden kann, sodass der Katalysator freigefahren wird, wodurch insbesondere wieder eine Emissionsregelung möglich ist.

Bei einer bevorzugten Ausführungsform des Verfahrens erfolgt das Aufsuchen von Stellgrößenwerten, mit denen die wenigstens eine Bedingung durch die wenigstens eine physikalische Zielgröße erfüllt ist, bevorzugt iterativ, wobei insbesondere in jedem Iterationsschritt einer Mehrzahl von Iterationsschritten neue Stellgrößenwerte ermittelt werden, mit denen die Brennkraftmaschine dann angesteuert wird. Auf diese Weise wird auf der Grundlage der wenigstens einen Abbildung und der wenigstens einen Bedingung eine Trajektorie in einem von den Stellgrößenwerten aufgespannten mathematischen Raum durchlaufen, mittels der die Brennkraftmaschine sich zu einem bestimmten Betriebspunkt, an welchem die wenigstens eine Bedingung in möglichst guter Weise erfüllt ist, hin entwickelt. Die wenigstens eine Bedingung wird also nicht schlagartig oder instantan erfüllt, sondern sie wird durch schrittweises Aufsuchen geeigneter Stellgrößenwerte in möglichst stetig steigendem Umfang erfüllt. Dabei ist es selbstverständlich möglich, dass in einzelnen Iterationsschritten – insbesondere abhängig von einem konkret angewandten Iterations- oder Optimierungsverfahren – vereinzelt Verschlechterungen auftreten, sodass die Bedingungen im Verlauf der Trajektorie in dem Raum der Stellgrößenwerte auch in schlechterem Umfang erfüllt sein kann, als in einem vorhergehenden Schritt. Die Gesamtrichtung der Trajektorie weist aber jedenfalls im zeitlichen Mittel in eine Richtung, in welcher die Bedingung an die wenigstens eine physikalische Zielgröße besser erfüllt ist, als zu Beginn der Iteration.

Es wird eine Ausführungsform des Verfahrens bevorzugt, die sich dadurch auszeichnet, dass die wenigstens eine physikalische Zielgröße ausgewählt ist aus einer Gruppe bestehend aus einer Stickoxidkonzentration im Abgas, einer Rußkonzentration im Abgas, einem Spitzendruck in einem Brennraum der Brennkraftmaschine, einem Abgasmassenstrom, einer Abgastemperatur, einem abgegebenen Moment der Brennkraftmaschine und einem Brennstoffverbrauch. Bei all diesen physikalischen Zielgrößen handelt es sich um Größen, die nicht unmittelbar durch Beeinflussung eines einzigen Stellelements der Brennkraftmaschine in vorhersehbarer Weise beeinflusst werden können, sondern die sich vielmehr in Abhängigkeit von einer komplexen Mehrzahl miteinander interagierender Stellgrößen einstellen.

Als Bedingung an eine Stickoxid-Konzentration im Abgas und/oder eine Ruß-Konzentration im Abgas kann beispielsweise ein gesetzlich vorgegebener Grenzwert formuliert werden, welcher nicht überschritten werden darf. Als Bedingung an einen Spitzendruck in dem Brennraum der Brennkraftmaschine kann beispielsweise ein Grenzwert definiert werden, welcher aus der Bauart der Brennkraftmaschine resultiert, und der nicht überschritten werden darf, wenn ein dauerhaft beschädigungsfreier Betrieb der Brennkraftmaschine gewährleistet sein soll. Bedingungen an

einen Abgasmassenstrom und eine Abgastemperatur können beispielsweise in Abhängigkeit von einem bedarfsgerecht gewünschten Betrieb einer Abgasnachbehandlung definiert werden, beispielsweise um einen Partikelfilter zu regenerieren oder möglichst günstige Bedingungen für eine selektive katalytische Reduktion von Stickoxiden bereitzustellen. Eine Bedingung an das
5 abgegebene Moment der Brennkraftmaschine kann beispielsweise als Lastanforderung durch einen Betreiber der Brennkraftmaschine vorgegeben werden, oder es kann sich aufgrund äußerer Bedingungen, beispielsweise beim Betrieb der Brennkraftmaschine als Antriebseinrichtung für einen Generator zur Stromerzeugung und zur Einspeisung von elektrischer Leistung in ein Stromnetz, ergeben. Dabei kann das momentan abzugebende Moment der Brennkraftmaschine
10 durch in dem Stromnetz herrschende Bedingungen vorgegeben sein. Schließlich kann eine Bedingung an einen Brennstoffverbrauch in Form eines aufzusuchenden Minimums durch den Betreiber – beispielsweise durch Betätigen einer Eco-Mode-Taste, oder in anderer Weise aufgestellt werden.

Es wird auch eine Ausführungsform des Verfahrens bevorzugt, das sich dadurch auszeichnet,
15 dass die Stellgrößen ausgewählt sind aus einer Gruppe bestehend aus einem Ladedruck, einer Ladeluft-Temperatur, einer Drehzahl der Brennkraftmaschine, einem Verbrennungsluft-Brennstoff-Verhältnis, das auch als Lambda-Wert bezeichnet wird, einer Abgasrückführrate, einem Spritzbeginn – insbesondere einer Haupteinspritzung –, einer einem Brennraum der Brennkraftmaschine zugeführten Brennstoffmenge, insbesondere Brennstoffmasse, einer Anzahl
20 befeuerter Brennräume der Brennkraftmaschine, einem als Raildruck bezeichneten Druck in einem gemeinsamen Hochdruckspeicher für eine Mehrzahl von Einspritzeinrichtungen, insbesondere Injektoren, der Brennkraftmaschine, und einer Dosiermenge an Reduktionsmittel, insbesondere zur selektiven katalytischen Reduktion von Stickoxiden, in einem Abgasstrom. Zusätzlich oder alternativ kann/können auch eine Voreinspritzung, insbesondere der Beginn oder
25 die eindosierte Brennstoffmenge einer Voreinspritzung, und/oder eine Nacheinspritzung, insbesondere der Beginn oder eine eindosierte Brennstoffmenge der Nacheinspritzung, als Stellgröße(n) verwendet werden. Dabei handelt es sich um Größen, die unmittelbar durch Ansteuern speziell diesen Größen zugeordneter Stellelemente beeinflusst werden können. Beispielsweise kann der Ladedruck durch Ansteuern einer Drosselklappe und/oder eines
30 Verdichters, insbesondere eines Kompressors, eingestellt werden. Die Ladeluft-Temperatur kann beispielsweise durch Ansteuern eines Ladeluft-Kühlers beeinflusst werden. Die Drehzahl der Brennkraftmaschine kann beispielsweise durch Ansteuern einer Brennstoffzufuhreinrichtung, insbesondere eines Injektors, eingestellt werden. Das Verbrennungsluft-Brennstoff-Verhältnis

kann ebenfalls durch Veränderung der zugeführten Brennstoffmasse und/oder durch Einstellung der einem Brennraum zugeführten Luftmenge, beispielsweise durch Einstellen einer Drosselklappe, beeinflusst werden. Eine Abgasrückführrate kann durch Einstellen eines in einer Abgasrückführstrecke vorgesehenen Stellelements, beispielsweise einer Abgasrückführklappe, eingestellt werden. Ein Spritzbeginn kann durch entsprechende Ansteuerung eines Injektors eingestellt werden. Die dem Brennraum der Brennkraftmaschine zugeführte Brennstoffmenge kann durch Ansteuerung einer Zuführeinrichtung, insbesondere eines Injektors, eingestellt werden. Eine Anzahl befeuerter Brennräume der Brennkraftmaschine kann entweder durch Ansteuern einer Mehrzahl von Injektoren oder durch Ansteuern von Zündeinrichtungen, welche den Brennräumen jeweils zugeordnet sind, oder durch Ansteuern von den Brennräumen jeweils zugeordneten Einlassventilen, oder durch andere geeignete Maßnahmen beeinflusst werden. Ein Raildruck kann insbesondere durch Ansteuern einer Saugdrossel stromaufwärts einer Hochdruckpumpe, und/oder durch Ansteuern der Hochdruckpumpe selbst, beeinflusst werden. Schließlich kann eine Dosiermenge an Reduktionsmittel in einem Abgasstrom durch Ansteuern einer Dosiereinrichtung für das Reduktionsmittel oder für ein Reduktionsmittel-Vorläuferprodukt beeinflusst werden. Die Beeinflussung einer Mehrzahl solcher Stellgrößen, insbesondere aller Stellgrößen, beeinflusst wiederum die wenigstens eine physikalische Zielgröße.

Es wird auch eine Ausführungsform des Verfahrens bevorzugt, die sich dadurch auszeichnet, dass eine Abbildung verwendet wird, die ausgewählt ist aus einer Gruppe bestehend aus einer physikalischen oder thermodynamischen Funktion, einer approximativen mathematischen Funktion, insbesondere einem Polynom, einer Exponentialfunktion oder einer Vibe-Funktion, oder einer Mehrzahl von Vibe-Funktionen, einem statistischen Modell, einer Look-Up-Tabelle, und einem neuronalen Netz, insbesondere einem künstlichen neuronalen Netz. Die hier genannten Abbildungen sind geeignet, Zusammenhänge zwischen einer Mehrzahl von Stellgrößen und wenigstens einer physikalischen Zielgrößen allgemein und ohne Beschränkung auf vorbestimmte, spezifische Betriebssituationen auszudrücken, wobei mit jeder dieser Abbildungen Stellgrößenwerte aufgesucht werden können, mit denen die wenigstens eine Bedingung durch die wenigstens eine physikalische Zielgröße erfüllt ist.

Beispielsweise ist es möglich, eine Stickoxidkonzentration $[\text{NO}_x]$ als Funktion eines Ladeluftdrucks p_2 , eines Lambda-Werts λ , einer Ladeluft-Temperatur T_2 , einer Feuchte F , einer Drehzahl n einer Brennkraftmaschine, eines Spritzbeginns BOI , einer eingespritzten

Kraftstoffmasse m_{KS} , und eines Rail-Drucks p_R darzustellen. Wird als approximative mathematische Funktion ein Polynom verwendet, kann dieses beispielsweise folgende Form haben:

$$[NO_x] = f(p_2, \lambda, T_2, F, n, BOI, m_{KS}, p_R) = \kappa_1 p_2 + \kappa_2 \lambda + \kappa_3 T_2 + \kappa_4 F + \kappa_5 n + \kappa_6 BOI + \kappa_7 m_{KS} + \kappa_8 p_R + \kappa_9 p_2 \lambda + \kappa_{10} p_2 T_2 + \kappa_{11} p_2 F + \dots \quad (a)$$

Wird als Abbildung eine Exponentialfunktion verwendet, kann diese beispielsweise folgende Form haben:

$$[NO_x] = f(p_2, \lambda, T_2, F, n, BOI, m_{KS}, p_R) = A(\beta_1 p_2 + \beta_2 \lambda + \beta_3 T_2 + \beta_4 F + \beta_5 n + \beta_6 BOI + \beta_7 m_{KS} + \beta_8 p_R + \beta_9 p_2 \lambda + \beta_{10} p_2 T_2 + \beta_{11} p_2 F + \dots) * \exp(\kappa_1 p_2 + \kappa_2 \lambda + \kappa_3 T_2 + \kappa_4 F + \kappa_5 n + \kappa_6 BOI + \kappa_7 m_{KS} + \kappa_8 p_R + \kappa_9 p_2 \lambda + \kappa_{10} p_2 T_2 + \kappa_{11} p_2 F + \dots), \quad (b)$$

mit einem allgemeinen Vorfaktor A und einem durch den Klammerausdruck vor der Exponentialfunktion gegebenen, von den Funktionsargumenten abhängigen Vorfaktor. Ähnliche Ansätze können selbstverständlich auch für andere physikalische Zielgrößen in Abhängigkeit von denselben oder anderen Stellgrößen verwendet werden. Weiterhin können Kreuzterme, quadratische Terme oder Terme höherer Ordnung verwendet werden, um die physikalischen Zusammenhänge zwischen der Mehrzahl von Stellgrößen und der wenigstens einen physikalischen Zielgröße richtig wiederzugeben. Die in den Gleichungen (a) und (b) auftretenden Parameter $\kappa_1, \kappa_2, \dots$, und/oder $\beta_1, \beta_2, \dots$, sowie A, legen die Zusammenhänge quantitativ fest. Somit steckt das Wissen um die verschiedenen Zusammenhänge zwischen der Mehrzahl von Stellgrößen und den physikalischen Zielgrößen insbesondere in diesen Parametern. Einzelne Terme der Funktionen gemäß den Gleichungen (a) und (b), die aus physikalischer Sicht keinen Einfluss auf die betrachtete Größe haben und/oder vernachlässigt werden können, können in dem jeweiligen Ansatz verschwinden, beziehungsweise ein zugehöriger Parameter κ kann zu null gewählt werden. Selbstverständlich ist es möglich, auch andere, komplexere funktionale Zusammenhänge zu betrachten.

Wichtig ist, dass die gewählten Abbildungen die physikalischen Zielgrößen in Abhängigkeit von den Stellgrößen mit hinreichender Genauigkeit darstellen.

Die wenigstens eine Abbildung wird vorzugsweise aus rechnergestützten Simulationen der Brennkraftmaschine und/oder aus Prüfstandversuchen gewonnen. Insbesondere kann zunächst eine rechnergestützte Ermittlung einer Abbildung für Normbedingungen erfolgen, woran sich

eine rechnergestützte Ermittlung der Abbildung unter Berücksichtigung von Nicht-Normbedingungen anschließt. Anschließend ist es möglich, dass die Abbildung auf dem Prüfstand unter Norm- und/oder Nicht-Normbedingungen korrigiert wird. Da Querverbeeinflussungen und physikalische Zusammenhänge zwischen Stellgrößen und physikalischen Zielgrößen sowie Alterungs- und/oder Umwelteinflüsse der Brennkraftmaschine inhärent in der Abbildung berücksichtigt werden, bedarf es keiner unüberschaubaren Vielfalt von Kennfeldern und Korrekturkennfeldern mehr. Zudem wird das Verhalten der Brennkraftmaschine bei Abweichungen von den Normbedingungen unmittelbar verständlich, weil das Wissen hierüber inhärent in der Abbildung vorhanden ist. Randbedingungen für den Betrieb der Brennkraftmaschine, beispielsweise einzuhaltende Emissionsvorschriften, werden in einfacher Weise als Bedingungen für die wenigstens eine physikalische Zielgröße programmierbar.

Es wird eine Ausführungsform des Verfahrens bevorzugt, die sich dadurch auszeichnet, dass eine Mehrzahl von Bedingungen an eine Mehrzahl von physikalischen Zielgrößen gleichzeitig durch Ermitteln von geeigneten Stellgrößenwerten erfüllt wird. Hierdurch können verschiedene Anforderungen an die Brennkraftmaschine, beispielsweise in Hinblick auf eine Stickoxidemission und eine Rußkonzentration im Abgas, miteinander überlagert und gemeinsam erfüllt werden. Dabei werden die Wechselwirkungen zwischen den Größen durch die wenigstens eine Abbildung inhärent berücksichtigt. Insbesondere werden Querverbeeinflussungen und Zusammenhänge zwischen den verschiedenen physikalischen Zielgrößen inhärent berücksichtigt, und es erfolgt eine mehrdimensionale Betrachtung der Regelung oder Einstellung aller zu regelnden oder einzustellenden Größen gemeinsam. Vorzugsweise wird dabei wenigstens eine erste physikalische Zielgröße auf einen Sollwert optimiert. Alternativ oder zusätzlich wird bevorzugt wenigstens eine zweite physikalische Zielgröße auf einen Extremalwert eingestellt. Alternativ oder zusätzlich wird bevorzugt wenigstens eine dritte physikalische Zielgröße auf einen vorbestimmten Grenzwert begrenzt. Es ist dabei insbesondere möglich, zugleich eine Optimierung, eine Kostenfunktion und eine Schutzfunktion für die Brennkraftmaschine zu verwirklichen. Besonders bevorzugt werden zugleich eine Stickoxidemission und eine Schwärzung des Abgases der Brennkraftmaschine optimiert, wobei vorzugsweise weiterhin zugleich ein Verbrauch der Brennkraftmaschine an Brennstoff minimiert und/oder ein Zylinderdruck derselben begrenzt wird/werden.

Es wird auch eine Ausführungsform des Verfahrens bevorzugt, die sich dadurch auszeichnet, dass die wenigstens eine Bedingung ausgewählt ist aus einer Gruppe bestehend aus der Vorgabe

eines Sollwerts, dem Einhalten eines Grenzwerts, und dem Aufsuchen eines Extremums. Es ist also möglich, dass für die physikalische Zielgröße ein Sollwert vorgegeben wird, woraufhin die physikalische Zielgröße bevorzugt auf den Sollwert optimiert wird. Beispielsweise kann eine Stickoxidemission der Brennkraftmaschine auf einen als Sollwert definierten, gesetzlichen Grenzwert oder auf einen unterhalb des gesetzlichen Grenzwerts definierten Sollwert optimiert werden.

Alternativ oder zusätzlich wird bevorzugt wenigstens eine physikalische Zielgröße auf einen Extremalwert eingestellt, insbesondere auf einen Extremalwert gesteuert oder geregelt. Dabei kann es sich bei dem Extremalwert um einen Minimalwert oder um einen Maximalwert handeln. Auf diese Weise ist es insbesondere möglich, eine Kostenfunktion für die Brennkraftmaschine zu implementieren, wobei Betriebskosten auf einen Minimalwert eingestellt werden können. Insbesondere kann dabei der Verbrauch der Brennkraftmaschine an Brennstoff auf einen Minimalwert geregelt oder gesteuert werden.

Es wird besonders eine Ausführungsform des Verfahrens bevorzugt, die sich dadurch auszeichnet, dass wenigstens eine erste physikalische Zielgröße auf einen Sollwert optimiert wird, wobei wenigstens eine zweite physikalische Zielgröße auf einen Extremalwert eingestellt wird. Dabei kann eine einfache Überlagerung der Bedingungen an die verschiedenen physikalischen Zielgrößen erfolgen, wobei diese zugleich in möglichst guter Weise erfüllt werden. Beispielsweise ist es möglich, als zu optimierende physikalische Zielgröße die Stickoxid- und/oder die Rußpartikelkonzentration im Abgas der Brennkraftmaschine auf einen Sollwert zu optimieren und zugleich die Betriebskosten der Brennkraftmaschine, insbesondere einen Verbrauch derselben an Brennstoff, zu minimieren. Bevorzugt wird dabei eine Gewichtung berücksichtigt, sodass mit höherer Priorität die Optimierung auf den wenigstens einen Sollwert erfolgt, wobei dann – vorzugsweise unter Beibehaltung des Sollwerts durch die Regelung – eine Minimierung der Betriebskosten, insbesondere des Verbrauchs, erfolgt. Insgesamt können so zugleich gesetzliche Grenzwerte eingehalten und minimale Kosten für den Betrieb der Brennkraftmaschine gewährleistet werden.

Es wird auch eine Ausführungsform des Verfahrens bevorzugt, die sich dadurch auszeichnet, dass wenigstens eine physikalische Ausgangsgröße der Brennkraftmaschine auf einen vorbestimmten Grenzwert begrenzt wird. Als Bedingung an die physikalische Zielgröße wird also gestellt, dass diese den Grenzwert einhält, insbesondere nicht erreicht oder überschreitet. Auf diese Weise kann eine Schutzfunktion für die Brennkraftmaschine implementiert werden,

beispielsweise indem ein Zylinderdruck einer als Hubkolbenmaschine ausgebildeten Brennkraftmaschine unter einen maximal zulässigen Wert begrenzt wird.

Die Begrenzung von wenigstens einer physikalischen Zielgröße der Brennkraftmaschine auf einen vorherbestimmten Grenzwert wird bevorzugt durch eine asymmetrische Regelstruktur verwirklicht, wobei der Grenzwert als Sollwert in die Regelstruktur eingeht. Dabei darf ein Istwert der physikalischen Zielgröße in einer Richtung von dem Grenzwert abweichen, in der anderen jedoch nicht. Solange der Istwert von dem Sollwert in der zulässigen Richtung abweicht, erfolgt kein Eingriff durch die Regelstruktur. Weicht dagegen der Istwert in der unzulässigen Richtung von dem Sollwert ab, beispielsweise indem ein Zylinderdruck einen vorherbestimmten Maximalwert überschreitet, greift die Regelstruktur ein und beeinflusst auf der Grundlage der wenigstens einen Abbildung Stellgrößen der Brennkraftmaschine so, dass die physikalische Zielgröße auf den Grenzwert begrenzt wird. Dabei weist die asymmetrische Regelstruktur in dem unzulässigen Bereich der Soll/Ist-Abweichung vorzugsweise eine hohe Regelverstärkung auf, sodass eine sehr schnelle und zuverlässige Begrenzung resultiert. Ein Überschwingen über den Grenzwert in Richtung der zulässigen Abweichung wird dabei bewusst in Kauf genommen, da dies keine Gefährdung der Brennkraftmaschine bedeutet – typischerweise im Gegensatz zu einer Überschreitung des Grenzwerts in der unzulässigen Richtung.

