

(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
30. Januar 2014 (30.01.2014)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2014/015974 A2

- (51) Internationale Patentklassifikation: Nicht klassifiziert
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2013/002174
- (22) Internationales Anmeldedatum:
23. Juli 2013 (23.07.2013)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:
10 2012 014 469.5 23. Juli 2012 (23.07.2012) DE
- (71) Anmelder: FEV GMBH [DE/DE]; Neuenhofstr. 181,
52078 Aachen (DE).
- (72) Erfinder: SCHNORBUS, Thorsten; Drei-Rosen-Winkel
1, 52066 Aachen (DE). SCHAUB, Joschka; Roermonder
Str. 22, 52072 Aachen (DE).
- (74) Anwalt: MAXTON LANGMAACK & PARTNER;
Postfach 51 08 06, 50944 Köln (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, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, 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, 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, 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,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: IMPROVED PERFORMANCE OF EXPERIMENTS

(54) Bezeichnung : VERBESSERTE VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

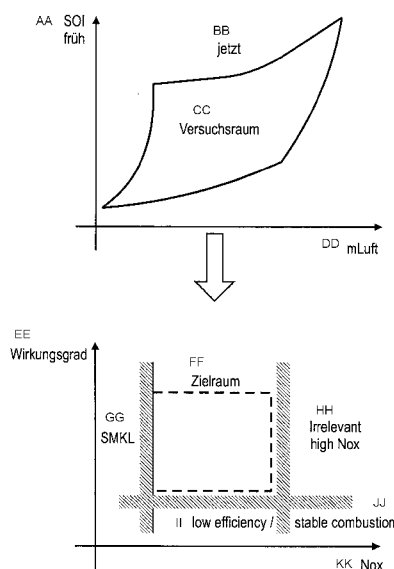


Fig. 3

AA SOI early
BB now
CC experimental space
DD mAir
EE efficiency
FF target space
GG SMKL
HH irrelevant high Nox
JJ low efficiency
KK Nox

(57) Abstract: The invention relates to the creation of an experimental plan and the performance of a series of measurements, comprising the determination of operating data of a drive device to be tested and belonging to a vehicle by means of an automated statistical experimental plan (DoE), wherein the experimental plan includes at least the following steps: identification of one or more target variables which the drive device has to meet during test operation, and narrowing relevant values to the one or more target variables, assignment of one or more actuating variables to the drive device with one or more target variables and automated creation of the experimental plan on the basis of at least two target variables to be met.

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung betrifft eine Versuchsplanerstellung und Durchführung einer Messreihe aufweisend - Ermitteln von Betriebsdaten einer zu testenden Antriebsvorrichtung eines Fahrzeugs mittels einer automatisierten statistischen Versuchsplanung (DoE), wobei die Versuchsplanung zumindest die folgende Schritte beinhaltet: - Identifizieren von ein oder mehreren Zielgrößen, die die Antriebsvorrichtung in einem Testbetrieb einzuhalten hat, und Eingrenzen von relevanten Wertender ein oder mehreren Zielgrößen, - Zuordnen von ein oder mehr Stellgrößen der Antriebsvorrichtung mit ein oder mehreren Zielgrößen und - automatisiertes Erstellen der Versuchsplanung basierend auf zumindest zwei einzuhaltenden Zielgrößen.



SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

— *Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv)*

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)*

Verbesserte Versuchsdurchführung

Die Erfindung betrifft eine Versuchsplanerstellung und Durchführung einer Messreihe aufweisend ein Ermitteln von Betriebsdaten einer zu testenden Antriebsvorrichtung eines Fahrzeugs mittels einer automatisierten statistischen Versuchsplanung. Die statistische Versuchsplanung wird auch als Design of Experiments, im Folgenden abgekürzt DoE bezeichnet.