Es wird auch eine Ausführungsform des Verfahrens bevorzugt, die sich dadurch auszeichnet, dass die wenigstens eine Bedingung als Gütemaß aufgestellt wird, wobei das Gütemaß in Echtzeit – vorzugsweise unter wenigstens einer Nebenbedingung – optimiert wird. Die Formulierung der wenigstens einen Bedingung als Gütemaß hat den Vorteil, dass sie in einfacher und verständlicher Weise programmiert werden kann, wobei in einfacher Weise Stellgrößenwerte aufgefunden werden können, mit denen die wenigstens eine Bedingung durch die wenigstens eine physikalische Zielgröße erfüllt ist, indem das Gütemaß optimiert, insbesondere – je nach konkreter mathematischer Formulierung – minimiert oder maximiert wird. Ein solches Gütemaß kann beispielsweise die folgende mathematische Form haben:

$$J = \int_{t_{akt}}^{t_{akt}+t_0} g_1 m_{KS}^2(t) + g_2 ([NO_x]_S - [NO_x]_I(t))^2 + g_3 ([R]_S - [R]_I(t))^2 + g_4 (M_S - M_I(t))^2 dt. \quad (c)$$

Dabei ist J das Gütemaß, t ist ein momentaner Zeitpunkt in einem die Optimierung des Gütemaßes durchführenden Steuergerät, t_0 beschreibt einen Optimierungshorizont, insbesondere als einen Zeitschritt ausgehend von dem momentanen Zeitpunkt t_{in} die Zukunft, über welchen

das Gütemaß betrachtet wird; die durchnummerierten Parameter $g_1, g_2, \dots$, stellen Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Terme und damit die einzelnen Bedingungen an physikalische Zielgrößen in dem Gütemaß J dar, und in den Klammerausdrücken sind schließlich verschiedene Bedingungen an verschiedene physikalische Zielgrößen formuliert. Beispielsweise ist in dem zweiten Term die Bedingung formuliert, dass eine momentane und damit zeitabhängige Stickoxidkonzentration $[\text{NO}_x]_I$ einen Sollwert $[\text{NO}_x]_S$ einhalten soll, wobei in dem dritten Term eine entsprechende Bedingung für eine momentane Rußpartikelkonzentration $[R]_I$ im Hinblick auf einen Sollwert $[R]_S$ formuliert ist, wobei in dem vierten Term eine entsprechende Bedingung für ein momentanes Drehmoment M_I in Hinblick auf einen Sollwert M_S definiert ist. Der erste Term sorgt mit der quadratisch auftretenden Kraftstoffmasse m_{KS} dafür, dass der Kraftstoffverbrauch der Brennkraftmaschine minimiert wird, wenn das Gütemaß J minimiert wird.

Selbstverständlich können mehr Terme, weniger Terme oder andere Terme in einem solchen Gütemaß J berücksichtigt werden. Durch Wahl der Gewichtungsfaktoren können bestimmte Bedingungen priorisiert oder höher oder niedriger gewichtet werden. Auf diese Weise sind verschiedene Betriebsziele für die Brennkraftmaschine formulierbar und gegeneinander gewichtbar. Es ist auch möglich, zumindest temporär bestimmte Gewichtungsfaktoren g zu null zu wählen, um bestimmte Bedingungen aus dem Gütemaß J herauszunehmen.

Harte Begrenzungen, insbesondere einzuhaltende Grenzwerte, können bevorzugt als Nebenbedingung formuliert werden. Alternativ oder zusätzlich ist es auch möglich, solche harten Begrenzungen durch geeignete mathematische Formulierungen in die Formel des Gütemaßes J mitaufzunehmen.

Die in dem in dem Gütemaß J auftretenden Sollwerte werden insbesondere von außerhalb des Systems der Brennkraftmaschine vorgegeben, beispielsweise durch gesetzliche Vorgaben. Die in dem Gütemaß J auftretenden, momentanen Ist-Werte der physikalischen Zielgrößen werden durch die zuvor beschriebenen Abbildungen berechnet. Diese Abbildungen hängen – wie zuvor bereits erläutert – von den Stellgrößen ab.

Eine Optimierung des Gütemaßes J , insbesondere mit Hilfe eines numerischen Optimierungsverfahrens, vorzugsweise unter Einhaltung von wenigstens einer Nebenbedingung, führt dann dazu, dass im Ergebnis geeignete Stellgrößenwerte aufgefunden werden, unter denen das Gütemaß optimal, hier insbesondere minimal, wird. Wird die Brennkraftmaschine 1 mit

diesen Stellgrößenwerten angesteuert, werden die in dem Gütemaß formulierten Bedingungen durch die im Gütemaß J berücksichtigten physikalischen Zielgrößen vorzugsweise im Umfang eines durch die Gewichtungsfaktoren g vorgegebenen Maße erfüllt.

Das Prinzip des Optimierungsverfahrens besteht insbesondere darin, an den Stellgrößen gezielte
5 Änderungen vorzunehmen, um für das Gütemaß einen möglichst kleinen Wert – oder bei anderer mathematischer Formulierung gegebenenfalls einen möglichst großen Wert – zu erhalten, wobei zugleich bevorzugt wenigstens eine Nebenbedingung eingehalten wird. Eine mögliche Ausprägung einer solchen Vorgehensweise ist die Bestimmung eines mehrdimensionalen Gradienten in Abhängigkeit von allen Stellgrößen des Systems, wobei der Gradientenabstieg in
10 die Richtung der schnellsten Minimierung des Gütemaßes weist. Varianten zur numerischen Minimierung oder Optimierung eines Gütemaßes mit oder ohne Berücksichtigung weiterer Nebenbedingungen sind dem Fachmann bekannt, sodass hierauf nicht näher eingegangen werden muss.

Die auf diese Weise ermittelten Werte für die Stellgrößen werden dann auf diesen zugeordnete
15 Stellelemente gegeben und/oder auf unterlagerte Regelkreise der Brennkraftmaschine aufgeschaltet. Die Minimierung oder Optimierung des Gütemaßes durch das Optimierungsverfahren und die dazu erforderlichen Modellrechnungen, insbesondere die Auswertung der Abbildungen, werden in Echtzeit auf einem Steuergerät der Brennkraftmaschine durchgeführt. Dadurch kann die Brennkraftmaschine auf Veränderungen von Betriebssituationen
20 richtig reagieren, auch wenn ein solches Szenario vorab nicht betrachtet wurde, und ohne dass zugehörige Sollwerte für die Stellgröße schon in einer vorab erzeugten Kennfeldstruktur abgelegt sind.

Es wird eine Ausführungsform des Verfahrens bevorzugt, die sich dadurch auszeichnet, dass die wenigstens eine Abbildung auf einen mehrdimensionalen Raum definiert ist, wobei die
25 Stellgrößenwerte zur Erfüllung der wenigstens einen Bedingung durch Gradientenbildung in dem mehrdimensionalen Raum berechnet werden. Dies stellt eine einfache und mathematisch leicht fassbare Ausführungsform des Verfahrens dar. Grundgedanke hierbei ist, dass ein mehrdimensionaler Gradient in Abhängigkeit von einer Mehrzahl von Stellgrößen, vorzugsweise von allen Stellgrößen des Systems, bestimmt werden kann, wobei ein Gradientenabstieg in
30 Richtung einer schnellsten Minimierung eines Gütemaßes – nach Art der Methode des „steepest descent“, also des steilsten Gradientenabstiegs – durchgeführt werden kann. Möglichkeiten zur numerischen Minimierung eines Gütemaßes mit oder ohne Berücksichtigung weiterer

Nebenbedingungen in Form eines solchen Gradientenabstiegs sind dem Fachmann grundsätzlich bekannt, sodass hierauf nicht weiter eingegangen wird.

Der mehrdimensionale Raum wird vorzugsweise durch die wenigstens eine physikalische Zielgröße und die Mehrzahl von Stellgrößen aufgespannt. Die Abbildung zwischen der
5 wenigstens einen physikalischen Zielgröße und der Mehrzahl von Stellgrößen ist dann auf dem mehrdimensionalen Raum definiert, der im Folgenden auch als Hyperraum bezeichnet wird. Bevorzugt wird dann die wenigstens eine Bedingung für die wenigstens eine physikalische Zielgröße in Form eines Gütemaßes aufgestellt, und es werden in Echtzeit Stellgrößenwerte für die Stellgröße ermittelt, mit denen die wenigstens eine Bedingung durch die wenigstens eine
10 physikalische Zielgröße erfüllt ist, wobei ein Gradientenabstieg in dem mehrdimensionalen Raum zur Optimierung, insbesondere zur Minimierung des Gütemaßes durchgeführt wird. Ein optimaler Betriebspunkt für die Brennkraftmaschine kann in diesem Fall durch Gradientenbildung und insbesondere Minimumsuche in dem Hyperraum aufgefunden werden.

Es wird so ein modellbasierter Optimierer bereitgestellt, der in einem hochdimensionalen
15 Parameterraum alle erforderlichen Korrekturbewegungen zum Ausgleich von Abweichungen im Betrieb der Brennkraftmaschine berücksichtigen kann und diese miteinander überlagert.

Beispielsweise ist es möglich, dass eine der Größen, welche den Hyperraum aufspannen, eine Stickoxidemission der Brennkraftmaschine ist. Ein Gütemaß kann dann beispielsweise optimiert werden, indem ein Gradient der Stickoxidemission in dem Hyperraum berechnet wird, wobei
20 dann bevorzugt andere Größen, insbesondere Stellgrößen, derart geregelt und/oder eingestellt werden, dass im Betrieb der Brennkraftmaschine ein Abstieg – oder gegebenenfalls auch Aufstieg – in dem Hyperraum der Ermittlungsstruktur entlang des Gradienten der Stickoxidemission erfolgt. Der Abstieg endet bevorzugt, wenn ein vorbestimmter Sollwert erreicht oder ein Minimum aufgefunden wird. Auf diese Weise erfolgt eine Optimierung –
25 bevorzugt auf den vorbestimmten Sollwert. Es ist offensichtlich, dass die Optimierung hier nicht durch einen einzelnen, separaten Regeleingriff, sondern unter Berücksichtigung vorzugsweise aller Betriebsgrößen der Brennkraftmaschine, insbesondere unter Berücksichtigung aller Stellgrößen, welche den Hyperraum mit aufspannen, erfolgt. Eine solche Optimierung ist auch unter Nebenbedingungen möglich, die beispielsweise ihrerseits wiederum als Gütemaß und/oder
30 als Begrenzungen, oder aber als separate Nebenbedingungen, formuliert werden können. Insbesondere wird eine Optimierung im Hyperraum bevorzugt so durchgeführt, dass eine als Begrenzung festgelegte Hyperfläche nicht durchstoßen wird. Dabei ist es möglich, dass der

Betriebspunkt der Brennkraftmaschine in dem Hyperraum zunächst auf die begrenzende Hyperfläche gefahren wird, wobei die Optimierung dann unter Verlagerung des Betriebspunkts auf der Hyperfläche erfolgt.

5 Unter dem Begriff „Betriebsgrößen“ werden bevorzugt allgemein physikalische Zielgrößen und Stellgrößen verstanden.

Die Umsetzung des Verfahrens zur Suche eines Optimums eines formulierten Gütemaßes mit oder ohne Berücksichtigung von Nebenbedingungen ist aber auch durch andere numerische Vorgehensweisen möglich.

10 Es wird auch eine Ausführungsform des Verfahrens bevorzugt, bei welcher eine Leistungsanforderung an die Brennkraftmaschine als Gütemaß oder Begrenzung in dem mehrdimensionalen Raum berücksichtigt wird. Dabei ist insbesondere vorgesehen, dass auch die Leistungsanforderung als Größe in den Hyperraum eingeht, wobei sie als Gütemaß oder als Begrenzung formuliert und berechnet werden kann.

15 Durch Gradientenbildung in dem mehrdimensionalen Raum wird vorzugsweise ein Korrekturvektor für die Stellgrößen gebildet. Werden mehr als eine physikalische Zielgröße im Rahmen des Verfahrens betrachtet, können mehrere Gradienten und damit mehrere Korrekturvektoren gebildet werden, welche miteinander überlagert werden können. Somit sind verschiedene Ausregelungswünsche miteinander superponierbar, wodurch sich das Gesamtsystem zu einem Betriebspunkt bewegt, an welchem die überlagerten
20 Ausregelungswünsche, mithin die verschiedenen Bedingungen an die verschiedenen physikalischen Zielgrößen, erfüllt sind. Dies ist in besonders einfacher Weise dadurch möglich, dass die verschiedenen Gradienten aufaddiert werden.

Bevorzugt wird eine Richtung eines Korrekturvektors für die Stellgrößen durch den Einheitsvektor eines Gradienten der physikalischen Zielgröße oder des Gütemaßes in dem
25 Hyperraum vorgegeben, wobei eine Schrittweite für die Korrektur, also insbesondere ein Betrag des Korrekturvektors, durch die Soll/Ist-Abweichung des aktuellen Werts der physikalischen Zielgröße von einem Sollwert bestimmt wird. Dies ermöglicht eine sehr stabile Regelung, weil die Schrittweite mit Annäherung an den Sollwert abnimmt. Zugleich erfolgt eine schnelle Ausregelung, weil aufgrund der Vorgabe der Korrekturrichtung durch den Gradienten ein
30 möglichst steiler Abstieg in dem Hyperraum erfolgt.

Es ist auch möglich, dass der Gradient einer Kostenfunktion, beispielsweise des Verbrauchs in Abhängigkeit von Stellgrößen der Brennkraftmaschine, in dem Hyperraum gebildet wird, wobei ein Korrekturvektor zur Beeinflussung der Stellgrößen verwendet wird, welcher – gegebenenfalls bis auf einen Faktor – gleich dem Gradientenvektor ist. In entsprechender Weise können andere Extremalwerte eingestellt werden, insbesondere auch Maximalwerte. Durch die Verwendung des Gradientenvektors erfolgt ein möglichst steiler Verlauf des Betriebspunkts der Brennkraftmaschine in Richtung des Extremalwerts.

Eine Begrenzung einer physikalischen Zielgröße auf einen vorbestimmten Grenzwert beschreibt vorzugsweise – je nach Dimensionalität des Problems – einen vorbestimmten Grenzpunkt, eine Grenzkurve, eine Grenzfläche oder einen Grenzraum, wobei die entsprechende Begrenzung nicht oder nur kurzfristig überschritten oder durchstoßen werden darf. Wird die Bedingung an die wenigstens eine physikalische Zielgröße durch Gradientenbildung in einem mehrdimensionalen Raum ermittelt, stellt eine solche Begrenzung vorzugsweise eine Hyperfläche in dem Hyperraum dar. Insbesondere stellt die Begrenzung bevorzugt in einem n -dimensionalen Raum eine $(n-1)$ -dimensionale Struktur dar, in einem eindimensionalen Raum also einen Punkt, in einem zweidimensionalen Raum eine Grenzkurve, in einem dreidimensionalen Raum eine Grenzfläche, in einem vierdimensionalen Raum einen dreidimensionalen Grenzraum, und in einem vieldimensionalen Hyperraum mit mehr als vier Dimensionen entsprechend eine in ihrer Dimension im Vergleich zu dem Hyperraum um eins reduzierte Hyperfläche. Dabei stellt die Dimension, um welche die Begrenzung reduziert ist, gerade diejenige Größe dar, hinsichtlich derer die Begrenzung erfolgen soll. Sind mehrere zu begrenzende physikalische Zielgrößen zu berücksichtigen, kann entsprechend eine Begrenzung mit einer weiter reduzierten Dimensionalität formuliert werden. Eine solche mehrdimensionale Begrenzung kann jedoch ohne Weiteres auch als eine Superposition verschiedener, einzelner Begrenzungen beschrieben werden, sodass sich hier qualitativ nichts anderes ergibt, als bereits zuvor beschrieben wurde, nur dass eben Begrenzungen in Hinblick auf verschiedene Größen berücksichtigt werden. Es ist darauf zu achten, dass der mehrdimensionale Raum, der auch als Steuerraum bezeichnet wird, eine eindeutige Lösung der Optimierungsaufgabe zulässt.

Es wird auch eine Ausführungsform des Verfahrens bevorzugt, die sich dadurch auszeichnet, dass zu verschiedenen Zeiten Bedingungen an verschiedene physikalische Zielgrößen aufgestellt werden. Insbesondere ist es möglich, dass zu verschiedenen Zeiten verschiedene zu optimierende, zu begrenzende oder auf einen Extremalwert einzustellende physikalische Zielgrößen betrachtet werden. Insbesondere ist es möglich, dass betriebspunktabhängig zwischen

verschiedenen auf einen Sollwert zu regelnden, zu begrenzenden oder auf einen Extremalwert einzustellenden physikalischen Zielgrößen umgeschaltet wird. Hierzu ist bevorzugt eine Umschalteneinrichtung vorgesehen, welche zwischen den verschiedenen physikalischen Zielgrößen umschaltet. Beispielsweise ist es möglich, dass in einem ersten Betriebspunkt oder Betriebspunktbereich ein Verbrauch der Brennkraftmaschine an Brennstoff minimiert wird, wobei in einem anderen Betriebspunkt oder Betriebspunktbereich eine Abgastemperatur der Brennkraftmaschine auf einen für eine Regeneration eines Partikelfilters günstigen Wert eingestellt, insbesondere geregelt oder gesteuert wird. Es ist in diesem Fall, aber auch in anderen Fällen, möglich, dass sich bestimmte Regelungsziele widersprechen. Eine für die Regeneration eines Partikelfilters vorgesehene Anhebung der Abgastemperatur bedingt typischerweise einen erhöhten Verbrauch, was konträr zu dem Ziel einer Verbrauchsminimierung steht. Daher ist es in einem solchen, aber auch in anderen Fällen vorteilhaft, wenn zwischen verschiedenen Ausregelungszielen umgeschaltet werden kann.

Es kann also insbesondere eine Betriebsmodusumschaltung erfolgen, beispielsweise aus einem Normalmodus in einen Thermomanagement-Modus zur Erhöhung der Abgastemperatur. Eine solche Umschaltung von Regelungszielen, insbesondere von Bedingungen an verschiedene physikalische Zielgrößen, kann insbesondere durch Variation der Gewichtungsfaktoren in einem Gütemaß erfolgen. Dabei können einzelne Terme zu Null gesetzt oder verschiedene Terme – in Relation zueinander – in ihrer Gewichtung verschoben werden. Auf diese Weise sind sehr einfach und schnell verschiedene Betriebsziele, insbesondere betriebspunktabhängig, darstellbar. Dabei können zu verschiedenen Zeiten verschiedene, auch einander widersprechende Regelungsziele verfolgt werden. In das Gütemaß können auch zusätzliche Terme hinzugenommen oder weggelassen werden. Ein Weglassen von Termen erfolgt allerdings bevorzugt durch Nullsetzen der diesen Termen zugeordneten Gewichtungsfaktoren.

Es wird auch eine Ausführungsform des Verfahrens bevorzugt, die sich dadurch auszeichnet, dass die wenigstens eine Bedingung an die wenigstens eine physikalische Zielgröße bei einem Ausfall eines einer Stellgröße zugeordneten Stellelements durch Anpassen der Stellgrößenwerte für die übrigen Stellgrößen erfüllt wird. Auf diese Weise kann einfach und schnell auf einen Ausfall eines Stellelements reagiert werden, wobei die verbleibenden Stellelemente – insbesondere kollektiv – so angesteuert werden, dass ein vorgegebenes Regelungsziel, insbesondere die wenigstens eine Bedingung an die wenigstens eine physikalische Zielgröße, weiterhin erfüllt wird. Das Verfahren reagiert also auf den Ausfall eines Stellelements durch Ausgleichsbewegungen aller weiteren Stellelemente in bezüglich der aufgestellten Bedingungen

an den Betrieb der Brennkraftmaschine optimaler Weise. Es ist bevorzugt möglich, dass wenigstens eine Bedingung einer Mehrzahl von Bedingungen an eine Mehrzahl von physikalischen Zielgrößen aufgegeben wird, wenn ein Stellelement ausfällt. Dies kann insbesondere durch Nullsetzen des Gewichtungsfaktors der entsprechenden Bedingung in dem

5 Gütemaß erfolgen. Eine solche Aufgabe eines Regelungsziels, mithin einer Bedingung an eine physikalische Zielgröße, kann bei der Erfüllung der weiteren Bedingungen nach Ausfall eines Stellelements hilfreich sein. Insbesondere kann so ein Notbetrieb der Brennkraftmaschine ermöglicht werden, bei dem beispielsweise aus Sicherheitsgründen zwingend notwendige Funktionen erhalten bleiben, während unter Sicherheitsaspekten nachrangige Regelungsziele

10 nicht weiterverfolgt werden. Beispielsweise kann ein Betrieb der Brennkraftmaschine bei Überschreiten gesetzlicher Abgasgrenzwerte aufrechterhalten werden, um einen Notantrieb – beispielsweise für ein Unterseeboot – zu gewährleisten.