Üblicherweise werden technische Systeme dadurch beschreiben, dass eine Einflussgröße und eine Störgröße auf ein Produkt bzw. ein Verfahren einwirken. Dieses Einwirken ergibt Messgrößen, die üblicherweise Eigenschaften charakterisieren. Diese Messgrößen werden sodann mit Zielgrößen verglichen. Ein derartiger Systemzusammenhang kann beispielsweise durch entsprechende Diagramme dargestellt werden, beispielsweise durch Mehrphasendiagramme, Betriebsdiagramme, Kennlinien-Diagramme und ähnliches.

Methoden zur Untersuchung des Verhaltens technischer Systeme sind grundsätzlich unterscheidbar in analytische Methoden, bei denen eine theoretische Herleitung bzw. Berechnung auf Basis von physikalischen Gesetzmäßigkeiten erfolgt. Zum anderen werden empirische Methoden eingesetzt, bei denen Parameter bei der Versuchsdurchführung bzw. in einer Rechnersimulation geändert werden und das Verhalten des Systems bei Änderung analysiert wird.

Eine Versuchsdurchführung benötigt Zeit und Ressourcen entsprechend des notwendigen Aufwands. Es ist daher bekannt, durch die DoE, d.h. eine statistische Versuchsplanung, einen Wirkzusammenhang zwischen Einflussfaktoren in Form möglichst unabhängiger Variablen und Zielgrößen in Form von abhängigen Variablen mit möglichst wenigen Versuchen möglichst genau zu ermitteln.

Am Anfang einer DoE wird beispielweise ein Versuchstyp geplant, der das Screening wichtiger Einflussgrößen in ihrer Wirkung beschreibt. Die Versuchsergebnisse eines solchen Plans können ausgewertet werden. Auf Grundlage der Auswertung werden Optimierungspläne entworfen, durchgeführt und ausgewertet. Mit Hilfe beispielweise von statistischen Auswerteprogrammen können zum Beispiel über Algorithmen eine oder mehrere Zielgrößen optimiert werden. Das heißt, es können Stellgrößen für Prozessparameter gefunden werden, bei der sich die Zielgrößen bei einem Optimum befinden.

Aus der EP 2 088 486 A1 geht eine Erstellung eines globalen Modells einer Ausgangsgröße eines nichtlinearen dynamischen realen Systems in Form einer Verbrennungskraftmaschine bzw. eines Antriebsstranges oder eines Teilsystems davon hervor. Das globale Modell deckt den gesamten Raum aller Betriebspunkte des Systems ab. Es wird
5 beschrieben, eine Vermessung des Systems für eine Teilmenge von Variationspunkten vorzunehmen, welche Variationspunkte durch eine Menge von Parametern des Systems definiert sind. Um die rasche und gezielte Erstellung von Versuchsplänen sowie deren globale Optimierung unter Beachtung der Versuchsgrenzen und weiterer Kriterien zu ermöglichen, werden nacheinander zumindest zwei in Abhängigkeit voneinander gewählte
10 Teilmengen von Variationspunkten ermittelt, unter Berücksichtigung der Variationspunkte aller Teilmengen ein gemeinsamer Versuchsplan erstellt und das System gemäß diesem Versuchsplan vermessen.

Aus der DE 199 08 077 A1 geht eine Anwendung einer statistischen Versuchsplanung
15 hervor, bei der eine zielgrößenoptimierte Parametrisierung von Stellgrößen in einem vorgegebenen Betriebspunkt erfolgt. Hierzu werden Einstellparameter wie Zündung, Lambda-Wert, AGR-Massenstrom, Ventilsteuerzeiten in einem Betriebspunkt unter Anwendung eines mathematischen Polynommodells mit maximal zweiter Ordnung und unter Berücksichtigung von wechselwirksamen Abhängigkeiten erster Ordnung anhand eines
20 vorbestimmten Betriebspunktes optimiert.