Es wird auch eine Ausführungsform des Verfahrens bevorzugt, die sich dadurch auszeichnet, dass als Stellgrößenwerte Sollwerte für separate Regel- oder Einstelleinrichtungen berechnet

15 werden, wobei die separaten Regel- oder Einstelleinrichtungen den Stellgrößen jeweils zugeordnet sind. Hierbei wird bevorzugt für wenigstens eine Stellgröße eine separate, nur dieser Stellgröße zugeordnete Regel- oder Einstelleinrichtung verwendet. Besonders bevorzugt ist vorgesehen, dass für jede Stellgröße eine solche separate Regel- oder Einstelleinrichtung verwendet wird. Diese separaten Regel- oder Einstelleinrichtungen werden dann mit den als

20 Stellgrößenwerte im Rahmen des Verfahrens ermittelten Sollwerten angesteuert. Dies hat den Vorteil, dass bereits vorhandene Regel- oder Einstelleinrichtungen, die für sich genommen bekannt sind, verwendet werden können, wobei diese jedoch nicht – wie bisher bekannt – separat voneinander beeinflusst werden, wobei sie in diesem herkömmlichen Fall ihre Sollwerte aus einer Vielzahl von Kennfeldern und Korrekturkennfeldern erhalten haben. Vielmehr werden sie

25 nun mit den im Rahmen des Verfahrens ermittelten Sollwerten angesteuert, wobei diese Sollwerte aufeinander abgestimmt sind. Die im Rahmen des Verfahrens bereitgestellte Ermittlungsstruktur ist so als Koordinator-Struktur ausgebildet, welche einzelne, separate Regelkreise oder Steuerstrukturen anspricht. Vorteilhaft hierbei ist, dass die bisherigen Regelkreise und Steuerstrukturen in ihrer Funktion erhalten bleiben können. Es wird lediglich

30 zusätzlich die überlagerte Koordinator-Struktur vorgesehen, welche koordiniert Sollwerte für das ganze Set der Regel- oder Einstellstrukturen vorgibt. Umgekehrt werden der Koordinator-Struktur aus den einzelnen Regelkreisen und/oder Steuerstrukturen Informationen zurückgemeldet, insbesondere Informationen über den Zustand der Regelkreise, beispielsweise

das Erreichen einer Stellerbegrenzung. Die Koordinator-Struktur ihrerseits wertet Anforderungen an die Brennkraftmaschine und somit insbesondere Bedingungen an die wenigstens eine physikalische Abbildung, beispielsweise eine Leistungsanforderung des Betreibers sowie weitere Betriebsbedingungen, beispielsweise in Hinblick auf Emissionen, einen Schutz der

- 5 Brennkraftmaschine, deren Lebensdauer sowie deren Verbrauch, aus. Sie berücksichtigt die Informationen aus den einzelnen Komponenten und gibt die Sollwerte für die einzelnen Regelkreise und/oder die Vorgabewerte für die einzelnen Steuerstrukturen so vor, dass ein optimales Ergebnis für das Gesamtsystem erreicht wird. Diese Ausgestaltung der Ermittlungsstruktur ist vergleichsweise einfach zu implementieren, da auf die Regel- und/oder
- 10 Steuerungsfunktionalität der bereits vorhandenen und an sich bekannten Regel- oder Einstelleinrichtungen zurückgegriffen werden kann, wobei die Ermittlungsstruktur selbst keine Regler- oder Steuer-Funktionalität für einzelne Stellgrößen aufzuweisen braucht.

- Unter einer Regeleinrichtung oder Einstelleinrichtung ist hier eine physikalische oder eine virtuelle Einrichtung zu verstehen, die entweder durch einen fest in eine Hardwarestruktur
- 15 implementierten Mechanismus oder durch ein auf Softwareebene implementiertes Modul, beispielsweise einen Software-Regelkreis, realisiert sein kann. Die Regel- oder Einstelleinrichtungen dienen bevorzugt der Ansteuerung von Stellelementen der Brennkraftmaschine, insbesondere also zur Steuerung oder Regelung von Stellgrößen für die Stellelemente. Als Stellgrößenwerte werden mittels der Ermittlungsstruktur vorzugsweise
- 20 Sollwerte für die entsprechenden Regelkreise oder Werte, mit denen die entsprechenden Einstelleinrichtungen angesteuert werden, also Werte für die verschiedenen Stellgrößen, ermittelt. Vorteilhaft hierbei ist, dass diese Stellgrößenwerte mithilfe der Ermittlungsstruktur in Abhängigkeit voneinander und nicht mehr – wie zuvor – separat voneinander ermittelt werden.

- Unter dem Begriff „Regeln“ wird insbesondere eine Regelung im Sinne eines Regelkreises unter
- 25 Rückkopplung der geregelten Größe und Betrachtung einer Soll/Ist-Abweichung verstanden. Unter einer „Einstellung“ wird hier insbesondere eine Steuerung ohne Rückkopplung verstanden. Es ist möglich, dass bestimmte Stellgrößen geregelt werden, während andere Stellgrößen gesteuert werden. Es ist auch möglich, dass Stellgrößen durch eine Vorsteuerung mit unterlagerter Regelung eingestellt werden.

- 30 Alternativ oder zusätzlich wird eine Ausführungsform des Verfahrens bevorzugt, die sich dadurch auszeichnet, dass als Stellgrößenwerte Stellwerte berechnet werden, welche direkt zur Ansteuerung von den Stellgrößen zugeordneten Stellelementen verwendet werden. Dabei

entfallen die separaten, den einzelnen Stellgrößen zugeordneten Regel- oder
Einstelleinrichtungen. Vielmehr werden die Stellelemente direkt durch die im Rahmen des
Verfahrens berechneten Stellgrößenwerte angesteuert. Die Ermittlungsstruktur bildet bei dieser
Ausführungsform einen Gesamtsystem-Regler, welcher bevorzugt Zugriff auf alle Stellelemente
5 des Systems hat. Damit existiert eine vollständige Freiheit im Zugriff auf alle Stellelemente,
sodass die feste Zuordnung von Regel- oder Einstelleinrichtungen zu den Stellgrößen entfällt,
wobei keinerlei strukturelle Beschränkungen mehr für die Funktionsweise des Gesamtsystem-
Reglers existieren. Damit ist diese Ausführungsform des Verfahrens flexibler einsetzbar als die
zuvor beschriebene Ausführungsform, bei welcher die Ermittlungsstruktur als Koordinator-
10 Struktur ausgebildet ist. Allerdings bestehen erhöhte Anforderungen an die Ermittlungsstruktur,
da diese zusätzlich auch die Regler- oder Steuerungsfunktionalität für die einzelnen Stellgrößen
übernehmen muss, was bei der anderen Ausführungsform durch die separaten Regel- oder
Einstelleinrichtungen übernommen wird.

Es wird auch eine Ausführungsform des Verfahrens bevorzugt, die sich dadurch auszeichnet,
15 dass im Rahmen des Verfahrens anhand der Abbildung als Stellgrößenwerte Korrekturwerte für
Stellgrößen berechnet werden, die auf Normwerte für die Stellgrößen angerechnet werden. In
diesem Fall werden zur Ansteuerung von Stellelementen der Brennkraftmaschine bevorzugt
Normwerte aus Normkennfeldern ausgelesen, die dann durch Berechnung der Korrekturwerte
korrigiert werden. Die Korrekturwerte können dabei als auf die Normwerte anzurechnende
20 Korrektursummanden oder Korrekturfaktoren ermittelt werden. Dies hat den Vorteil, dass die
den physikalischen Zielgrößen zugeordneten Abbildungen keine globale Gültigkeit im gesamten
Betriebsbereich der Brennkraftmaschine aufweisen müssen, sondern dass eine lokale Gültigkeit
in bestimmten Betriebspunkten oder Betriebspunktbereichen genügen kann. Dies resultiert
daraus, dass anhand der wenigstens einen Abbildung keine vollständigen Vorgabewerte für die
25 Stellgrößen berechnet werden, sondern lediglich vorbestimmte Normwerte korrigiert werden.
Auf diese Weise können Normabweichungen im Betrieb der Brennkraftmaschine, insbesondere
Umwelt- und/oder Alterungseinflüsse, berücksichtigt werden. Vorteilhaft ist, dass die Modelle
nur in der Umgebung des Normpunkts genau sein müssen. Dabei können insbesondere betriebs-
oder normpunktabhängig verschiedene Abbildungen für dieselben physikalischen Zielgrößen
30 verwendet werden.

Alternativ ist es möglich, dass im Rahmen des Verfahrens vollständige Vorgabewerte als
Stellgrößenwerte berechnet werden, wobei es dann keines Rückgriffs auf Normkennfelder
bedarf. Mit solchen vollständigen Stellgrößenwerten können Stellelemente direkt angesteuert

werden, ohne dass diese Stellgrößenwerte nochmals mit weiteren Werten verrechnet werden müssen.

In jedem Fall entfällt aber ein Rückgriff auf eine unüberschaubare Vielzahl von Korrekturkennfeldern, da die Korrektur und Anpassung von Normwerten durch das hier vorgeschlagene Verfahren unter Rückgriff auf die wenigstens eine Abbildung erfolgt, sodass es keiner Korrekturkennfelder mehr bedarf. Dabei werden in verständlicher und überschaubarer Weise physikalische Zusammenhänge und Quereinflussungen sowie Wechselwirkungen zwischen den Stellgrößen durch die Ermittlungsstruktur berücksichtigt.

Es wird auch eine Ausführungsform des Verfahrens bevorzugt, die sich dadurch auszeichnet, dass Stellelementanschlüsse oder Stellgrößenbegrenzungen bei der Beeinflussung der Stellgrößen berücksichtigt werden. Ein Beispiel hierfür ist ein Klappenanschlag oder ein Betrieb einer Komponente einer Abgasnachbehandlungseinrichtung an ihrer Betriebsgrenze, beispielsweise eines SCR-Katalysators im Bereich seiner maximalen Umsatzrate. Vorzugsweise werden nicht zu unterschreitende Abstände von maximalen oder minimalen Stellgrößenwerten berücksichtigt, die besonders bevorzugt als Begrenzungen formuliert werden und entsprechend nicht über- oder unterschritten werden dürfen. Nähert sich eine Stellgröße einer solchen Begrenzung, ist vorzugsweise vorgesehen, dass ein Korrekturwert auf die Stellgröße aufgeschlagen wird, der diese von dem zulässigen Extremalwert entfernt. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass bezüglich jeder Stellgröße stets eine ausreichende Regel- oder Stellreserve erhalten bleibt. Es ist auch möglich, dass ein im Rahmen des Verfahrens berechneter Korrekturvektor für Stellgrößen in Richtung eines Extremalwerts einer Stellgröße begrenzt wird.

Es wird auch eine Ausführungsform des Verfahrens bevorzugt, die sich dadurch auszeichnet, dass wenigstens eine der physikalischen Zielgrößen und/oder Stellgrößen einer Abgasnachbehandlungseinrichtung zugeordnet ist. Mithilfe des Verfahrens und insbesondere mithilfe der Ermittlungsstruktur werden also nicht nur dem Motor selbst zugeordnete Größen berücksichtigt, sondern bevorzugt auch Größen einer Abgasnachbehandlungseinrichtung, beispielsweise eines Partikelfilters, eines SCR-Katalysators, eines Oxidationskatalysators oder anderer Einrichtungen. Auf diese Weise wird eine Betrachtung des gesamten Systems der Brennkraftmaschine im Rahmen des Verfahrens möglich.

Die Aufgabe wird auch gelöst, indem eine Steuereinrichtung für eine Brennkraftmaschine mit den Merkmalen des Anspruchs 13 geschaffen wird. Die Steuereinrichtung ist eingerichtet zur

Durchführung eines Verfahrens nach einer der zuvor beschriebenen Ausführungsformen. Damit verwirklichen sich in Zusammenhang mit der Steuereinrichtung die Vorteile, die bereits in Zusammenhang mit dem Verfahren erläutert wurden.

Es ist möglich, dass eine separate Steuereinrichtung zur Durchführung des Verfahrens vorgesehen ist. Bevorzugt ist die Steuereinrichtung allerdings ausgebildet als Steuergerät, insbesondere als zentrales Steuergerät oder Motorsteuergerät der Brennkraftmaschine (Engine Control Unit – ECU). Es ist aber auch möglich, dass die Steuereinrichtung eine Mehrzahl von Steuergeräten aufweist, die miteinander wirkverbunden sind, wobei es insbesondere möglich ist, dass die Funktionalität des Verfahrens auf die mehreren Steuergeräte aufgeteilt ist.

- Bei einem Ausführungsbeispiel ist es möglich, dass das Verfahren in eine elektronische Struktur, insbesondere in eine Hardwarestruktur, der Steuereinrichtung, implementiert ist. Alternativ ist bevorzugt vorgesehen, dass ein Computerprogrammprodukt in die Steuereinrichtung geladen ist, welches Anweisungen aufweist, aufgrund derer das Verfahren durchgeführt wird, wenn das Computerprogrammprodukt auf der Steuereinrichtung läuft. Dabei ist insbesondere die Ermittlungsstruktur vorzugsweise als Softwaremodul des Computerprogrammprodukts implementiert.

Gegenstand der Erfindung ist bevorzugt auch ein Computerprogrammprodukt, welches sich durch maschinenlesbare Anweisungen auszeichnet, aufgrund derer ein Verfahren nach einer der zuvor beschriebenen Ausführungsformen durchgeführt wird, wenn das

- Computerprogrammprodukt in einen Rechner geladen ist und auf dem Rechner läuft. Entsprechend wird auch ein Datenträger bevorzugt, auf welchem ein solches Computerprogrammprodukt gespeichert ist. In Zusammenhang mit dem Computerprogrammprodukt und dem Datenträger verwirklichen sich die bereits in Zusammenhang mit dem Verfahren erläuterten Vorteile.

- Schließlich wird die Aufgabe auch gelöst, indem eine Brennkraftmaschine mit den Merkmalen des Anspruchs 14 geschaffen wird. Die Brennkraftmaschine zeichnet sich durch eine Steuereinrichtung nach einem der zuvor beschriebenen Ausführungsbeispiele aus. Damit verwirklichen sich in Zusammenhang mit der Brennkraftmaschine die Vorteile, die bereits in Zusammenhang mit dem Verfahren und der Steuereinrichtung erläutert wurden.

- Die Brennkraftmaschine ist vorzugsweise als Hubkolbenmotor ausgebildet. Es ist möglich, dass die Brennkraftmaschine zum Antrieb eines Personenkraftwagens, eines Lastkraftwagens oder

- eines Nutzfahrzeugs eingerichtet ist. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel dient die Brennkraftmaschine dem Antrieb insbesondere schwerer Land- oder Wasserfahrzeuge, beispielsweise von Minenfahrzeugen, Zügen, wobei die Brennkraftmaschine in einer Lokomotive oder einem Triebwagen eingesetzt wird, oder von Schiffen. Auch ein Einsatz der
- 5 Brennkraftmaschine zum Antrieb eines der Verteidigung dienenden Fahrzeugs, beispielsweise eines Panzers, ist möglich. Ein Ausführungsbeispiel der Brennkraftmaschine wird vorzugsweise auch stationär, beispielsweise zur stationären Energieversorgung im Notstrombetrieb, Dauerlastbetrieb oder Spitzenlastbetrieb eingesetzt, wobei die Brennkraftmaschine in diesem Fall vorzugsweise einen Generator antreibt. Auch eine stationäre Anwendung der
- 10 Brennkraftmaschine zum Antrieb von Hilfsaggregaten, beispielsweise von Feuerlöschpumpen auf Bohrinseln, ist möglich. Weiterhin ist eine Anwendung der Brennkraftmaschine im Bereich der Förderung fossiler Roh- und insbesondere Brennstoffe, beispielsweise Öl und/oder Gas, möglich. Auch eine Verwendung der Brennkraftmaschine im industriellen Bereich oder im Konstruktionsbereich, beispielsweise in einer Konstruktions- oder Baumaschine, zum Beispiel in
- 15 einem Kran oder einem Bagger, ist möglich. Die Brennkraftmaschine ist vorzugsweise als Dieselmotor, als Benzinmotor, als Gasmotor zum Betrieb mit Erdgas, Biogas, Sondergas oder einem anderen geeigneten Gas, ausgebildet. Insbesondere wenn die Brennkraftmaschine als Gasmotor ausgebildet ist, ist sie für den Einsatz in einem Blockheizkraftwerk zur stationären Energieerzeugung geeignet.
- 20 Die Beschreibung des Verfahrens einerseits und der Steuereinrichtung sowie der Brennkraftmaschine andererseits sind komplementär zueinander zu verstehen. Merkmale der Steuereinrichtung oder der Brennkraftmaschine, die explizit oder implizit in Zusammenhang mit dem Verfahren beschrieben wurden, sind bevorzugt einzeln oder miteinander kombiniert
- 25 Merkmale eines bevorzugten Ausführungsbeispiel der Steuereinrichtung oder der Brennkraftmaschine. Verfahrensschritte, die explizit oder implizit in Zusammenhang mit der Steuereinrichtung oder der Brennkraftmaschine beschrieben wurden, sind bevorzugt einzeln oder miteinander kombiniert Verfahrensschritte einer bevorzugten Ausführungsform des Verfahrens. Dieses zeichnet sich bevorzugt durch wenigstens einen Verfahrensschritt aus, der durch
- 30 wenigstens ein Merkmal eines erfindungsgemäßen oder bevorzugten Ausführungsbeispiels der Steuereinrichtung oder der Brennkraftmaschine bedingt ist. Die Steuereinrichtung und/oder die Brennkraftmaschine zeichnet/zeichnen sich bevorzugt durch wenigstens ein Merkmal aus, das durch wenigstens einen Verfahrensschritt einer erfindungsgemäßen oder bevorzugten Ausführungsform des Verfahrens bedingt ist.

Die Erfindung wird im Folgenden anhand der Zeichnung näher erläutert. Dabei zeigen:

- Figur 1 eine schematische Darstellung eines Verfahrens zum Betreiben einer Brennkraftmaschine gemäß dem Stand der Technik;
- Figur 2 eine schematische Darstellung einer prinzipiellen Funktionsweise eines erfindungsgemäßen Verfahrens zum Betreiben einer Brennkraftmaschine;
- Figur 3 eine schematische Darstellung einer ersten Ausführungsform eines Verfahrens zum Betreiben einer Brennkraftmaschine gemäß der Erfindung;
- Figur 4 eine schematische Darstellung einer zweiten Ausführungsform des Verfahrens;
- Figur 5 eine Detaildarstellung einer Ausführungsform des Verfahrens;
- Figur 6 eine weitere schematische Darstellung eines Verfahrens zum Betreiben einer Brennkraftmaschine gemäß dem Stand der Technik;
- Figur 7 eine schematische Darstellung einer Abbildung zwischen physikalischen Zielgrößen und Stellgrößen einer Brennkraftmaschine zur Durchführung einer Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Verfahrens zum Betreiben einer Brennkraftmaschine;
- Figur 8 eine schematische Darstellung einer Ausführungsform des Verfahrens in Form eines Diagramms;
- Figur 9a eine schematische Detaildarstellung einer Ausführungsform des Verfahrens;
- Figur 9b eine weitere schematische Detaildarstellung einer Ausführungsform des Verfahrens;
- Figur 10 eine weitere schematische Detaildarstellung einer Ausführungsform des Verfahrens;
- Figur 11 eine weitere schematische Detaildarstellung einer Ausführungsform des Verfahrens, und
- Figur 12 eine weitere schematische Detaildarstellung einer Ausführungsform des Verfahrens.

Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung eines Beispiels für ein Verfahren zum Betreiben einer Brennkraftmaschine 1 gemäß dem Stand der Technik. Die Brennkraftmaschine 1 weist ein

Steuergerät 3 sowie ein System von Stellelementen 5 auf, wobei die Stellelemente 5 zur Einstellung von Stellgrößen der Brennkraftmaschine durch das Steuergerät 3 angesteuert werden. Durch Einstellen der Stellgrößen an den Stellelementen 5 sind physikalische Zielgrößen der Brennkraftmaschine 1 veränderbar. Die Stellelemente 5 können beispielsweise – im Sinne einer

5 nicht abschließenden Aufzählung – eine Saugdrossel oder ein Druckregelventil zur Einstellung eines Raildrucks, einen Injektor oder eine Mehrzahl von Injektoren zur Einstellung einer Einspritzmenge, eines Spritzbeginns, einer Spritzdauer, eines Spritzendes oder einer ähnlichen Größe, eine Drosselklappe oder eine Abgasrückführklappe in einem Abgasrückführpfad, beispielsweise eine Spenderklappe, eine Injektionseinrichtung zur Eindüsung eines

10 Reduktionsmittels in einen Abgasstrom zur Umsetzung an einem SCR-Katalysator, und/oder ein Stellelement zur Beeinflussung eines Partikelfilters, insbesondere ein Stellelement zur Beeinflussung der Abgastemperatur im Bereich des Partikelfilters zu dessen Regeneration, umfassen. Die Stellelemente 5 werden durch das Steuergerät 3 angesteuert beziehungsweise beeinflusst, wobei dieses eine jedem Stellelement 5 einzeln zugeordnete Regel- oder

15 Einstelleinrichtung 7, hier konkret jeweils einen Regelkreis 9 aufweist. Der besseren Übersichtlichkeit wegen ist hier nur eine der Regel- oder Einstelleinrichtungen 7 beziehungsweise der Regelkreise 9 mit den entsprechenden Bezugszeichen gekennzeichnet. Durch Doppelpfeile von den einzelnen Regel- oder Einstelleinrichtungen 7 zu den Stellelementen 5 ist angedeutet, dass den Stellelementen 5 jeweils Stellgrößen vorgegeben

20 werden, wobei ein tatsächlicher Zustand der Stellelemente 5 an die Regel- oder Einstelleinrichtungen 7 zurückgemeldet wird.

Für jede der Regel- oder Einstelleinrichtungen 7 existiert hier eine Mehrzahl von Kennfeldern 11, wobei die Mehrzahl von Kennfeldern jeweils bevorzugt ein Normkennfeld sowie eine

25 Vielzahl von Korrekturkennfeldern umfassen. Wesentlich ist, dass hier jedem Regelkreis 9 eine separate Mehrzahl von Kennfeldern 11 zugeordnet ist, wobei die verschiedenen Regelkreise 9 nichts voneinander wissen und nicht miteinander verbunden sind. Es existiert somit eine Vielzahl von Kennfeldern 11, wobei konkret vorliegende Umweltbedingungen oder Alterungseinflüsse der Brennkraftmaschine 1 jeweils über die Korrekturkennfelder berücksichtigt werden.

Weiterhin können Quereinflüsse der einzelnen Regelkreise 9 höchstens durch

30 entsprechende Bedatung von Korrekturkennfeldern, insbesondere durch entsprechende betriebspunktabhängige Bedatung, berücksichtigt werden. Auf diese Weise entsteht eine hochkomplexe Struktur von Kennfeldern, deren Bedatung äußerst schwierig und fehleranfällig ist, wobei spezifische Anforderungen an die Brennkraftmaschine 1 kaum oder nur sehr schwer

darstellbar sind, und wobei nur in geringem Maße vorhersagbar ist, wie die Brennkraftmaschine 1 tatsächlich auf Abweichungen von ihren Normbetriebsbedingungen reagieren wird. Um dies im Ansatz zuverlässig ermitteln zu können, und auch zur Bedatung der Kennfelder, ist eine Vielzahl von aufwändigen und langwierigen Prüfstandsversuchen nötig.