Aus der DE 198 19 445 A1 geht der Vorschlag hervor, eine Einsparung hinsichtlich eines Messaufwands dadurch zu erreichen, dass durch statistische Auswerte- und Berechnungsverfahren die Messwertaufnahme verkleinert wird, um eine Aussage zu einer Zielgröße zu erhalten. Hierzu werden für Zielgrößen wie die Stickoxidemission NO_x und Rußemission in Form der Ruß-Zahl quadratische Polynome gebildet, die die Einflußfaktoren
25 wie Kraftstoffeinspritzbeginn, einen mittleren Ladedruck, eine Abgasrückführungsrate, eine Lufttemperatur im Saugrohr vor dem Einlassventil und ein Drehmoment als Variable in Form von Termen abgebildet aufweisen. Beispielhaft weist ein derartiges quadratisches
30 Polynom 21 freie Parameter entsprechend der Polynomkoeffizienten auf. Weiterhin wird vorgeschlagen, eine normierende Transformation zu den Polynomkoeffizienten vorzunehmen. Dadurch soll der jeweilige Einfluss der einzelnen Polynomkoeffizienten auf das Zielgrößenergebnis besser abbildbar sein.

35 Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist, gegenüber dem Stand der Technik eine Verbesserung einer Versuchsplanung für ein Fahrzeug zu ermöglichen.

Diese Aufgabe wird mit einer Versuchsplanung und Durchführung mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen gehen aus den jeweiligen Unteransprüchen hervor, wobei auch die nachfolgende Beschreibung
nebst Figuren Merkmale und Ausgestaltungen der Erfindung näher wiedergeben. Insbe-
sondere können auch ein oder mehrere Merkmale aus den unabhängigen wie abhängigen
Ansprüchen durch ein oder mehrere Merkmale aus der Beschreibung ergänzt und/oder
ersetzt werden. Die Formulierung der unabhängigen Ansprüche ist daher ein erster Ver-
such, die Erfindung in Worte zu fassen. Auch können ein oder mehrere Merkmale aus
jeweils verschiedenen Ausgestaltungen der Erfindung zu weiteren Ausbildungen der Er-
findung verknüpft werden.

Es wird eine Versuchsplanerstellung und Durchführung einer Messreihe vorgeschlagen,
die ein Ermitteln von Betriebsdaten einer zu testenden Antriebsvorrichtung eines Fahr-
zeugs mittels einer automatisierten statistischen Versuchsplanung (DoE) aufweist. Die
Versuchsplanung beinhaltet zumindest die folgenden Schritte:

- Identifizieren von ein oder mehreren Zielgrößen, die die Antriebsvorrichtung in einem Testbetrieb einzuhalten hat, und Eingrenzen von relevanten Werten der ein oder mehreren Zielgrößen,
- Zuordnen von ein oder mehr Stellgrößen der Antriebsvorrichtung zu den ein oder mehreren Zielgrößen und
- automatisiertes Erstellen der Versuchsplanung basierend auf zumindest zwei der einzuhaltenden Zielgrößen.

Unter Durchführung einer Messreihe ist insbesondere die Versuchsdurchführung entspre-
chend der Versuchsplanung in vollständiger Weise zu verstehen. Es kann jedoch auch die
Versuchsdurchführung aufgeteilt erfolgen, nachdem die Zuordnung wie auch die weiteren
Schritte des vorgeschlagenen Verfahrens erfolgt sind. Beispielsweise kann die Versuchs-
planung verschiedene Bereiche umfassen, zum Beispiel einen Hochlastbereich, auch im
Weiteren als High Load bezeichnet, und einen Niedriglastbereich, im Weiteren als Low
Load bezeichnet. Die Versuchsdurchführungen hierzu können zum Beispiel jeweils unab-
hängig voneinander erfolgen und die jeweiligen Teilergebnisse erst später miteinander
kombiniert werden. Die Kombination von Versuchsplanerstellung und Versuchsdurchfüh-
rung weist den Vorteil auf, beides aufeinander abstimmen zu können. Wie im Folgenden
noch näher erläutert wird, erlaubt die Vorgehensweise, einzustellende Werte und Grenzen
der Zielgrößen im DoE-Plan angeben zu können, da diese in der Versuchsdurchführung
so eingestellt werden. Daher kann auch von einer zielgrößenbereichsorientierten DoE
gesprochen werden, vorzugsweise im Unterschied zu bekannten Verfahren, die von ei-

nem stellgrößenorientierten DoE ausgehen. DoE ist im Übrigen die Abkürzung für den englischen Begriff Design of Experiments. Darunter ist die oben schon erwähnte statistische Versuchsplanung aber auch Durchführung zu verstehen, wobei die Versuchsplanung wie auch die Durchführung bevorzugt jeweils automatisiert ablaufen, insbesondere miteinander gekoppelt automatisiert ablaufen.

Gemäß einer Weiterbildung wird vorgeschlagen, dass die Versuchsplanerstellung wie folgt ausgeführt wird: dass jeweils ein Wertebereich für eine Zielgröße vorgegeben wird, wobei ein Wert der jeweiligen Zielgröße nur innerhalb dieses Wertebereichs liegen darf, und erst danach das Erstellen der Versuchsplanung ausgehend von dem jeweiligen Wertebereich der Zielgröße erfolgt, wobei die Versuchsplanung ein Einstellen von Stellgrößen vermeidet, die zu einem Herausführen aus dem jeweiligen Wertebereich der Zielgröße führen.

Eine weitere Ausgestaltung sieht vor, dass jeweils ein Wertebereich für eine Zielgröße vorgegeben wird, wobei ein Wert der jeweiligen Zielgröße nur innerhalb dieses Wertebereichs liegen darf, und erst danach das Erstellen der Versuchsplanung ausgehend von dem jeweiligen Wertebereich der Zielgröße erfolgt, wobei die Versuchsplanung ein Einstellen von Stellgrößen mit einer, um bevorzugt zumindest den Faktor 1/5, geringeren Auflösung vorsieht für Werte der Stellgrößen, die zu einem Herausführen aus dem jeweiligen Wertebereich der Zielgröße führen

Anhand der Versuchsplanung erfolgt sodann die Durchführung der Versuche. Beispielsweise kann auch vorgesehen sein, dass während der Durchführung der Versuche die Versuchsplanung weiter angepasst und eingestellt wird, zum Beispiel, wenn sich herausstellt, dass einige der Zielgrößenwerte in Bereichen landen, die außerhalb des vorgegebenen Wertebereichs, insbesondere Werteraumes für eine oder mehrere Zielgrößen liegen.

Die Antriebsvorrichtung des Fahrzeugs, die zu testen ist, umfasst zumindest einen Drehmomenterzeuger, mittels dem das Fahrzeug bewegt werden kann. Der Drehmomenterzeuger kann eine Brennkraftmaschine zum Beispiel in Form einer Hubkolbenmaschine sein. Es kann auch eine Kombination aus Elektromotor und Verbrennungskraftmaschine sein. Auch kann das Drehmoment über einen ausschließlichen elektrischen Antrieb erfolgen. Des Weiteren kann eine Brennstoffzelle oder ein sonstiger Energieerzeuger ebenfalls Bestandteil der Antriebsvorrichtung sein.

Bevorzugt ist das Fahrzeug ein Landfahrzeug in Form eines Autos, einer Landmaschine oder Lastkraftwagens. Es kann jedoch auch eine Triebmaschine eines Zuges getestet werden. Ebenso kann das Fahrzeug ein Luftfahrzeug sein, zum Beispiel eine Propellermaschine, ein Leichtflugzeug, ein Hubschrauber oder auch eine Drohne. Das Fahrzeug kann ebenso ein Boot oder Schiff, ein Unterseeboot oder ein anderes Wasserfahrzeug sein. Auch andere Fahrzeuge, die bevorzugt eine Hubkolben-Verbrennungskraftmaschine aufweisen, können in Bezug auf deren Antriebsvorrichtung wie vorgeschlagen getestet werden.