- 5 **Fig. 2** zeigt schematisch eine prinzipielle Funktionsweise eines erfindungsgemäßen Verfahrens zum Betreiben einer Brennkraftmaschine 1. Dabei werden zum einen eine Leistungsanforderung 13 sowie anderweitige Betriebsbedingungen, nämlich Anforderungen 15 an die Brennkraftmaschine 1 in einem Übersetzungsschritt 17 auf eine Meta-Ebene übertragen und als Bedingungen an wenigstens eine Abbildung, welche wenigstens eine physikalische Zielgröße der
- 10 Brennkraftmaschine in Abhängigkeit von einer Mehrzahl von Stellgrößen der Brennkraftmaschine beschreibt, insbesondere als Gütemaße und/oder Begrenzungen in einer übergeordneten Ermittlungsstruktur, formuliert. Bei den Anforderungen 15 handelt es sich zum Beispiel um gesetzliche Anforderungen an die Emissionen der Brennkraftmaschine 1, beispielsweise um Grenzwerte für Stickoxid- oder Rußemissionen, sowie um zulässige
- 15 Einregeldauern für Emissionen. Dabei kann beispielsweise noch unterschieden werden zwischen Grenzwerten, die zeitweise und/oder betriebspunktabhängig überschritten werden dürfen und solchen, bei denen keine Überschreitung zulässig ist. Die Anforderungen 15 können auch Bedingungen in Hinblick auf die Lebensdauer der Brennkraftmaschine 1 umfassen, beispielsweise zulässige Spitzendrücke für Zylinder einer als Hubkolbenmaschine ausgebildeten
- 20 Brennkraftmaschine 1 oder eine maximale Drehzahl für einen Turbolader. Weiterhin können die Anforderungen 15 Stabilitätsbedingungen umfassen, die über eine Betriebsdauer der Brennkraftmaschine 1 erfüllt sein müssen. Hierbei kann es sich zum Beispiel um eine Drift für Injektoren der Brennkraftmaschine sowie um eine Versottung eines Kühlers, beispielsweise eines Abgasrückführkühlers, handeln. Weiterhin können die Anforderungen 15
- 25 kundenspezifische Anforderungen oder Kundenwünsche, beispielsweise in Hinblick auf einen Verbrauch der Brennkraftmaschine an Brennstoff oder eine Dynamik derselben, insbesondere in einem Fahrbetrieb, umfassen. Diese Aufzählung ist nicht abschließend, und die genannten Betriebsbedingungen können selbstverständlich alternativ oder kumulativ von den Anforderungen 15 umfasst sein.
- 30 Die in dem Übersetzungsschritt 17 insbesondere als Gütemaße und/oder Begrenzungen formulierten Bedingungen werden in einem Lösungsschritt 19 mittels der Ermittlungsstruktur gelöst, insbesondere durch eine Optimierung und/oder Minimierung – gegebenenfalls unter Berücksichtigung von Begrenzungen oder Nebenbedingungen, wobei die so erhaltenen

Lösungen schließlich in einem Umsetzungsschritt 21 auf dem Steuergerät 3 beziehungsweise auf der Brennkraftmaschine 1 umgesetzt werden. Insbesondere werden in dem Lösungsschritt 19 in Echtzeit anhand der Abbildung Stellgrößenwerte für die Stellgrößen ermittelt, mit denen die wenigstens eine Bedingung durch die wenigstens eine physikalische Zielgröße erfüllt ist, wobei
5 die Brennkraftmaschine in dem Umsetzungsschritt 21 mit den derart ermittelten Stellgrößenwerten angesteuert wird. Ist eine Struktur geschaffen, die das in Figur 2 aufgestellte Schema erfüllt, ist es möglich, sowohl die Leistungsanforderung 13 als auch die Anforderungen 15 in einfacher Weise auf der Meta-Ebene als Bedingungen direkt zu formulieren und mithilfe der Ermittlungsstruktur einer Lösung zuzuführen. Es bedarf also keiner aufwändigen
10 Implementierung der einzelnen Anforderungen durch spezifische Bedatung einer Vielzahl von Kennfeldern mehr, was nur äußerst aufwändig und ohne Gewährleistung eines zufriedenstellenden Verhaltens der Brennkraftmaschine 1 möglich ist. Vielmehr ermöglicht die das in Figur 2 dargestellte Schema erfüllende Struktur nun einen direkten Zugriff auf das Verhalten der Brennkraftmaschine 1 zur Umsetzung der Leistungsanforderung 13 und der
15 Anforderungen 15, wobei das Ergebnis insbesondere aufgrund der Formulierung als Gütemaße und/oder Begrenzungen sehr gut vorhersagbar ist.

Die in dem Übersetzungsschritt 17 gewählte Formulierung der allgemeinen Anforderungen 15 auf der Meta-Ebene als Bedingungen kann beispielsweise das Einhalten von Bereichen um vorgegebene Sollwerte, das Einhalten von Begrenzungen, sowie das Auffinden optimaler
20 Lösungen beziehungsweise das Optimieren oder Minimieren bestimmter physikalischer Zielgrößen beinhalten. Insbesondere ist es möglich, eine Minimumsuche zur Minimierung eines Verbrauchs der Brennkraftmaschine 1 auf der Meta-Ebene zu formulieren und zu implementieren. Die in dem Übersetzungsschritt 17 gewählte Formulierung auf der Meta-Ebene kann durchgängig in der Verwendung der Reglerentwicklung beibehalten werden, wobei es
25 keiner Umsetzung mehr in eine Bedatung einer Vielzahl von Kennfeldern bedarf.

Fig. 3 zeigt eine schematische Darstellung einer ersten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Verfahrens zum Betreiben einer Brennkraftmaschine 1. Gleiche und funktionsgleiche Elemente sind mit gleichen Bezugszeichen versehen, sodass insofern auf die vorangegangene Beschreibung verwiesen wird. In diesem Fall ist hier eine Ermittlungsstruktur
30 23 vorgesehen, welche einen mathematischen Raum, auf dem die wenigstens eine Abbildung und mathematische Operationen definiert sind, sowie insbesondere die Abbildung und die mathematischen Operationen, aufweist, und welche vorzugsweise als Software-Modul in das Steuergerät 3 implementiert ist, und welche für die Regelung und/oder Einstellung von

- Betriebsgrößen der Brennkraftmaschine 1, insbesondere zur Ansteuerung der Stellelemente 5 verwendet wird. Dabei ist hier die Ermittlungsstruktur 23 den in bekannter Weise vorgesehenen, separaten Regel- oder Einstelleinrichtungen 7, insbesondere den Regelkreisen 9 überlagert, wobei durch die Ermittlungsstruktur 23 Stellgrößenwerte für die einzelnen Regel- oder
- 5 Einstelleinrichtungen 7 ermittelt werden. Insbesondere werden durch die Ermittlungsstruktur 23 Sollwerte für die Regelkreise 9 ermittelt beziehungsweise vorgegeben. Dabei ist es bei einer Ausführungsform des Verfahrens möglich, dass durch die Ermittlungsstruktur 23 direkt Sollwerte für die Regelkreise 9 berechnet werden. In einer anderen Ausführungsform des Verfahrens ist es möglich, dass zunächst unkorrigierte Sollwerte für die Regelkreise 9 aus
- 10 Normkennfeldern ausgelesen werden, welche den Regelkreisen 9 separat zugeordnet sind, wobei diese unkorrigierten Sollwerte mittels der Ermittlungsstruktur 23 korrigiert werden, wobei durch die Ermittlungsstruktur 23 Korrekturwerte berechnet werden, welche auf die unkorrigierten Sollwerte – insbesondere als Summanden oder als Faktoren – angerechnet werden, wodurch korrigierte Sollwerte resultieren, mit denen dann die Regelkreise 9 angesteuert werden.
- 15 Dabei ist es zugleich auch möglich, dass Begrenzungen der Stellelemente 5, beispielsweise Klappenanschläge, berücksichtigt werden, wobei mittels der Ermittlungsstruktur 23 gewährleistet wird, dass stets ein minimaler Abstand zu einer Extremalposition eines Stellelements 5 eingehalten wird. Auch ist es möglich, dass bei Annäherung an eine solche Extremalposition durch die Ermittlungsstruktur 23 ein sogenannter Freifahrwert auf den Sollwert
- 20 angerechnet wird, sodass sich der vorgegebene Sollwert für das jeweilige Stellelement 5 weiter von der Extremalposition entfernt. Hierdurch kann gewährleistet werden, dass zu jeder Zeit eine ausreichende Regel- oder Stellreserve für die Stellelemente 5 gewährleistet ist. Diese werden dann nicht an ihren Anschlag oder in ihre Begrenzung gefahren.
- In die Ermittlungsstruktur 23 gehen die Leistungsanforderung 13 sowie die Anforderungen 15
- 25 als Bedingungen an die wenigstens eine physikalische Zielgröße ein. In der Ermittlungsstruktur 23 werden bevorzugt der Leistungsanforderung 13 und der Anforderungen 15 entsprechende, übergeordnete Gütemaße und/oder Begrenzungen ausgewertet, und es werden entsprechende Vorgabewerte für die einzelnen Regelkreise 9 berechnet. Die Berechnung geschieht dabei gemeinsam, wobei Quervereinflussungen und physikalische Zusammenhänge zwischen den
- 30 einzelnen Stellelementen 5 und den Regelkreisen 9 inhärent durch die Ermittlungsstruktur 23 berücksichtigt werden.

Insbesondere ist die Ermittlungsstruktur 23 vorzugsweise als Hyperraum von physikalischen Zielgrößen und Stellgrößen der Brennkraftmaschine ausgestaltet, wobei die Gütemaße bevorzugt als Gradienten in dem Hyperraum formuliert werden, und wobei Begrenzungen bevorzugt als Hyperflächen in dem Hyperraum dargestellt werden, welche durch einen momentanen Betriebspunkt der Brennkraftmaschine 1 nicht durchstoßen werden dürfen. Die Sollwerte für die einzelnen Regelkreise 9 stellen Komponenten eines Vektors in dem Hyperraum 9 dar, der in einzelnen Regelschritten der Ermittlungsstruktur 23 auf der Grundlage der Gütemaß-Gradienten unter Berücksichtigung der Begrenzungen und/oder Nebenbedingungen stets neu berechnet wird. Mit jedem Berechnungsschritt entsteht ein neuer Vektor von Stellgrößenwerten, insbesondere Vorgabe- oder Sollwerten, wobei die einzelnen Vorgabe- oder Sollwerte an die Regelkreise 9 übermittelt werden. Durch Doppelpfeile ist angedeutet, dass zugleich ein Zustand der Regelkreise 9 an die Ermittlungsstruktur 23 zurückgemeldet und in die Neuberechnung des Vorgabevektors einbezogen wird. Die Regelkreise 9 übernehmen in an sich bekannter Weise die Ansteuerung der Stellelemente 5, wie das bereits in Zusammenhang mit Figur 1 erläutert wurde. Von den Stellelementen 5 werden bevorzugt wiederum Informationen über den Zustand der Brennkraftmaschine 1 an ein Bestimmungselement 25 übermittelt, welches einen aktuellen Zustand der Brennkraftmaschine 1 bestimmt, der wiederum durch die Ermittlungsstruktur 23 ausgewertet und zur Berechnung des Vorgabevektors herangezogen wird. Beispielsweise kann dabei ein Alterungszustand von Komponenten der Brennkraftmaschine 1 oder ein Versottungszustand, beispielsweise eines AGR-Kühlers, bestimmt werden.

Bei der Ausführungsform des Verfahrens gemäß Figur 3 ist die Ermittlungsstruktur 23 als Koordinator-Struktur implementiert, welche eine übergeordnete, gemeinsame Berechnung von Vorgabe- oder Sollwerten für die Regel- oder Einstelleinrichtungen 7 durchführt. Die Ermittlungsstruktur 23 muss dabei selbst keine Regelungsfunktionalität für die einzelnen Stellelemente 5 aufweisen, da dies in an sich bekannter Weise durch die Regelkreise 9 durchgeführt wird.

Es ist möglich, dass zwischen die Regelkreise 9 und die Stellelemente 5 noch ein hier nicht dargestelltes Sensor-Aktor-Korrekturmodul zwischengeschaltet ist, welches auf der Grundlage physikalischer Teilmodelle eine Stell- und Messwertgrößenkorrektur durchführt. Dies kann insbesondere vorgesehen sein, um eine Serienstreuung verschiedener Brennkraftmaschinen 1 untereinander zu minimieren.

Fig. 4 zeigt eine schematische Darstellung einer zweiten Ausführungsform des Verfahrens. Gleiche und funktionsgleiche Elemente sind mit gleichen Bezugszeichen versehen, sodass insofern auf die vorangegangene Beschreibung verwiesen wird. Im Unterschied zu der Ausführungsform gemäß Figur 3 entfallen bei der in Figur 4 dargestellten Ausführungsform die

- 5 den Stellelementen 5 separat zugeordneten Regel- oder Einstelleinrichtungen 7. Stattdessen werden die Stellelemente 5 direkt mittels der Ermittlungsstruktur 23 und insbesondere von dieser angesteuert. Somit verarbeitet die Ermittlungsstruktur 23 direkt alle Messgrößen, Informationen über den Systemzustand, Anforderungen und Stellgrößen der Brennkraftmaschine 1. Insbesondere übernimmt sie auch die Steuerungs- und/oder Regelungsfunktion der Regel- oder
- 10 Einstelleinrichtungen 7. Dies ist durch eine Reihe von Doppelpfeilen dargestellt, welche hier unmittelbar von der Ermittlungsstruktur 23 auf die Stellelemente 5 und umgekehrt verweisen. Bei dieser Ausführungsform des Verfahrens wird die feste Zuordnung der Regelkreise 9 zu den Stellgrößen beziehungsweise den Stellelementen 5 aufgehoben, sodass keinerlei strukturelle Einschränkungen mehr bezüglich der Verwendung der Ermittlungsstruktur 23 bestehen. Damit
- 15 ist die Ermittlungsstruktur 23 gemäß der Ausführungsform von Figur 4 flexibler einsetzbar als dies bei der Ausführungsform gemäß Figur 3 der Fall ist. Andererseits bestehen erhöhte Anforderungen an die Ermittlungsstruktur 23, da diese zusätzlich zu der koordinierten und für das Gesamtsystem der Brennkraftmaschine 1 optimalen Ermittlung von Stellgrößen- oder Vorgabewerten für die Stellelemente 5 auch noch Steuerungs- und/oder Regelungsfunktionen zu
- 20 deren Ansteuerung übernehmen muss. Im Übrigen gehen auch bei der Ausführungsform gemäß Figur 4 in die Ermittlungsstruktur 23 die Leistungsanforderungen 13, die Anforderungen 15 sowie der von dem Bestimmungselement 25 ermittelte Systemzustand ein.

- Auch bei dieser Ausführungsform des Verfahrens ist es möglich, dass zwischen die Ermittlungsstruktur 23 und die Stellelemente 5 ein Sensor-Aktor-Korrekturmodul
- 25 zwischengeschaltet ist, welches insbesondere physikalische Teilmodelle für eine Korrektur der Mess- und Stellgrößen heranzieht, wie dies bereits in Zusammenhang mit Figur 3 erläutert wurde.

- Fig. 5** zeigt eine schematische Detaildarstellung einer Ausführungsform des Verfahrens. Dabei kann der hier dargestellte Ansatz sowohl für die erste Ausführungsform des Verfahrens gemäß
- 30 Figur 3 als auch für die zweite Ausführungsform gemäß Figur 4 verwendet werden. Gleiche und funktionsgleiche Elemente sind mit gleichen Bezugszeichen versehen, sodass insofern auf die vorangegangene Beschreibung verwiesen wird. Dabei ist auf der linken Seite von Figur 5 dargestellt, dass in die Ermittlungsstruktur 23, die vorzugsweise als Software-Modul ausgestaltet

ist, welches in das Steuergerät 3 geladen ist, die Leistungsanforderung 13, die Anforderungen 15 und der durch das Bestimmungselement 25 ermittelte Systemzustand der Brennkraftmaschine 1 eingehen. Diese Informationen werden – was hier durch einen Pfeil P dargestellt ist – bei der hier dargestellten Ausführungsform in ein Gesamtmodell 27 der Brennkraftmaschine 1 eingespeist, wobei das Gesamtmodell insbesondere eine Modellierung der Stellelemente 5 sowie bevorzugt weiterer Stellgrößen und/oder physikalischer Zielgrößen der Brennkraftmaschine 1 umfasst. Bevorzugt weist das Gesamtmodell 27 einen mathematischen Hyperraum auf, der durch physikalische Zielgrößen und Stellgrößen der Brennkraftmaschine 1 aufgespannt ist. In Abhängigkeit der Eingangsgrößen, nämlich der Leistungsanforderung 13, der Anforderungen 15 und des Zustands der Brennkraftmaschine 1, welcher durch das Bestimmungselement 25 ermittelt wird, wird mittels des Gesamtmodells 27 eine Vielzahl aktueller physikalischer Zielgrößen, wie beispielsweise eine Rußemission, eine Stickoxidemission, ein Verbrauch, ein Spitzendruck, eine Turbolader-Drehzahl oder andere physikalische Zielgrößen der Brennkraftmaschine 1 im aktuellen Zustand. Die Ergebnisse der Berechnung des Gesamtmodells 27 werden dann einem Auswertungsschritt 29 unterworfen, welcher insbesondere anhand der Leistungsanforderung 13 und der Anforderungen 15 bestimmte Gütemaße und/oder Begrenzungen auswertet. Das Ergebnis des Auswertungsschritts 29 wird dann einem Berechnungsschritt 31 zugeführt, welcher vorzugsweise den Gütemaßen und/oder Begrenzungen zugeordnete Rechenoperationen aufweist, die insbesondere auf dem Hyperraum des Gesamtmodells 27 durchführbar sind. Insbesondere ist in dem Berechnungsschritt 31 bevorzugt ein nicht-lineares numerisches Optimierungs- und/oder Minimierungsverfahren, beispielsweise ein Gradientenabstieg, durchführbar, wobei aus der Berechnung neue, in Hinblick auf die Gütemaße und/oder Begrenzungen verbesserte Stellgrößenwerte zur Ansteuerung der Stellelemente 5 resultieren. Diese neuen Stellgrößenwerte werden – wie rechts in Figur 5 dargestellt – den Stellelementen 5 – entweder direkt oder über Regel- oder Einstelleinrichtungen – zur Ansteuerung zugeführt. Zugleich werden die neu berechneten Stellgrößenwerte dem Gesamtmodell 27 zur Auswertung übergeben, welches auf der Grundlage der neuen Stellgrößenwerte wiederum physikalische Zielgrößen berechnet, die dann in dem Auswertungsschritt 29 in Hinblick auf die Gütemaße und/oder Begrenzungen ausgewertet werden können.

Die hier aufgezeigten Schritte werden vorzugsweise iterativ und besonders bevorzugt permanent während des Betriebs der Brennkraftmaschine 1 durchgeführt, sodass letztlich eine Optimierung der Stellgrößenwerte zur Ansteuerung der Stellelemente 5 durch das Gesamtmodell 27 erfolgt.

Auf diese Weise ist im Rahmen des Verfahrens die Verwendung eines detaillierten, dynamischen Motormodells, nämlich des Gesamtmodells 27, möglich, wobei eine Stellerdynamik und/oder Stellereigenschaften der Stellelemente 5 berücksichtigt werden können. Das Gesamtmodell 27 umfasst bevorzugt alle Größen, die begrenzt und/oder optimiert werden sollen. Es ist so ein

5 numerisches Optimierungsverfahren auf dem Steuergerät 3 umsetzbar. Dieses kann insbesondere auf einem Gradientenabstieg beruhen. Dabei ist das Verhalten der Brennkraftmaschine 1 anhand des Gesamtmodells 27 in Abhängigkeit von den Vorgabewerten für die Stellelemente 5 berechenbar, und es werden Gütefunktionen ausgewertet, deren Wert beispielsweise minimiert werden soll. Dabei kann es sich beispielsweise um einen spezifischen Verbrauch der

10 Brennkraftmaschine handeln. Ebenfalls können Begrenzungen berücksichtigt werden, beispielsweise maximale Stellgrößenwerte, ein Spitzendruck für einen Brennraum der Brennkraftmaschine 1 sowie andere Begrenzungen. Unter Berücksichtigung der Begrenzungen einzelner Größen ist die Bestimmung einer Abstiegsrichtung durch Gradientenbildung möglich. Die so ermittelten, für die aktuelle Betriebssituation optimalen Stellgrößen werden auf das reale

15 System der Brennkraftmaschine 1, hier konkret auf die Stellelemente 5, aufgeschaltet.

Fig. 6 zeigt eine schematische Darstellung eines Verfahrens zum Betreiben einer Brennkraftmaschine 1 gemäß dem Stand der Technik. Das Verfahren wird bevorzugt in einem Steuergerät 3 der Brennkraftmaschine durchgeführt. Dabei ist in einem mittleren Bereich der

Figur zu erkennen, dass insbesondere ein Drehmoment M oder eine Lastanforderung, eine

20 Drehzahl n sowie ein Vektor aus Umwelteinflüssen, der auch als Umweltvektor z bezeichnet wird, herangezogen werden, um aus abhängig von diesen und/oder anderen Eingangsgrößen aufgespannten Normkennfeldern 33 Normwerte für verschiedene Stellgrößen der Brennkraftmaschine 1 auszulesen. Diese Stellgrößen umfassen beispielsweise einen

Spritzbeginn, eine Abgasrückführrate, einen Ladedruck und/oder einen Hochdruck in einem Rail

25 einer Common-Rail-Einspritzeinrichtung. Diese Aufzählung ist nicht abschließend, wobei insbesondere weitere Stellgrößen hinzutreten oder allgemein eine andere Auswahl von Stellgrößen berücksichtigt werden kann. Die Normwerte der Stellgrößen werden zu einem Normvektor u_{norm} zusammengefasst. Der Umweltvektor z kann beispielsweise Größen wie eine

Höhe, in der die Brennkraftmaschine 1 betrieben wird und/oder einen äußeren Luftdruck, eine

30 Temperatur, bei welcher die Brennkraftmaschine 1 betrieben wird, und/oder andere Betriebsbedingungen umfassen.

Die aus den Normkennfeldern 33 ausgelesenen Normwerte sind nur dann für einen optimalen Betrieb der Brennkraftmaschine 1 geeignet, wenn diese unter Normbedingungen betrieben wird.

Abweichungen von den Normbedingungen werden durch Korrekturkennfelder 35 berücksichtigt, die ebenfalls insbesondere abhängig von dem Umweltvektor z ausgelesen werden. Zusätzlich oder alternativ ist es möglich, dass Korrekturkennfelder 35 in Abhängigkeit von anderen oder weiteren Bedingungen, beispielsweise Alterungszuständen von Komponenten der

5 Brennkraftmaschine 1, ausgelesen werden. Die aus den Korrekturkennfeldern 35 ausgelesenen Korrekturwerte werden in einer Summationsstelle 37 zu den Normwerten addiert, woraus ein korrigierter Stellgrößenvektor u resultiert. Dabei entspricht jede Komponente des Stellgrößenvektors u einer Stellgröße, wobei hier jeder Stellgröße ein separater Regler 39 zugeordnet ist, dem die entsprechende Komponente des Stellgrößenvektors u als Sollwert

10 übergeben wird. Die Ausgangswerte der Regler 39 wirken auf ein System von Stellelementen 41, mit denen die Brennkraftmaschine 1 betrieben wird. Diese weist eine Mehrzahl von Sensoren auf, beispielsweise einen Drehzahlsensor zur Erfassung der Drehzahl n sowie typischerweise weitere Sensoren, wobei abhängig von der Ansteuerung der Stellelemente 41 ein Messvektor x aus Messwerten resultiert, welche an der Brennkraftmaschine 1 gemessen werden. Der

15 Messvektor x umfasst dabei insbesondere auch physikalische Zielgrößen der Brennkraftmaschine 1 wie beispielsweise eine Stickoxidkonzentration im Abgas oder das Drehmoment M oder eine Lastanforderung. Auch ein Momentanverbrauch an Brennstoff kann von dem Messvektor x umfasst sein. Dabei ist es möglich, dass nicht nur Messwerte realer Sensoren berücksichtigt werden, sondern dass auch sogenannte virtuelle Sensoren definiert sind,

20 die aus Mess- und/oder Stellgrößen der Brennkraftmaschine 1 mithilfe eines Modells bestimmte physikalische Zielgrößen der Brennkraftmaschine 1 berechnen, ohne dass diese direkt gemessen würden. Insbesondere ist es möglich, dass der momentane Verbrauch der Brennkraftmaschine 1 mithilfe eines solchen virtuellen Sensors berechnet wird. Komponenten des Messvektors x können zugleich Komponenten des Umweltvektors z sein, sodass diese dann wieder in die

25 Regelung der Brennkraftmaschine 1 eingehen.

Es zeigt sich, dass es zur Regelung der Brennkraftmaschine 1 für jede Stellgröße einer Vielzahl von Korrekturkennfeldern 35 bedarf, die nicht nur abhängig von verschiedenen Werten des Umweltvektors z sondern auch abhängig von einem Betriebspunkt der Brennkraftmaschine 1 bedatet sind. Dabei werden die Korrekturkennfelder 35 für jede Stellgröße separat bedatet,

30 sodass physikalische Zusammenhänge und Quereinflussungen höchstens durch entsprechende, betriebspunktabhängige Bedatung der einzelnen Korrekturkennfelder 35 berücksichtigt werden können. Diese Vorgehensweise ist äußerst fehleranfällig und kompliziert. Auch können Anforderungen an die Brennkraftmaschine 1, beispielsweise gesetzliche Emissionsgrenzwerte,

lediglich über eine hochkomplexe Bedatung der Korrekturkennfelder 35 berücksichtigt werden. Dies ermöglicht keinen unmittelbaren Zugang zu solchen Anforderungen, sodass letztlich auch das Verhalten der Brennkraftmaschine 1 bei Abweichungen von vorgegebenen Sollwerten kaum vorhersagbar ist.

- 5 **Fig. 7** zeigt eine schematische Darstellung einer Abbildung A zwischen einer Mehrzahl von physikalischen Zielgrößen sowie einer Mehrzahl von Stellgrößen der Brennkraftmaschine 1, welche in einer Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Verfahrens zum Betreiben der Brennkraftmaschine 1 verwendet werden kann.

- 10 Dabei ist links in Figur 7 ein Eingangsraum U dargestellt, der hier beispielhaft durch drei Stellgrößen, nämlich eine Klappenposition AGR einer Abgasrückführklappe, einen Ladedruck p_L und einen Spritzbeginn BOI aufgespannt wird. Der Eingangsraum U wird vorzugsweise von einer größeren Zahl von Stellgrößen aufgespannt, deren Zahl hier lediglich der besseren Darstellbarkeit wegen auf drei begrenzt ist.

- 15 Als weitere Größen können in den Eingangsraum U Umweltbedingungen, beispielsweise eine Höhe und/oder eine Temperatur, in beziehungsweise bei der die Brennkraftmaschine 1 betrieben wird, eingehen. Auch Alterungseinflüsse, beispielsweise ein Alterung von Injektoren oder Abgasnachbehandlungssystemen der Brennkraftmaschine 1, können in dem Hyperraum berücksichtigt werden.

- 20 In Figur 7 rechts ist ein Zielraum oder Ausgangsraum X dargestellt, der von physikalischen Zielgrößen der Brennkraftmaschine 1, hier von einer Stickoxidkonzentration $[NO_x]$, einer Schwärzung SZ, das heißt einer Rußpartikelkonzentration im Abgas, und einem Verbrauch V_e der Brennkraftmaschine 1 aufgespannt wird. Auch der Ausgangsraum X wird bevorzugt von mehr als drei physikalischen Zielgrößen aufgespannt, wobei die Zahl der physikalischen Größen hier der besseren Darstellbarkeit wegen auf drei beschränkt ist. In dem Ausgangsraum X sind
25 Sollwerte für die Stickoxidemission, hier nämlich ein Sollwert $[NO_x]_S$, sowie für die Schwärzung SZ, nämlich ein Sollwert SZ_S , als Ebenen dargestellt, auf denen die den entsprechenden physikalischen Zielgrößen zugeordneten Basisvektoren senkrecht stehen. Die Sollwerte resultieren vorzugsweise aus gesetzlichen Vorgaben, die insbesondere unter Berücksichtigung eines Sicherheitsabstands einzuhalten sind. Dabei wird die Brennkraftmaschine 1 vorzugsweise
30 möglichst nah an den entsprechenden gesetzlichen Grenzwerten betrieben, um den

Wirkungsgrad nicht unnötig zu verringern. Ein Betriebspunkt der Brennkraftmaschine 1 wird daher vorzugsweise auf die vorgegebenen Sollwerte geregelt.

Ebenfalls in dem Ziel- oder Ausgangsraum X eingetragen ist eine Begrenzungsfläche 43, die einem maximalen Zylinderdruck der als Hubkolbenmotor ausgebildeten Brennkraftmaschine 1 entspricht. Diese Begrenzungsfläche 43 darf im Betrieb der Brennkraftmaschine 1 von einem Betriebspunkt nicht nach unten durchstoßen werden.

Es existiert eine Abbildung A zwischen dem Ziel- oder Ausgangsraum X und dem Eingangsraum U, welche hier durch einen Doppelpfeil dargestellt ist. Insbesondere sind die physikalischen Zielgrößen des Ausgangsraums X mittels der Abbildung A als Funktionen der Stellgrößen des Eingangsraum U darstellbar. Vermittelt über die Abbildung A ist es insbesondere auch möglich, die Stellgrößen des Eingangsraums U sowie die physikalischen Zielgrößen des Ausgangsraums X gemeinsam in einem durch alle diese Größen aufgespannten Hyperraum darzustellen, auf welchem die Abbildung A definiert ist.

Sowohl in dem Eingangsraum U als auch in dem Ausgangsraum X ist ein Betriebspunkt 45, 45' der Brennkraftmaschine 1 eingetragen, der nicht optimal ist, wobei insbesondere die Sollwerte $[\text{NO}_x]_S$ für die Stickoxidemissionen und SZ_S für die Schwärzung überschritten werden, wobei jedoch die Begrenzungsfläche 43 für den maximalen Zylinderdruck nicht in die unzulässige Richtung überschritten ist. Im Rahmen des Verfahrens wird der Betriebspunkt 45 der Brennkraftmaschine 1 insbesondere durch Wahl entsprechender Korrekturvektoren in dem Eingangsraum U so verschoben, dass die in dem Ausgangsraum X definierten Bedingungen erfüllt sind. Dabei zeigt sich, dass ein anzustrebender Betriebspunkt bevorzugt auf einer Schnittlinie SL der durch die Sollwerte $[\text{NO}_x]_S$ und SZ_S definierten Ebenen liegt. Dabei liegt ein erster, zulässiger Betriebspunkt 47' zusätzlich genau auf der Begrenzungsfläche 43, während unzulässige Betriebspunkte existieren, welche unterhalb der Begrenzungsfläche 43 auf der Schnittlinie SL liegen. Beispielhaft ist hier ein unzulässiger Betriebspunkt 49' eingezeichnet. Es existieren auch weitere, zulässige Betriebspunkte, welche oberhalb der Begrenzungsfläche 43 auf der Schnittlinie SL liegen. Beispielhaft ist hier ein zweiter, zulässiger Betriebspunkt 51' eingezeichnet. Es zeigt sich damit, dass – gemäß der hier gewählten, vereinfachten Darstellung – jedenfalls noch ein weiterer Freiheitsgrad existiert, der beispielsweise für eine Verbrauchs- oder Kostenoptimierung im Betrieb der Brennkraftmaschine 1 herangezogen werden kann. Den Betriebspunkten 47', 51' in dem Ausgangsraum X entsprechen Betriebspunkte 47, 51 in dem Eingangsraum U, woraus insbesondere deutlich wird, dass die Wahl eines Korrekturvektors für

die Stellgrößen ebenfalls nicht eindeutig ist, um von dem nicht optimalen Betriebspunkt 45 zu einem optimierten und zugleich zulässigen Betriebspunkt 47, 51 zu gelangen. Auch dies zeigt, dass jedenfalls ein weiterer Freiheitsgrad existiert, der beispielsweise für eine Verbrauchs- oder Kostenoptimierung der Brennkraftmaschine 1 genutzt werden kann. Typischerweise existieren
 5 mehrere solche Freiheitsgrade in den tatsächlich vorliegenden Ein- und Ausgangsräumen U, X beziehungsweise dem Hyperraum der Brennkraftmaschine 1.

Fig. 8 zeigt eine schematische Darstellung einer Ausführungsform des Verfahrens anhand eines zweidimensionalen Diagramms. Das Diagramm ist – der einfacheren Darstellung wegen – aufgespannt durch zwei Stellgrößen der Brennkraftmaschine 1, nämlich eine erste Stellgröße u_1
 10 und eine zweite Stellgröße u_2 . In dem Diagramm eingetragen sind Höhenlinien einer Soll/Ist-Abweichung ΔG für eine physikalische Zielgröße G, die im Folgenden auch kurz als physikalische Größe G bezeichnet wird, für die eine Abbildung in einem durch die physikalische Größe G und die Stellgrößen u_1, u_2 aufgespannten Raum definiert ist. Die physikalische Größe G ist also eine Funktion der Stellgrößen u_1, u_2 , die in dem Diagramm von Figur 8 durch die dort
 15 eingetragenen Höhenlinien – bezogen auf einen Sollwert G_S – dargestellt ist. Bei der Größe G kann es sich beispielsweise um eine Stickoxidemission der Brennkraftmaschine 1 handeln.

Es wird im Folgenden angenommen, dass die physikalische Größe G auf den vorherbestimmten Sollwert G_S optimiert werden soll.

Die physikalische Größe G kann also als Funktion $G(u)$ des Stellgrößenvektors $u = (u_1, u_2)^T$
 20 ausgedrückt werden, wobei die Funktion $G(u)$ die wenigstens eine Abbildung des Verfahrens ist. Entsprechend ist es möglich, in dem Hyperraum der Abbildung, hier in dem durch die Größen G, u_1, u_2 aufgespannten Raum, den Gradienten $\text{grad}(G(u))$ zu bilden. Weiterhin ist es möglich, an jeder Stelle der Funktion $G(u)$ deren Abstand von dem Sollwert G_S zu bilden:

$$\Delta G(u) = G(u) - G_S \quad (1)$$

Es ist nun möglich, eine Regelung der physikalischen Größe $G(u)$ auf den Sollwert G_S zu realisieren, die sich folgendermaßen ausdrücken lässt:

$$\Delta u = K1 \sum \Delta G(u) \text{grad}_e(G(u)) \quad (2)$$

Dabei ist Δu ein mithilfe der Regelung zu bestimmende Korrekturvektor, K_1 ist ein insbesondere eine Regelverstärkung beschreibender Proportionalitätsfaktor, und die einzelnen Summanden unter der Summe beschreiben die jeweils in jedem Regelungsschritt zu berechnenden Korrekturterme, wobei $\Delta G(u)$ den Abstand des Wertes der Funktion $G(u)$ von dem Sollwert G_S – wie in Gleichung (1) ausgedrückt – beschreibt, wobei $\text{grad}_e(G(u))$ der Einheitsvektor des Gradienten $\text{grad}(G(u))$ ist. Durch die Verwendung des Einheitsvektors des Gradienten hängt die Schrittweite, nämlich die Länge des Korrekturwertes Δu , nicht von der Steilheit des Gradienten ab, vielmehr gibt der Gradient lediglich die Richtung des Korrekturvektors Δu vor. Die Schrittweite, mithin die Größe des Korrekturvektors, wird dagegen durch die Soll/Ist-Abweichung $\Delta G(u)$ bestimmt. Hierdurch erhöht sich die Stabilität der Regelung, wobei insbesondere mit steigender Annäherung an den Sollwert G_S kleinere Regelungsschritte durchgeführt werden. Wird der Sollwert G_S erreicht, verschwindet die Soll/Ist-Abweichung $\Delta G(u)$, sodass keine weiteren Korrekturterme auftreten.

In Gleichung (2) ist implizit angenommen, dass die Regelung mittels eines Proportionalreglers durchgeführt wird. Selbstverständlich ist es möglich, das hier beschriebene Grundprinzip der Regelung ebenso mittels eines Proportional-Integral-Reglers, eines Proportional-Integral-Differential-Reglers, oder mittels eines anders gearteten, geeigneten Reglers durchzuführen.

In Figur 8 ist ein erster Startpunkt S_1 eingezeichnet, wobei die Regelung in einem Endpunkt E_1 endet, wenn der in Gleichung (2) formulierte Gradientenabstieg realisiert wird. Dabei liegt der Sollwert G_S gerade bei $\Delta G = 0$, sodass der Endpunkt E_1 auf der entsprechenden Höhenlinie angeordnet ist. Startet die Regelung dagegen von einem ebenfalls eingezeichneten, zweiten Startpunkt S_2 , führt der Gradientenabstieg zu einem zweiten Endpunkt E_2 , der ebenfalls auf der Höhenlinie $\Delta G = 0$ liegt, jedoch an einer anderen Stelle in dem durch die Stellgrößen u_1, u_2 aufgespannten Diagramm. Somit zeigt sich, dass der zu erreichende Endpunkt durch die Regelung nicht eindeutig bestimmt ist, wobei entlang der den Sollwert G_S kennzeichnenden Höhenlinie $\Delta G = 0$ wenigstens ein Freiheitsgrad verbleibt, der für weitere Optimierungs- oder Minimierungsschritte genutzt werden kann. Hierauf wird im Folgenden noch näher eingegangen. Jedenfalls ist festzuhalten, dass bei dem in Gleichung (2) formulierten Regelungsalgorithmus der eingeregelter Endpunkt von dem Startpunkt, also dem Betriebspunkt der Brennkraftmaschine 1 abhängt, von dem ausgehend die Regelung startet. Im Übrigen wird hervorgehoben, dass mit Gleichung (2) ein Regelalgorithmus gegeben ist, mithilfe dessen die physikalische Größe G auf den Sollwert G_S optimiert wird.

Um die Stabilität der Regelung zu erhöhen, wird bevorzugt die Schrittweite, also die Größe der einzelnen Terme unter der Summe mit steigender Steilheit des Gradienten $\text{grad}(G(u))$ reduziert. Dies wird bevorzugt dadurch erreicht, dass jeder Summand durch einen Divisor geteilt wird, welcher gleich dem Betrag oder der Norm des Gradienten $\text{grad}(G(u))$ ist. Auf diese Weise wird
5 automatisch eine Reduzierung des Betrags der einzelnen Terme mit steigender Steilheit des Gradienten erreicht. Dabei wird bevorzugt eine sinnvolle Begrenzung, insbesondere eine Untergrenze für den Divisor vorgegeben, um eine Division durch Null und damit ein Ausufern der Schrittweite zu vermeiden.

Fig. 9a) zeigt eine schematische Detaildarstellung einer Ausführungsform des Verfahrens, hier
10 nämlich eine erste Regelstruktur 53 für eine physikalische Zielgröße oder kurz Größe G , beispielsweise für eine Stickoxidkonzentration im Abgas der Brennkraftmaschine. Als Eingangsgrößen gehen in die erste Regelstruktur 53 ein Sollwert G_S für die physikalische Größe G , ein Istwert G_I für die physikalische Größe G , und ein aktueller Stellgrößenvektor u ein. Der Sollwert G_S kann – beispielsweise anhand gesetzlicher Vorgaben – fest vorgegeben und/oder
15 betriebspunktabhängig definiert sein. In letzterem Fall wird er bevorzugt aus einem Kennfeld ausgelesen.

Der Istwert G_I wird vorzugsweise entweder direkt mittels eines geeigneten Sensors gemessen, oder – insbesondere durch ein Modell – auf der Grundlage der aktuellen Stellgrößen und/oder Messgrößen anderer Sensoren, welche nicht direkt die Größe G messen, ermittelt.

20 In einer Subtraktionsstelle 55 wird eine Soll/Ist-Abweichung $\Delta G(u)$ berechnet, wobei die Soll/Ist-Abweichung explizit oder implizit –nämlich insbesondere über den Istwert G_I – von dem aktuellen Stellgrößenvektor u abhängt. Insbesondere der Stellgrößenvektor u geht in eine Ermittlungsstruktur 57 ein, welche insbesondere ein Modell, vorzugsweise einen mehrdimensionalen Raum mit einer darauf definierten Abbildung der physikalischen Größe G in
25 Abhängigkeit von dem Stellgrößenvektor u , aufweist. Dabei ist es möglich, dass in die Ermittlungsstruktur 57 neben dem Stellgrößenvektor u auch Umwelt- oder Umgebungsbedingungen, und/oder Alterungseinflüsse der Brennkraftmaschine 1 eingehen.

Es ist möglich, dass das der Ermittlungsstruktur 57 zugrundeliegende Modell ein Gesamtmodell der Brennkraftmaschine 1 dargestellt, welches alle relevanten physikalischen Zielgrößen und
30 Stellgrößen berücksichtigt. Alternativ ist es aber auch möglich, dass die Ermittlungsstruktur 57 ein Teilmodell für die hier konkret betrachtete physikalische Größe G – und gegebenenfalls für

weitere physikalische Größen – aufweist, welches hier zur Berechnung der Größe G herangezogen wird. Jedenfalls weist die Ermittlungsstruktur 57 eine Abbildung zwischen dem Stellgrößenvektor u und der physikalischen Größe G auf, wobei die physikalische Größe G aus dem Stellgrößenvektor u berechenbar ist. In einem nächsten Schritt wird durch ein

- 5 Gradientenbildungselement 59 ein – vorzugsweise normierter – Gradient, mithin insbesondere der Einheitsvektor $\text{grad}_e(G(u))$ des Gradienten $\text{grad}(G(u))$ der Größe G gebildet. An diesen wird in einer Multiplikationsstelle 61 die Soll/Ist-Abweichung $\Delta G(u)$ heranmultipliziert, und das so erhaltene Produkt – welches gerade einem Term der Summe aus Gleichung (2) entspricht, wird einem Regler 63 zugeführt, der in Abhängigkeit von dem Produkt einen
- 10 Stellgrößenkorrekturvektor Δu_G zur Ausregelung der physikalischen Größe G berechnet. Dabei ist es möglich, dass es sich bei dem Regler 63 um einen Proportionalregler handelt, welcher insbesondere die in Gleichung (2) berücksichtigte Regelverstärkung K_1 aufweist. Bei dem Regler 63 kann es sich aber auch um jede andere Art von Regler handeln, beispielsweise um einen Proportional-Integral-Regler (PI-Regler) oder einen Proportional-Integral-Differential-
- 15 Regler (PID-Regler).

- Der Stellgrößenkorrekturvektor Δu_G wird – wie noch näher erläutert wird – bevorzugt auf einen Normvektor u_{norm} für die Stellgrößen angerechnet, wobei hieraus letztlich ein Stellgrößenwerte für die Stellgrößen umfassender Stellgrößenvektor u resultiert, mit dem die Brennkraftmaschine 1 beziehungsweise deren Stellelemente 41 angesteuert werden. Aus dieser Ansteuerung resultiert
- 20 wiederum ein neuer Istwert G_I der physikalischen Größe G , der – ebenso wie der aktuelle Stellgrößenvektor u – wiederum in die erste Regelstruktur 53 eingeht. Die Brennkraftmaschine 1, deren Stellelemente 41 sowie die zugehörige Sensorik bilden somit die Regelstrecke für den insgesamt mittels der ersten Regelstruktur 53 realisierten Regelkreis.

- Dabei ist die erste Regelstruktur 53 geeignet und eingerichtet, um die physikalische Größe G auf
- 25 den Sollwert G_S zu optimieren. Besonders bevorzugt wird mithilfe der ersten Regelstruktur 53 eine Stickoxid-Konzentration $[\text{NO}_x]$ im Abgas der Brennkraftmaschine 1 geregelt.

- Fig. 9b)** zeigt eine schematische Detaildarstellung einer weiteren Ausführungsform des Verfahrens. Gleiche und funktionsgleiche Elemente sind mit gleichen Bezugszeichen versehen, sodass insofern auf die vorangegangene Beschreibung verwiesen wird. Wie in Figur 9a) ist in
- 30 Figur 9b) eine Regelstruktur dargestellt, nämlich eine zweite Regelstruktur 65. Diese entspricht im Wesentlichen der ersten Regelstruktur 53 bis auf den Unterschied, dass der Istwert G_I für die physikalische Größe G hier durch die Ermittlungsstruktur 57 – insbesondere abhängig von dem

- Stellgrößenvektor u – berechnet wird. Es erfolgt also insbesondere eine modellbasierte Berechnung des Istwerts G_I . Dies ist beispielsweise dann sinnvoll, wenn keine Sensorik zur unmittelbaren Erfassung der zu regelnden oder zu steuernden physikalischen Größe G vorgesehen ist. Ein Beispiel für eine solche physikalische Größe ist typischerweise eine
- 5 Schwärzung, nämlich eine Partikelkonzentration im Abgas der Brennkraftmaschine 1, welche üblicherweise nicht unmittelbar gemessen wird. Die Schwärzung kann aber anhand eines Modells oder Teilmodells, nämlich einer Abbildung, mittels der Ermittlungsstruktur 57 insbesondere aus dem Stellgrößenvektor u und/oder aus Umwelteinflüssen sowie Alterungseinflüssen berechnet werden.
- 10 Damit zeigt sich insgesamt Folgendes: Die erste Regelstruktur 53 gemäß Figur 9a) wird bevorzugt insbesondere für physikalische Größen G verwendet, welche direkt messbar oder unabhängig von der Ermittlungsstruktur 57 erfass- oder ermittelbar sind. Hierbei kann es sich beispielsweise um eine Stickoxid-Konzentration im Abgas der Brennkraftmaschine 1 handeln, welche beispielsweise unmittelbar durch einen Stickoxid-Sensor messbar ist. Die zweite
- 15 Regelstruktur 65 gemäß Figur 9b) wird bevorzugt für solche physikalische Größen G verwendet, welche einer unmittelbaren Messung typischerweise nicht zugänglich sind, wobei es günstig ist, die Ermittlungsstruktur 57 und insbesondere die Abbildung zur Berechnung des Istwerts G_I heranzuziehen. Hierbei kann es sich beispielsweise um eine Schwärzung des Abgases der Brennkraftmaschine 1 handeln.
- 20 Unabhängig von der konkreten Wahl der Größe G wird diese vorzugsweise – insbesondere mittels einer der Regelstrukturen 53, 65 gemäß Gleichung (2) geregelt.

- Bevorzugt werden im Rahmen des Verfahrens mehr als eine physikalische Größe G geregelt, wobei Regelungsterme für verschiedene physikalische Größen G , beispielsweise für eine erste physikalische Größe G_1 und eine zweite physikalische Größe G_2 , einfach miteinander
- 25 superponiert werden können. Der Stellgrößenkorrekturvektor Δu ergibt sich dann als Summe der einzelnen Regelungsbeiträge gemäß der folgenden Gleichung:

$$\Delta u = K_1 \sum \Delta G_1(u) \operatorname{grad}_e(G_1(u)) + K_2 \sum \Delta G_2(u) \operatorname{grad}_e(G_2(u)) + \dots \quad (3)$$

- Es ist offensichtlich und durch drei Punkte hinter dem letzten Term angedeutet, dass Gleichung (3) auf eine beliebige Zahl zu regelnder physikalischer Größen G erweitert werden kann. In der
- 30 Formulierung von Gleichung (3) wird berücksichtigt, dass die physikalischen Größen G_1 , G_2 vorzugsweise von zwei verschiedenen Reglern geregelt werden, wobei es möglich ist, dass ein

erster Regler für die physikalische Größe G_1 eine erste Regelverstärkung K_1 aufweist, welche von einer Regelverstärkung K_2 eines zweiten Reglers für die zweite physikalische Größe G_2 verschieden ist. Selbstverständlich ist es auch möglich, dass die beiden Regelverstärkungen K_1 , K_2 gleich sind. Wie zuvor bereits in Gleichung (2) wird auch in der Formulierung von Gleichung (3) angenommen, dass die hier eingesetzten Regler als Proportional-Regler ausgebildet sind. Alternativ kann wenigstens einer der beiden Regler als Proportional-Integral-Regler, als Proportional-Integral-Differential-Regler, oder in anderer geeigneter Weise ausgebildet sein.

Die zu regelnden physikalischen Größen G können sämtlich mittels der ersten Regelstruktur 53 oder sämtlich mittels der zweiten Regelstruktur 65 geregelt werden, es ist aber auch möglich, dass wenigstens eine physikalische Größe G mittels der ersten Regelstruktur 53 geregelt wird, wobei wenigstens eine zweite physikalische Größe G mittels der zweiten Regelstruktur 65 geregelt wird.

Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel wird als erste physikalische Größe G_1 eine Stickoxid-Konzentration im Abgas der Brennkraftmaschine insbesondere mittels der ersten Regelstruktur 53 geregelt, wobei als zweite physikalische Größe G_2 eine Schwärzung des Abgases der Brennkraftmaschine 1 insbesondere mittels der zweiten Regelstruktur 65 geregelt wird.

Werden verschiedene Regelungen gemäß Gleichung (3) miteinander superponiert, führt dies dazu, dass ein Betriebspunkt der Brennkraftmaschine 1 in dem Hyperraum der physikalischen Zielgrößen und Stellgrößen auf einem gegebenenfalls mehrdimensionalen Schnittgebilde, beispielsweise einer Schnittlinie, einer Schnittfläche oder einer Schnitthyperfläche der einzelnen auszuregelnden Bedingungen, insbesondere der Sollwerte G_s , gehalten wird. Existieren auf diesem Schnittgebilde weitere Freiheitsgrade, können weitere Optimierungs- oder Minimierungsbedingungen sowie Begrenzungen berücksichtigt werden.

Fig. 10 zeigt eine schematische Detaildarstellung einer weiteren Ausführungsform des Verfahrens. Gleiche und funktionsgleiche Elemente sind mit gleichen Bezugszeichen versehen, sodass insofern auf die vorangegangene Beschreibung verwiesen wird. Insbesondere zeigt Figur 10 eine Einstellstruktur 67 zur Einstellung eines Extremalwerts für eine physikalische Zielgröße oder kurz Größe $G(u)$, die im Betrieb der Brennkraftmaschine 1 minimiert oder maximiert werden soll. Mithilfe der Einstellstruktur 67 ist es insbesondere möglich, eine Kostenfunktion

darzustellen, mithilfe derer ohne Regelkreis ein Optimierungsvektor zur Kostenreduzierung ermittelt wird. Bei der physikalischen Größe G kann es sich dabei insbesondere um einen Verbrauch der Brennkraftmaschine 1 an Brennstoff handeln, der insbesondere zusätzlich zu weiteren Regelungs- oder Einstellbedingungen optimiert beziehungsweise minimiert werden kann. Hierzu kann insbesondere die folgende Gleichung angesetzt werden:

$$\Delta u = K1 \sum \Delta G1(u) \text{grad}_e(G1(u)) + K2 \sum \Delta G2(u) \text{grad}_e(G2(u)) + K3 \text{grad}(G3(u)) \quad (4)$$

In Gleichung (4) tritt zu den Regelungstermen der Gleichung (3) noch der additive Optimierungsterm $K3 \text{grad}(G3)$ für die Einstellung der dritten physikalischen Größe G3 auf ein Extremum, beispielsweise zur Minimierung des Verbrauchs als dritte physikalische Größe G3.

- Da hierbei keine Regelung, sondern vielmehr bevorzugt nur eine Minimumsuche durchgeführt wird, entspricht hier der Faktor K3 vorzugsweise einem Gewichtungsfaktor, insbesondere um den Einstellterm relativ zu den vorangehenden Regelungstermen in Gleichung (4) gewichten zu können. Dabei wird nach Möglichkeit angestrebt, dass zunächst eine Ausregelung der Regelungsbedingungen erfolgt, wobei nach Ausregelung derselben ein Betriebspunkt der Brennkraftmaschine in dem Hyperraum der physikalischen Zielgrößen und Stellgrößen, allgemein Betriebsgrößen genannt, durch den verbleibenden Einstellgradienten, beispielsweise den Verbrauchsgradienten, verschoben wird. Zugleich sorgen dabei die Regelungsterme für ein Verbleiben auf einer Äquipotentialfläche der ausgeregelten ersten und zweiten physikalischen Größen G1, G2.
- Die Einstellung der physikalischen Größe G gemäß Figur 10 auf ein Extremum erfolgt bevorzugt derart, dass mittels der Ermittlungsstruktur 57, in welche der Stellgrößenvektor u eingeht, die Größe G berechnet wird, wobei in dem Gradientenbildungselement 59 ein – hier vorzugsweise nicht normierter – Gradient der Größe G berechnet wird. Aus diesem Gradienten wird dann ein Stellgrößenkorrekturvektor Δu_G gebildet.
- Es ist ein Ausführungsbeispiel möglich, bei dem insbesondere mittels der ersten Regelstruktur 53 eine Stickoxid-Emission der Brennkraftmaschine 1 ausgeregelt wird, wobei insbesondere mittels der zweiten Regelstruktur 65 eine Schwärzung des Abgases der Brennkraftmaschine 1 ausgeregelt wird, wobei zugleich mittels der Einstellstruktur 67 ein Verbrauch der Brennkraftmaschine 1 an Brennstoff minimiert wird. Dabei wird der Betriebspunkt der Brennkraftmaschine 1 durch die Emissionsregler bevorzugt auf eine Äquipotentialfläche der ausgeregelten Emissionen in dem Hyperraum verschoben, wo er dann durch den

Verbrauchsgradienten verlagert wird, wobei zugleich die Emissionsregler für ein Verbleiben auf der Äquipotentialfläche sorgen.

Im Rahmen des Verfahrens wird bevorzugt auch eine Schutzfunktion für die Brennkraftmaschine 1 etabliert, insbesondere indem wenigstens eine physikalische Zielgröße oder kurz Größe G der Brennkraftmaschine 1 auf einen vorherbestimmten Grenzwert begrenzt wird. Hierzu existieren prinzipiell zwei Möglichkeiten: Zum einen ist es möglich, insbesondere mittels der Ermittlungsstruktur 57 messbare physikalische Größen zu beschränken, um eine Überschreitung vorherbestimmter Grenzwerte zu vermeiden. Beispielsweise ist es möglich, eine Laderdrehzahl zu beschränken, um zu vermeiden, dass ein Zylinderdruck einer als Hubkolbenmotor ausgebildeten Brennkraftmaschine einen vorherbestimmten Grenzwert übersteigt.

Alternativ oder zusätzlich ist es möglich, in analoger Weise zu den oben beschriebenen Regelstrukturen eine Regelstruktur zu schaffen, welche eine asymmetrische Regelung für eine zu begrenzende physikalische Größe G aufweist.

Fig. 11a) zeigt eine solche dritte Regelstruktur 69. Diese ist der ersten Regelstruktur 53 nachgebildet; es ist alternativ aber auch möglich, dass die dritte Regelstruktur 69 der zweiten Regelstruktur 65 nachgebildet ist. Gleiche und funktionsgleiche Elemente sind mit gleichen Bezugszeichen versehen, sodass insofern auf die vorangegangene Beschreibung verwiesen wird. Die dritte Regelstruktur 69 unterscheidet sich hier von der ersten Regelstruktur 53 dadurch, dass statt des Reglers 63 ein asymmetrischer Regler 71 verwendet wird, wobei in die dritte Regelstruktur 69 als Sollwert G_S ein Grenzwert eingeht, welcher nicht über- oder unterschritten werden darf. Der asymmetrische Regler 71 gibt als Ausgangswert für den Stellgrößenkorrekturvektor Δu_G den Nullvektor aus, solange die Regelabweichung ΔG in einem zulässigen Bereich bleibt. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn ein als Maximalwert vorgegebener Grenzwert unterschritten oder ein als Minimalwert vorgegebener Grenzwert überschritten wird. Wechselt dagegen die Regelabweichung ΔG das Vorzeichen in den entsprechenden, unzulässigen Bereich, gibt der asymmetrische Regler 71 einen von Null verschiedenen Stellgrößenkorrekturvektor Δu_G aus, der so gewählt ist, dass der Betriebspunkt der Brennkraftmaschine 1 in Richtung des zulässigen Bereichs gedrängt wird, wobei insbesondere der Istwert der physikalischen Größe G_I in den zulässigen Bereich gedrängt wird.

Dies ist schematisch in **Fig. 11b)** in einem Diagramm für einen Fall dargestellt, in welchem der vorherbestimmte Grenzwert G_S einen Maximalwert darstellt, welcher nicht überschritten werden

darf. Solange sich der Istwert G_I in dem zulässigen Bereich unterhalb des Grenzwerts G_S bewegt, ist die in der Subtraktionsstelle 55 berechnete Regelabweichung ΔG größer als Null, sodass der asymmetrische Regler 71 den Nullvektor ausgibt. Überschreitet dagegen der Istwert G_I den Grenzwert G_S , wird die Regelabweichung ΔG negativ, sodass ein von Null verschiedener

- 5 Stellgrößenkorrekturvektor Δu_G von dem asymmetrischen Regler 71 ausgegeben wird. Dabei ist in Figur 11b) angedeutet, dass die Regelverstärkung für den asymmetrischen Regler 71 vergleichsweise hoch gewählt wird, sodass sich eine vergleichsweise steile Abhängigkeit des Stellgrößenkorrekturvektors Δu_G von der Regelabweichung ΔG ergibt. Dies entspricht dem Schutzgedanken für die Brennkraftmaschine 1, gemäß welchem der Betriebspunkt der
- 10 Brennkraftmaschine möglichst zuverlässig und schnell von dem unzulässigen Bereich weggedrängt werden soll, wobei er jedenfalls die durch die Begrenzung definierte Hyperfläche in dem Hyperraum der Betriebsgrößen nicht oder nur kurzfristig durchstoßen darf.

- In dem hier beschriebenen Fall ist also ein Schutzregelkreis vorgesehen, der durch eine einseitige Übertragungsfunktion ausgestaltet ist. Dabei ist es möglich, dass die Ermittlungsstruktur 57 nun
- 15 entlang einer Hyperfläche, die einen Grenzwert für eine zu begrenzende physikalische Größe G beschreibt, ein Optimum und/oder ein Extremum für wenigstens eine andere physikalische Größe G sucht. Dabei kann die durch die Begrenzung definierte Grenzhyperfläche nicht oder nur kurzfristig durchstoßen werden.

- Die Stellgrößenkorrekturvektoren Δu_G , welche aus den verschiedenen Regelstrukturen
- 20 resultieren, werden gemäß den Gleichungen (3), (4) zu dem Stellgrößenkorrekturvektor Δu aufsummiert, also miteinander überlagert oder superponiert.

- Bei einer bevorzugten Ausführungsform des Verfahrens ist es möglich, dass die Ermittlungsstruktur 57 für jede auszuregelnde physikalische Größe G ein Teilmodell aufweist, welches die entsprechende physikalische Größe G in Abhängigkeit von dem Stellgrößenvektor u
- 25 sowie gegebenenfalls abhängig von Umwelt- und/oder Alterungseinflüssen modelliert. Das entsprechende Teilmodell stellt dann eine Abbildung zwischen der physikalischen Größe G und den Stellgrößen der Brennkraftmaschine 1, nämlich den Komponenten des Stellgrößenvektors u dar. Bei einem anderen Ausführungsbeispiel ist es möglich, dass die Ermittlungsstruktur 57 als Gesamtmodell ausgebildet ist, welches die Brennkraftmaschine 1 insgesamt und insbesondere
- 30 alle relevanten physikalischen Größen G derselben in Abhängigkeit von allen Stellgrößen, mithin von dem Stellgrößenvektor u , modelliert. In diesem Fall weist die Ermittlungsstruktur 57 in einheitlicher Weise, nämlich in Form des Gesamtmodells, eine Vielzahl von Abbildungen

oder eine Gesamtabbildung zwischen den verschiedenen physikalischen Größen G und dem Stellgrößenvektor u auf. Besonders bevorzugt weist die Ermittlungsstruktur 57 einen Hyperraum auf, der von allen Betriebsgrößen, nämlich den Stellgrößen und den physikalischen Größen G der Brennkraftmaschine 1, aufgespannt wird, wobei auf dem Hyperraum eine Abbildung oder eine Mehrzahl von Abbildungen zwischen den physikalischen Größen G und den Stellgrößen definiert ist/sind.

Fig. 12 zeigt eine schematische Darstellung einer weiteren Ausführungsform des Verfahrens.

Gleiche und funktionsgleiche Elemente sind mit gleichen Bezugszeichen versehen, sodass insofern auf die vorangegangene Beschreibung verwiesen wird. Bei dieser Ausführungsform des

Verfahrens werden abhängig von dem Drehmoment M oder einer Lastanforderung sowie der Drehzahl n der Brennkraftmaschine 1 aus einer Mehrzahl von Normkennfeldern 33 Normwerte für Stellgrößen ausgelesen, die hier in einem Normvektor u_{norm} zusammengefasst sind. Dabei können die Normkennfelder 33 beispielsweise ein Kennfeld für einen Spritzbeginn, ein Kennfeld für eine AGR-Klappenstellung, ein Kennfeld für einen Ladedruck und/oder ein Kennfeld für einen Hochdruck in einem Rail eines Common-Rail-Einspritzsystems umfassen. Es können weniger oder mehr Kennfelder 33 vorgesehen sein, auch weitere und/oder andere Kennfelder 33 können vorgesehen sein. Insofern ist die hier gegebene Aufzählung nicht abschließend zu verstehen, und die genannten Normkennfelder können in beliebiger Weise kombiniert werden. In der Summationsstelle 37 wird ein Stellgrößenkorrekturvektor $\Delta u'_{\text{ges}}$ auf den Normvektor u_{norm} addiert, woraus schließlich der Stellgrößenvektor u resultiert. Dieser wird – wie bereits in Zusammenhang mit Figur 6 erläutert – den Reglern 39 zugeführt, welche ihrerseits dann die Stellelemente 41 ansteuern. Der einfacheren Darstellung wegen sind hier die Regler 39 und die Stellelemente 41 in einem Kästchen zusammengefasst. Aus der entsprechenden Ansteuerung der Brennkraftmaschine 1 resultiert wiederum der Messvektor x , welcher beispielsweise die Drehzahl n und/oder das Drehmoment M umfassen kann, oder auch weitere Größen, welche gegebenenfalls wiederum als Eingangsgrößen in das Verfahren eingehen.

Es zeigt sich in Zusammenhang mit Figur 12, das bei der hier dargestellten, bevorzugten Ausführungsform des Verfahrens wenigstens eine physikalische Größe der Brennkraftmaschine 1 gesteuert oder geregelt wird, indem auf der Grundlage der von der Ermittlungsstruktur 57 umfassten wenigstens einen Abbildung Korrekturwerte für Stellgrößen der Brennkraftmaschine berechnet werden, nämlich hier der Stellgrößenkorrekturvektor $\Delta u'_{\text{ges}}$, wobei die Korrekturwerte auf Normwerte, hier nämlich den Normvektor u_{norm} für die Stellgrößen angerechnet werden. Es

zeigt sich weiterhin, dass mit den auf der Grundlage der Abbildung ermittelten Stellgrößenwerten, hier nämlich dem Stellgrößenvektor u , separate Regel- oder Einstelleinrichtung 39 für Stellelemente 41 angesteuert werden, wobei die Regel- oder Einstelleinrichtungen 39 den Stellgrößen zugeordnet sind.

- 5 Im Folgenden wird nun die Berechnung des Stellgrößenkorrekturvektors $\Delta u'_{\text{ges}}$ näher erläutert.

Der aktuelle Stellgrößenvektor u geht in wenigstens eine Regel- oder Einstellstruktur gemäß den Figuren 9 bis 11 ein. Bevorzugt gehen weitere Größen hier ein, insbesondere vorzugsweise ein Umweltvektor z , der Umgebungs- und/oder Alterungseinflüsse erfasst, das Drehmoment M oder die Lastanforderung, sowie die Drehzahl n der Brennkraftmaschine 1. Diese Informationen
10 können vorzugsweise neben dem Stellgrößenvektor u insbesondere in die Ermittlungsstruktur 57 eingehen und von dieser berücksichtigt werden. Dies wurde der einfacheren Darstellung wegen in den Figuren 9 bis 11 zunächst unberücksichtigt gelassen. Bei der dargestellten Ausführungsform sind hier zwei Regelstrukturen, nämlich eine erste Regelstruktur RG1 für eine erste physikalische Größe $G1$ und eine zweite Regelstruktur RG2 für eine zweite physikalische
15 Größe $G2$ vorgesehen. Es sind außerdem zwei Einstellstrukturen vorgesehen, nämlich eine erste Einstellstruktur EG3 für eine dritte physikalische Größe $G3$, sowie eine zweite Einstellstruktur EG4 für eine vierte physikalische Größe 4. Selbstverständlich ist es möglich, dass im Rahmen des Verfahrens mehr oder weniger Regel- und/oder Einstellstrukturen berücksichtigt werden. Die Regelstrukturen sind – insbesondere je nach der auszuregelnden physikalischen Größe – als erste
20 Regelstruktur 53 oder als zweite Regelstruktur 65 gemäß den Figuren 9a) und 9b) ausgebildet. Die Einstellstrukturen sind bevorzugt ausgebildet wie die in Figur 10 dargestellte Einstellstruktur 67.

Zusätzlich oder alternativ zu den hier dargestellten Regel- und Einstellstrukturen ist vorzugsweise eine Regelstruktur für eine weitere physikalische Größe vorgesehen, welche im
25 Sinne einer Schutzfunktion für die Brennkraftmaschine 1 begrenzt werden soll. Diese Regelstruktur ist dann vorzugsweise gemäß der dritten Regelstruktur 69 nach Figur 11 ausgebildet. Bei der weiteren physikalischen Größe kann es sich beispielsweise um einen Zylinderdruck der als Hubkolbenmotor ausgebildeten Brennkraftmaschine 1 handeln. Selbstverständlich sind weitere Regel-, Einstell- und/oder Begrenzungsstrukturen möglich.

30 Besonders bevorzugt wird eine Ausführungsform des Verfahrens, bei welcher als erste physikalische Größe $G1$ eine Stickoxid-Emission der Brennkraftmaschine 1, mithin eine

Stickoxidkonzentration im Abgas der Brennkraftmaschine 1, ausgeregelt wird, wobei in diesem Fall die erste Regelstruktur RG1 bevorzugt gemäß der ersten Regelstruktur 53 nach Figur 9a) ausgebildet ist. Als zweite physikalische Größe G2 wird vorzugsweise eine Schwärzung des Abgases der Brennkraftmaschine 1 ausgeregelt, wobei die zweite Regelstruktur RG2 bevorzugt ausgebildet ist wie die zweite Regelstruktur 65 gemäß Figur 9b). Als dritte physikalische Größe G3 wird vorzugsweise ein Verbrauch der Brennkraftmaschine an Brennstoff minimiert, wobei die erste Einstellstruktur EG3 bevorzugt ausgebildet ist wie die Einstellstruktur 67 gemäß Figur 10. Als vierte physikalische Größe G4 wird vorzugsweise eine Abgastemperatur der Brennkraftmaschine 1 auf einen Maximalwert maximiert, um einen Partikelfilter zu regenerieren. In diesem Fall ist die zweite Einstellstruktur EG4 ebenfalls ausgebildet wie die Einstellstruktur 67 gemäß Figur 10, nur dass hier statt einer Minimumsuche eine Maximumsuche durchgeführt wird. Alternativ ist es aber auch möglich, die Abgastemperatur zur Regeneration eines Partikelfilters auf einen Sollwert zu regeln, wobei dann anstelle der zweiten Einstellstruktur EG4 eine nicht dargestellte Regelstruktur RG4 zur Anwendung kommt, die insbesondere wie die erste Regelstruktur 53 oder wie die zweite Regelstruktur 65 ausgebildet ist.

Aus der ersten Regelstruktur RG1 resultiert hier ein Korrekturvektor Δu_{G1} , welcher einer Ausregelung der ersten physikalischen Größe G1 dient. Aus der zweiten Regelstruktur RG2 resultiert hier ein zweiter Korrekturvektor Δu_{G2} , welcher der Ausregelung der zweiten physikalischen Größe G2 dient. Aus der ersten Einstellstruktur EG3 resultiert hier ein dritter Korrekturvektor Δu_{G3} , welcher hier der Minimierung der dritten physikalischen Größe G3 dient. Aus der zweiten Einstellstruktur EG4 resultiert hier ein vierter Korrekturvektor Δu_{G4} , welcher in diesem Fall der Maximierung der vierten physikalischen Größe G4 dient. Entsprechend können aus weiteren oder anderen Regel- oder Einstellstrukturen weitere oder andere, bestimmten physikalischen Größen G zugeordnete Korrekturvektoren Δu_G resultieren.

Es zeigt sich hier, dass die beiden Einstellstrukturen EG3, EG4 einander in ihren Zielen widersprechen: Es ist nicht zugleich möglich, den Verbrauch der Brennkraftmaschine 1 an Brennstoff zu minimieren und die Abgastemperatur zu maximieren. Es ist daher bevorzugt eine Umschalteneinrichtung 73 vorgesehen, mithilfe derer wenigstens eine der Einstellstrukturen EG3, EG4 auf eine gemeinsame Addition der Korrekturvektoren aufgeschaltet werden kann, wobei die Umschalteneinrichtung 73 bevorzugt eingerichtet ist zum Umschalten zwischen der ersten Einstellstruktur EG3 und der zweiten Einstellstruktur EG4. Besonders bevorzugt ist die Umschalteneinrichtung 73 eingerichtet, um betriebspunktabhängig zwischen diesen

Einstellstrukturen EG3, EG4 umzuschalten. Dabei ist eine sequentielle Umschaltsteuerung mit weichen Übergängen nicht erforderlich, da durch die inkrementelle Anregelung im Rahmen des Verfahrens von selbst eine weiche Umschaltung erfolgt. Mittels der Umschalteinrichtung 73 ist es insbesondere möglich, zu verschiedenen Zeiten – vorzugsweise verschiedene – Bedingungen an verschiedene physikalische Zielgrößen G aufzustellen.

Wie bereits angedeutet, werden die verschiedenen, den einzelnen physikalischen Größen G zugeordneten Korrekturvektoren einander überlagert oder einander superponiert beziehungsweise miteinander addiert, sodass schließlich ein Gesamt-Stellgrößenkorrekturvektor Δu_{ges} resultiert. Es ist möglich, dass dieser direkt der Summationsstelle 37 zugeleitet wird.

- Bei der hier dargestellten Ausführungsform ist allerdings zusätzlich ein Beeinflussungselement 75 vorgesehen, in welches maximale Stellgrößen und/oder Stellgrößenanschlüge als Komponenten eines Stellgrößenbegrenzungsvektors u_{max} eingehen. Dabei werden die Komponenten des Korrekturvektors Δu_{ges} vorzugsweise bei Unterschreiten eines Minimalabstandes zu den entsprechenden Komponenten des Stellgrößenbegrenzungsvektors u_{max} in dieser Richtung beschnitten, zu Null gesetzt, oder mit einer kleinen Freifahrkomponente entgegen der Richtung der Stellgrößenbegrenzung beaufschlagt, um letztlich den Stellgrößenvektor u wieder von der entsprechenden Stellgrößenbegrenzung zu entfernen. Dabei wirkt sich in vorteilhafter Weise das Beeinflussungselement 75 auf den Gesamtkorrekturvektor Δu_{ges} aus, sodass das Beeinflussungselement 75 nur einmal vorgesehen sein muss, was eine erhebliche Vereinfachung im Vergleich zu einer Beeinflussung jeder einzelnen Komponente des Gesamtkorrekturvektors Δu_{ges} , mithin jeder einzelnen Stellgröße, bedeutet. Als Ergebnis resultiert aus dem Beeinflussungselement 75 der veränderte Gesamtkorrekturvektor $\Delta u'_{\text{ges}}$, der dann schließlich in die Summationsstelle 37 eingeht und dort zu dem Normvektor u_{norm} addiert wird. Mithilfe des Beeinflussungselements 75 werden also Stellelementanschlüge oder Stellgrößenbegrenzungen bei der Beeinflussung der Stellgrößen berücksichtigt.

Insgesamt zeigt sich, dass mithilfe des Verfahrens und insbesondere mittels der Ermittlungsstruktur 57 eine Betrachtung der physikalischen Kopplung einzelner Stellgrößen möglich ist, sodass ein verbessertes Verhalten des Gesamtsystems der Brennkraftmaschine 1 einschließlich deren Abgasnachbehandlungssystem erreicht werden kann. Abweichungen im Sollverhalten können durch übergeordnete Betrachtung des Gesamtsystems über weitere Bereiche ausgeglichen werden. Ebenso können Veränderungen in den Umweltbedingungen über weitere Bereiche ausgeglichen werden, und es kann zumindest in bestimmten Betriebsbereichen

ein Verbrauchsvorteil erreicht werden. Durch die übergeordnete Betrachtung und die koordinierte Regelung des Systems können gegebenenfalls Alterungsreserven und Sicherheitsabstände zu einzuhaltenden Grenzwerten oder Sicherheitsaufschläge zu bestimmten Komponenten, beispielsweise in Bezug auf ein Katalysatorvolumen, geringer gehalten werden.

- 5 Katalysatoren lassen sich demnach kleiner auslegen, da bei Erreichen ihrer Grenzumsatzrate ein geringerer Emissionsbereich für die Brennkraftmaschine 1 eingeregelt werden kann, sodass ein Katalysator nicht mehr an seiner Grenz-Umsatzrate und damit in einer Begrenzung gefahren wird, sondern wiederum Stell- oder Regelreserve aufweist. Auf diese Weise wird der Katalysator freigefahren.

ANSPRÜCHE

1. Verfahren zum Betreiben einer Brennkraftmaschine (1), wobei
 - zur Steuerung oder Regelung der Brennkraftmaschine (1) wenigstens eine Abbildung (A) verwendet wird, welche
- 5
 - wenigstens eine physikalische Zielgröße (G) der Brennkraftmaschine (1) in Abhängigkeit von einer Mehrzahl von Stellgrößen (u) der Brennkraftmaschine (1) beschreibt, wobei
 - wenigstens eine Bedingung für die wenigstens eine physikalische Zielgröße (G) aufgestellt wird, wobei
 - in Echtzeit anhand der Abbildung (A) Stellgrößenwerte für die Stellgrößen (u) ermittelt
- 10
 - werden, mit denen die wenigstens eine Bedingung durch die wenigstens eine physikalische Zielgröße (A) erfüllt ist, wobei
 - die Brennkraftmaschine (1) mit den derart ermittelten Stellgrößenwerten angesteuert wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die wenigstens eine
- 15
 - physikalische Zielgröße (G) ausgewählt ist aus einer Gruppe bestehend aus einer Stickoxid-Konzentration im Abgas, einer Ruß-Konzentration im Abgas, einem Spitzendruck in einem Brennraum der Brennkraftmaschine, einem Abgasmassenstrom, einer Abgastemperatur, einem abgegebenen Moment der Brennkraftmaschine, und einem Brennstoffverbrauch.
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die
- 20
 - Stellgrößen (u) ausgewählt sind aus einer Gruppe bestehend aus einem Ladedruck, einer Ladeluft-Temperatur, einer Drehzahl, einem Verbrennungsluft-Brennstoff-Verhältnis, einer Abgasrückführrate, einem Spritzbeginn, einer einem Brennraum der Brennkraftmaschine zugeführten Brennstoffmenge, einer Anzahl befeuerter Brennräume der Brennkraftmaschine, einem Raildruck, und einer Dosiermenge an Reduktionsmittel in einen Abgasstrom.
- 25 4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Abbildung (A) verwendet wird, die ausgewählt ist aus einer Gruppe bestehend aus einer physikalischen oder thermodynamischen Funktion, einer approximativen mathematischen Funktion, insbesondere einem Polynom, einer Exponentialfunktion oder einer Vibe-Funktion

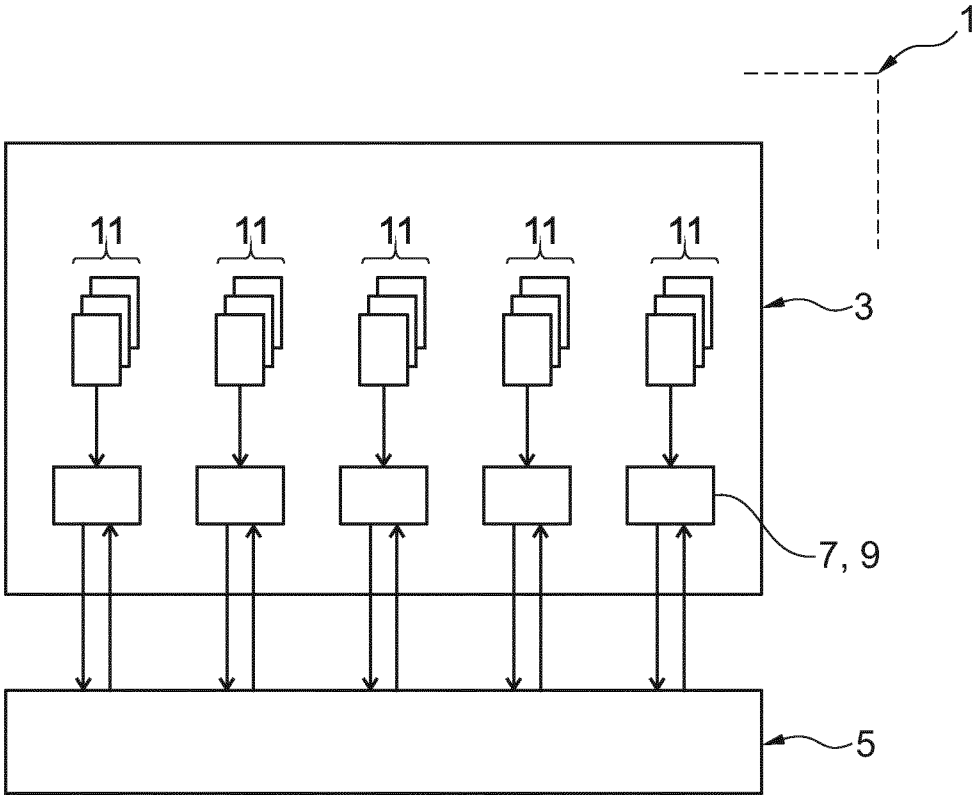
oder einer Mehrzahl von Vibe-Funktionen, einem statistischen Modell, einer Lookup-Tabelle, und einem neuronalen Netz.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Mehrzahl von Bedingungen an eine Mehrzahl von physikalischen Zielgrößen (G) gleichzeitig durch Ermitteln von geeigneten Stellgrößenwerten erfüllt wird.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die wenigstens eine Bedingung ausgewählt ist aus einer Gruppe bestehend aus der Vorgabe eines Sollwerts, dem Einhalten eines Grenzwerts, und dem Aufsuchen eines Extremums.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die wenigstens eine Bedingung als Gütemaß aufgestellt wird, wobei das Gütemaß in Echtzeit – vorzugsweise unter wenigstens einer Nebenbedingung – optimiert wird.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die wenigstens eine Abbildung (A) auf einem mehrdimensionalen Raum definiert ist, wobei die Stellgrößenwerte zur Erfüllung der wenigstens einen Bedingung durch Gradientenbildung in dem mehrdimensionalen Raum berechnet werden.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass zu verschiedenen Zeiten Bedingungen an verschiedene physikalische Zielgrößen (G) aufgestellt werden.
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die wenigstens eine Bedingung an die wenigstens eine physikalische Zielgröße (A) bei einem Ausfall eines einer Stellgröße (u) zugeordneten Stellelements (5) durch Anpassen der Stellgrößenwerte für die übrigen Stellgrößen (u) erfüllt wird, wobei vorzugsweise wenigstens eine Bedingung einer Mehrzahl von Bedingungen an eine Mehrzahl von physikalischen Zielgrößen (G) aufgegeben wird.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass als Stellgrößenwerte Sollwerte für separate Regel- oder Einstelleinrichtungen (7) berechnet werden, wobei die separaten Regel- oder Einstelleinrichtungen (7) den Stellgrößen (u) jeweils zugeordnet sind.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass als Stellgrößenwerte Stellwerte berechnet werden, welche direkt zur Ansteuerung von den Stellgrößen (u) zugeordneten Stellelementen (5) verwendet werden.

5 13. Steuereinrichtung für eine Brennkraftmaschine (1), **dadurch gekennzeichnet**, dass die Steuereinrichtung eingerichtet ist zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 12.

14. Brennkraftmaschine (1), **gekennzeichnet durch** eine Steuereinrichtung nach Anspruch 13.



Stand der Technik

Fig. 1

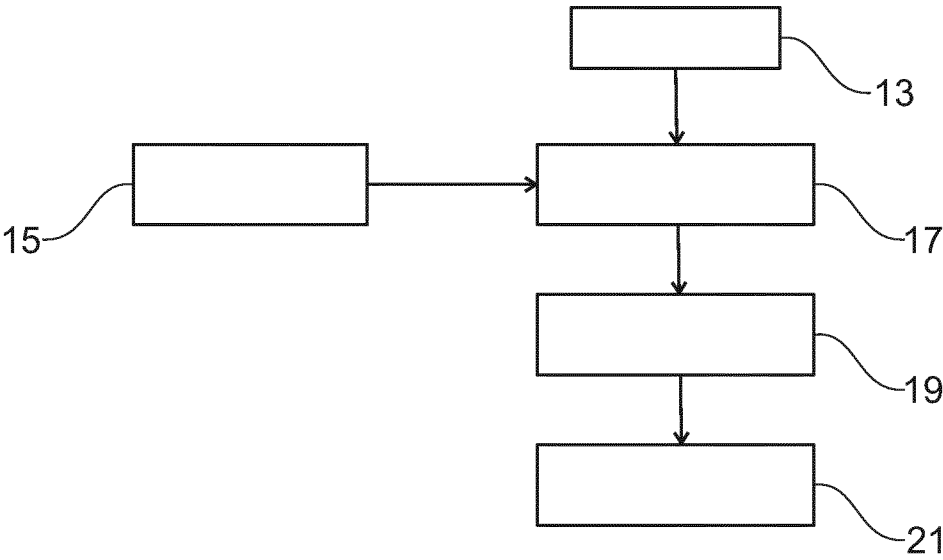


Fig. 2

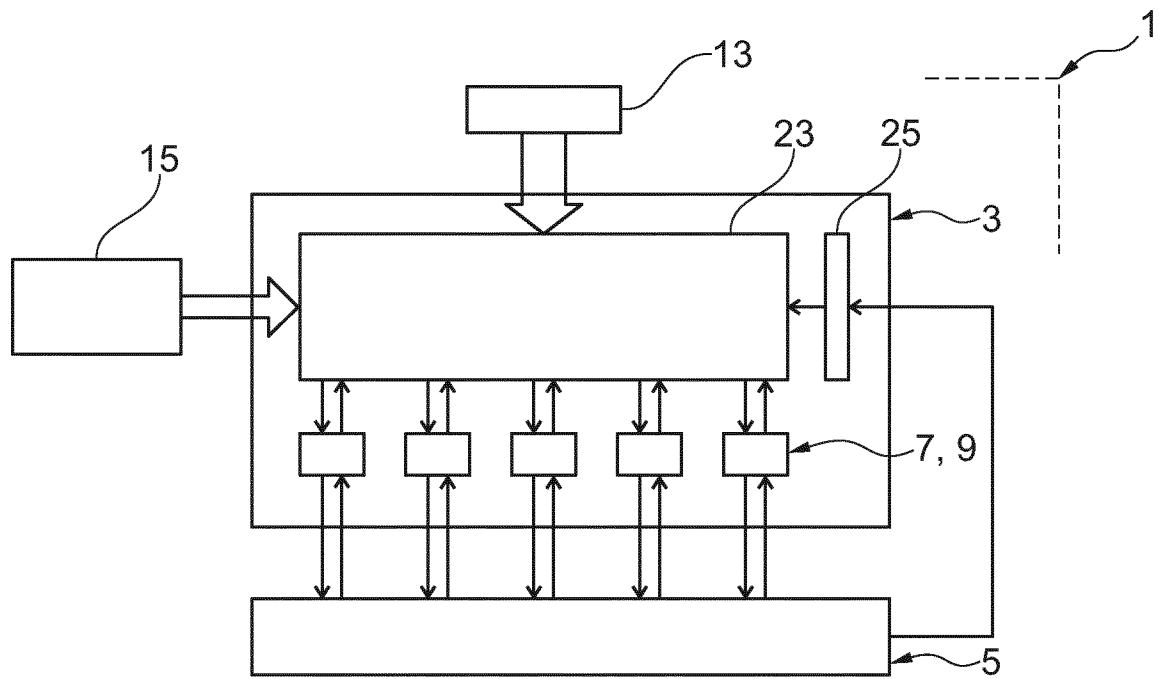


Fig. 3

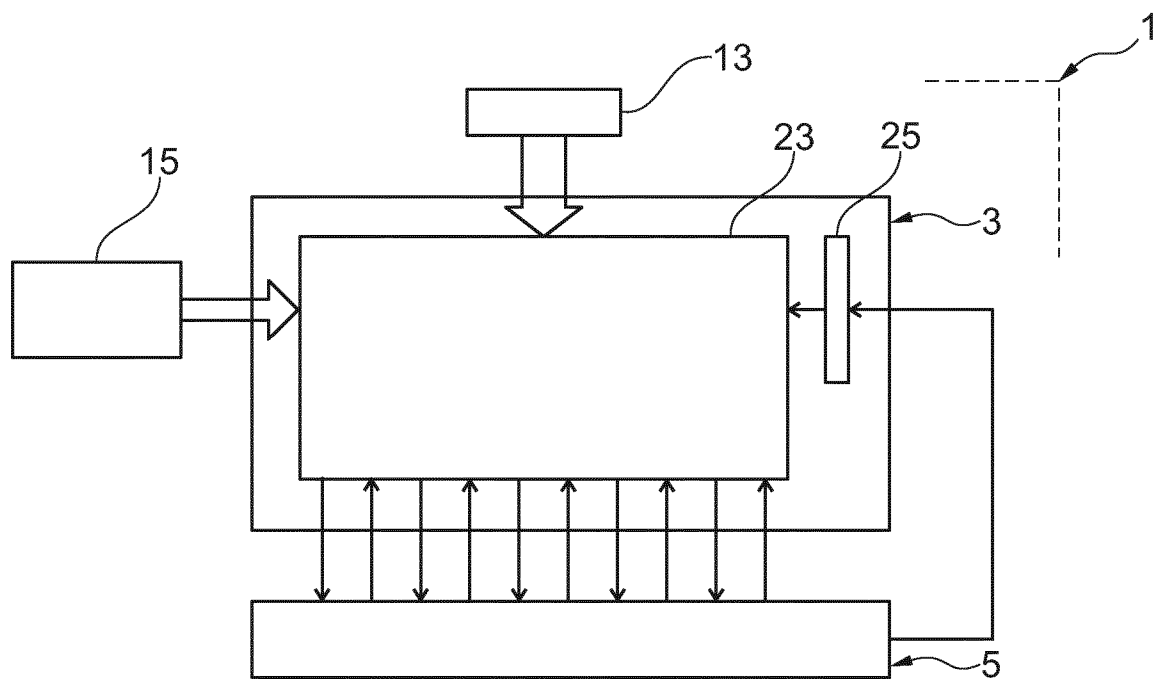


Fig. 4

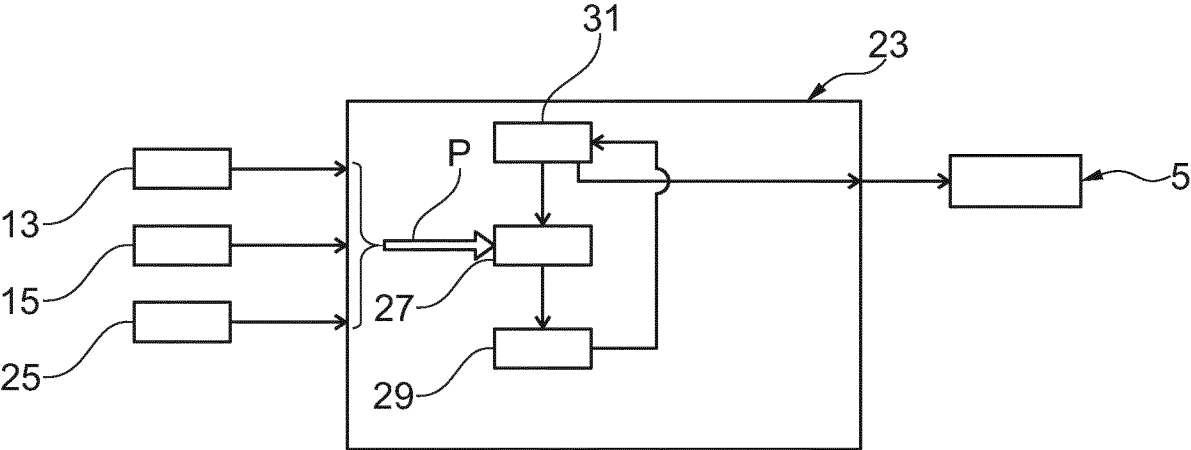
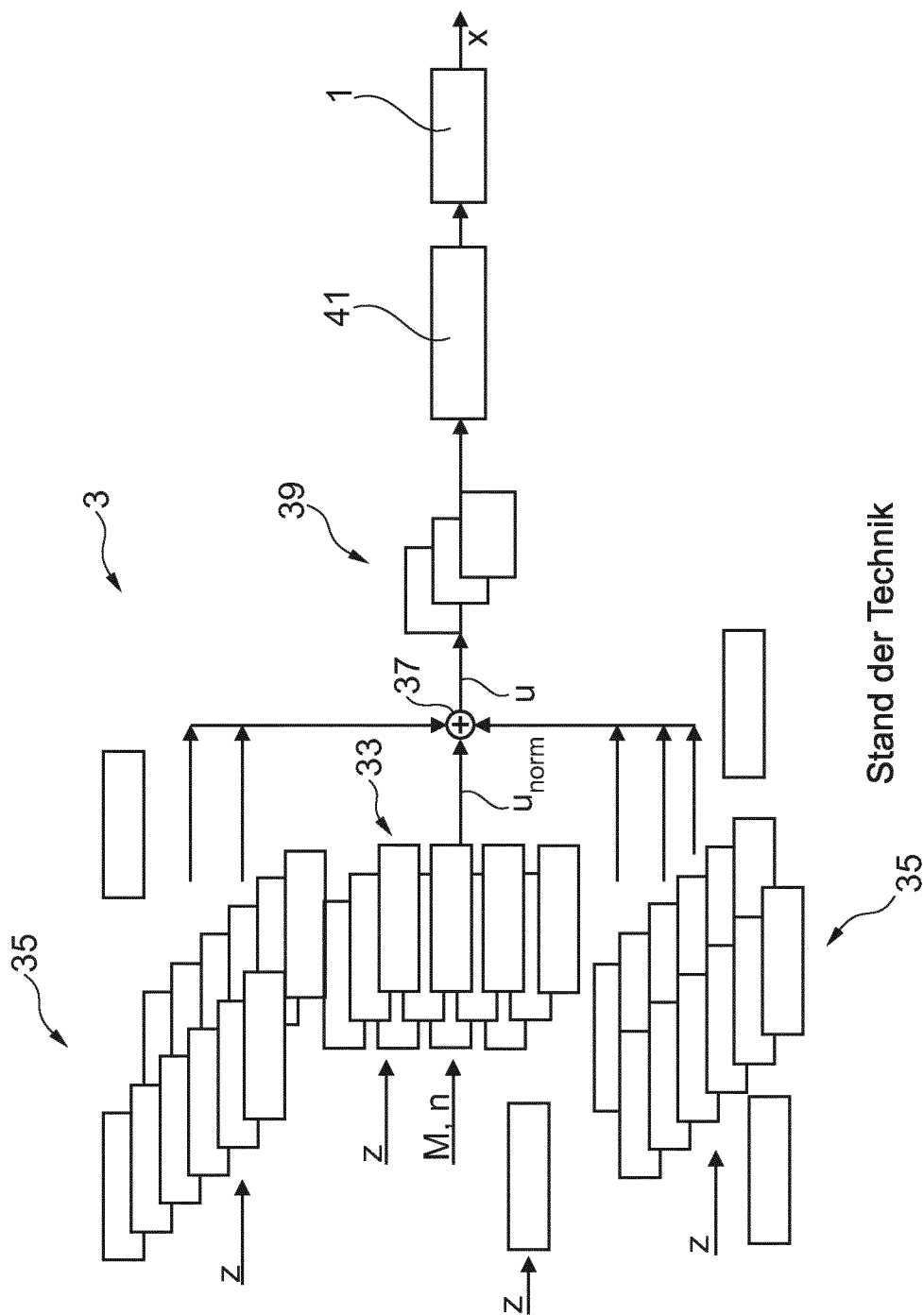


Fig. 5



Stand der Technik

Fig. 6

5/7

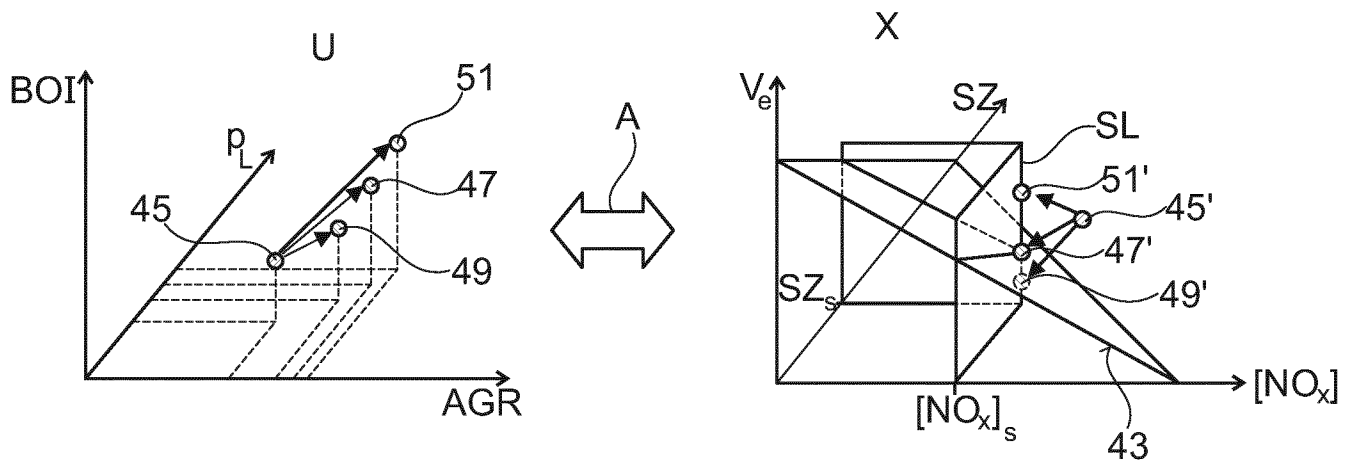


Fig. 7

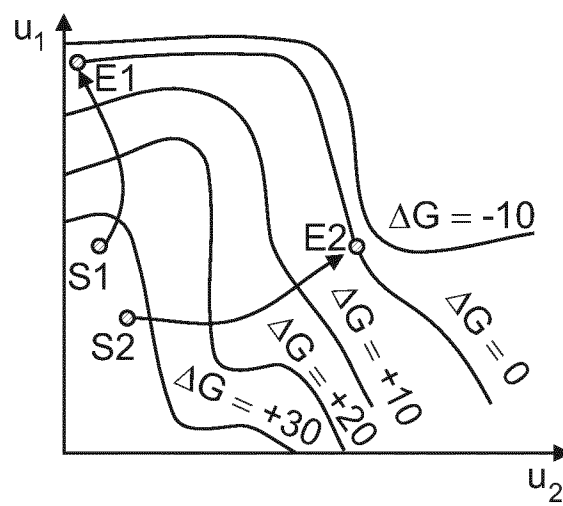


Fig. 8

6/7

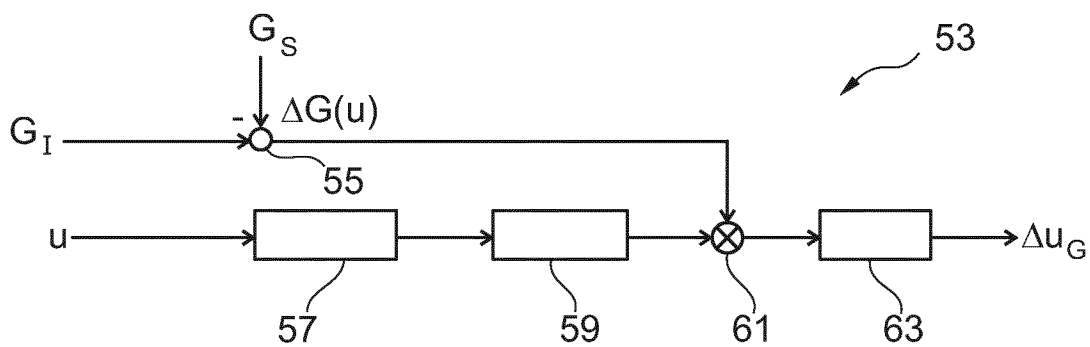


Fig. 9a)

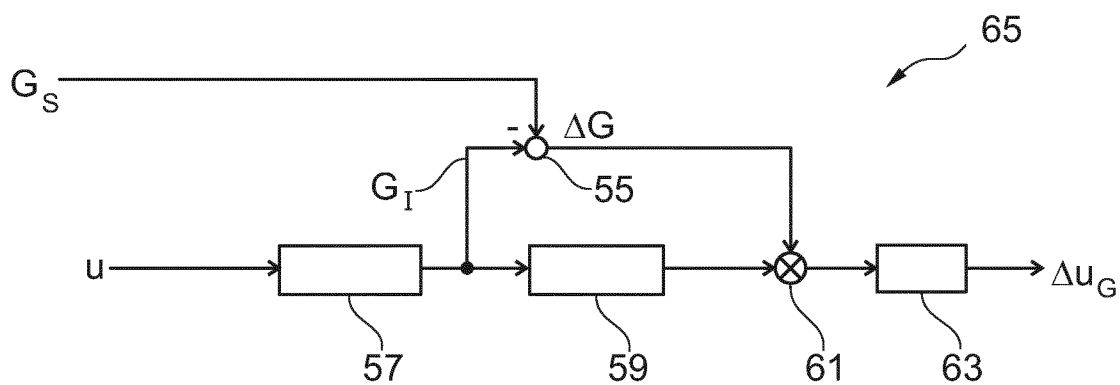


Fig. 9b)

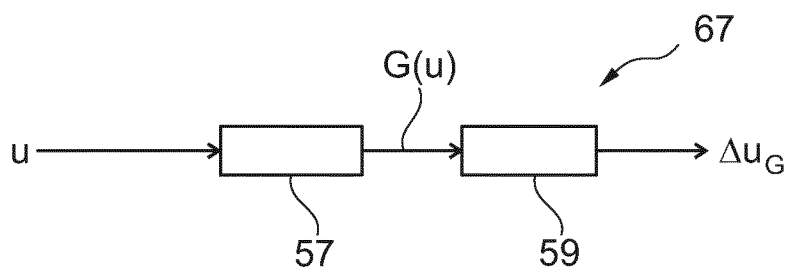


Fig. 10

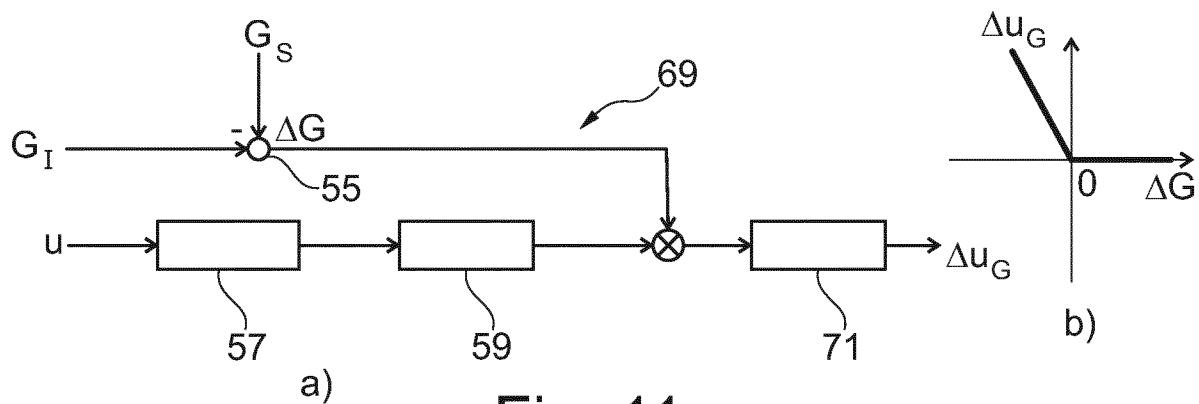


Fig. 11

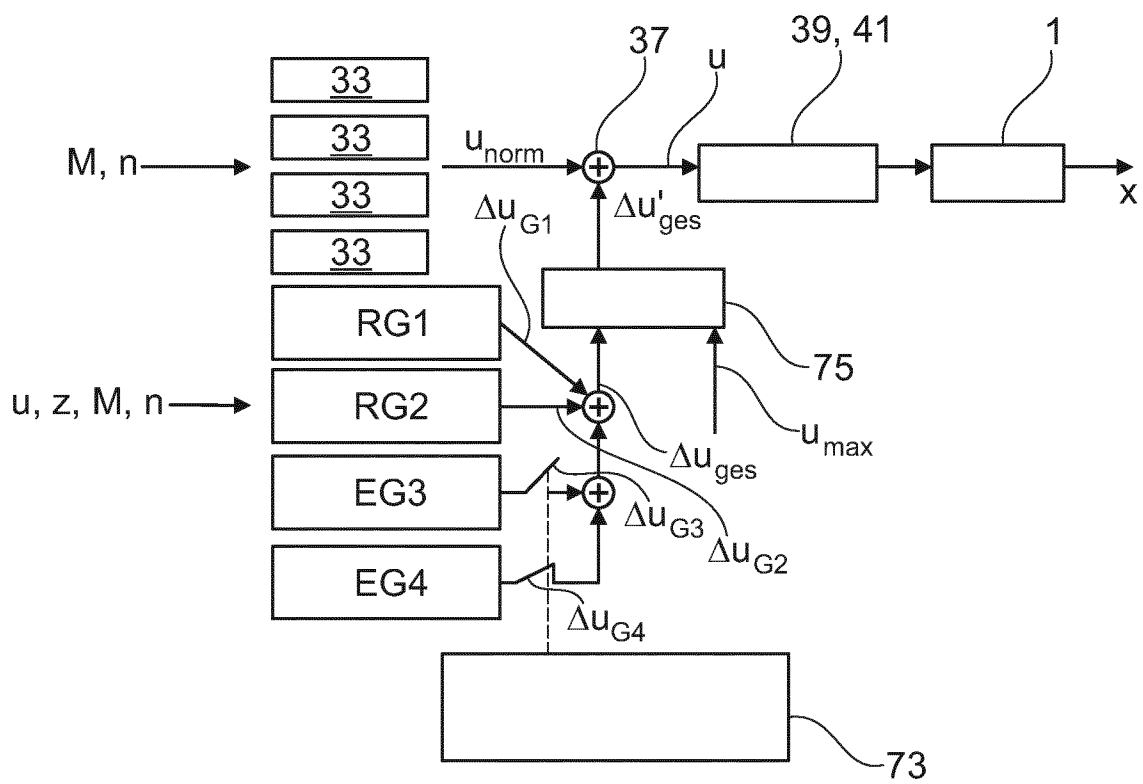


Fig. 12

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2015/065526

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. F02D41/14
ADD.

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

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
F02D

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

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

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2011/264353 A1 (ATKINSON CHRISTOPHER M [US] ET AL) 27 October 2011 (2011-10-27) paragraph [0003]; figures 1-2 paragraph [0019] - paragraph [0023] paragraph [0025] - paragraph [0026] paragraph [0036] paragraph [0039] - paragraph [0040] -----	1-14
X	WO 2006/138545 A1 (HONEYWELL INT INC [US]; SAMAD TRAIQ [US]; STEWART GREGORY E [CA]; LU J) 28 December 2006 (2006-12-28) page 2, line 11 - line 26; figures 2-6 page 3, line 18 - line 23 page 14, line 17 - page 15, line 20 page 19, line 21 - page 20, line 2 ----- -/-	1-14



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

10 September 2015

Date of mailing of the international search report

18/09/2015

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

Eitner, Christian

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2015/065526

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) figures 23, 26-29 paragraph [0010] paragraph [0049] - paragraph [0000] paragraph [0054] - paragraph [0056] paragraph [0060] paragraph [0061] paragraph [0096] - paragraph [0000] paragraph [0140] paragraph [0188] paragraph [0191] - paragraph [0000] paragraph [0194] - paragraph [0000] paragraph [0197] paragraph [0199] - paragraph [0200] paragraph [0202] - paragraph [0000] paragraph [0207] paragraph [0209] paragraph [0212] paragraph [0223] paragraph [0228] -----	1-14

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2015/065526

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2011264353	A1	27-10-2011	NONE

WO 2006138545	A1	28-12-2006	EP 1891317 A1 27-02-2008
			JP 2008544144 A 04-12-2008
			US 2006287795 A1 21-12-2006
			WO 2006138545 A1 28-12-2006

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

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. F02D41/14
ADD.

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

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
F02D

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

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

EPO-Internal, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	US 2011/264353 A1 (ATKINSON CHRISTOPHER M [US] ET AL) 27. Oktober 2011 (2011-10-27) Absatz [0003]; Abbildungen 1-2 Absatz [0019] - Absatz [0023] Absatz [0025] - Absatz [0026] Absatz [0036] Absatz [0039] - Absatz [0040] -----	1-14
X	WO 2006/138545 A1 (HONEYWELL INT INC [US]; SAMAD TRAIQ [US]; STEWART GREGORY E [CA]; LU J) 28. Dezember 2006 (2006-12-28) Seite 2, Zeile 11 - Zeile 26; Abbildungen 2-6 Seite 3, Zeile 18 - Zeile 23 Seite 14, Zeile 17 - Seite 15, Zeile 20 Seite 19, Zeile 21 - Seite 20, Zeile 2 ----- -/--	1-14



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

10. September 2015

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

18/09/2015

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

Eitner, Christian

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) Abbildungen 23, 26-29 Absatz [0010] Absatz [0049] - Absatz [0000] Absatz [0054] - Absatz [0056] Absatz [0060] Absatz [0061] Absatz [0096] - Absatz [0000] Absatz [0140] Absatz [0188] Absatz [0191] - Absatz [0000] Absatz [0194] - Absatz [0000] Absatz [0197] Absatz [0199] - Absatz [0200] Absatz [0202] - Absatz [0000] Absatz [0207] Absatz [0209] Absatz [0212] Absatz [0223] Absatz [0228] -----	1-14

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2015/065526

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
US 2011264353	A1	27-10-2011	KEINE		

WO 2006138545	A1	28-12-2006	EP	1891317 A1	27-02-2008
			JP	2008544144 A	04-12-2008
			US	2006287795 A1	21-12-2006
			WO	2006138545 A1	28-12-2006

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