- 10 Durch das Identifizieren und Eingrenzen der Zielgröße wird derjenige Raum vorgegeben, in dem die Ergebnisse der Zielgröße bei den Versuchen und Tests liegen sollen. Damit wird auch letztendlich der Bereich bzw. der Raum definiert, in dem die Versuche überhaupt stattfinden, um eine ausreichende Datensammlung zu erzielen. Ein Eingrenzen kann beispielweise dadurch erfolgen, dass eine Emissionsgrenze vorgegeben wird. Bei-
- 15 spielweise kann eine NO_x-Emission, eine CO₂-Emission, eine Ruß-Emission, zum Beispiel in Form einer Ruß-Zahl, aber auch eine Schall-Emission vorgegeben werden. Werte, die über diese vorgegebenen Grenzen für die jeweilige Zielgröße hinausgehen, sind für die Datensammlung nicht notwendig. Es kann vorgesehen sein, dass auch Bereiche über- bzw. unterhalb derartiger Werte der Zielgrößen miterfasst werden. Das erfolgt dann aber
- 20 vorzugsweise nur mit einer sehr viel geringeren Auflösung an Versuchswerten als es innerhalb des abgegrenzten Bereichs bzw. des abgegrenzten Raums erfolgt.

- Das Zuordnen von ein oder mehr Stellgrößen der Antriebsvorrichtung mit ein oder mehreren Zielgrößen erfolgt beispielweise mittels einer mathematischen Modellierung. Es besteht aber beispielsweise ebenfalls die Möglichkeit, diese Beziehung durch Versuche am Prüfstand zu bestimmen. Hierbei kann zum Beispiel ein einfacher Regelkreis zum Einsatz kommen. Durch Änderung von ein oder mehr Stellgrößen zur Erzielung von ein oder mehr vorgegebenen Zielgrößen kann dabei eine Beziehung ermittelt werden, beispielweise als mathematische Formulierung. So werden beispielweise eine oder mehrere Stellgrößen,
- 25 die einer Zielgröße zugeordnet sind, solange verändert, bis die Ergebnisse sich im Zielgrößenraum befinden. Dieses wird bevorzugt für verschiedene Zuordnungspaare von Stellgrößen und Zielgrößen mittels jeweiliger Regler vorzugsweise automatisiert durchgeführt. Dadurch können Werte von Stellgrößen bzw. Wertebereiche und/oder Kombinationen von Werten bzw. Wertebereiche von Stellgrößen bei der Versuchsplanung außer Betracht gelassen werden, wenn bekannt ist, dass diese im Ergebnis ansonsten dazu führe,
- 30 dass die zugeordnete Zielgröße außerhalb einer Vorgabe, zum Beispiel eines Bereichs liege. Prinzipiell kann jede mathematische Formulierung, die auch das Grundprinzip eines
- 35

Reglers angibt - sei es ein P-, ein I-, ein D-Regler oder Kombinationen davon wie PI-, PD PID-Regler – hierfür herangezogen werden.

- Die Zuordnung kann beispielweise eine 1 zu 1 Zuordnung von Stellgröße zu Zielgröße aufweisen. Es können auch zwei oder drei Stellgrößen einer Zielgröße zugeordnet werden. Zumindest weist jede Zielgröße mindestens eine Stellgröße zugeordnet auf. Bevorzugt werden schließlich mehr als zwei Zielgrößen mit jeweils zugeordneten Stellgrößen bei der Versuchsplanung berücksichtigt, insbesondere mehr als drei Zielgrößen. Auf diese Weise können eine Mehrzahl an Zielgrößen untersucht werden und ein zielgrößenbasiertes DoE ausgeführt werden. Des Weiteren können für verschiedene Teilbereiche auch verschiedene Zuordnungen vorgesehen sein. Beispielweise kann ein High Load-Bereich eine andere Zuordnung zwischen Zielgrößen und Stellgrößen aufweisen als ein Low Load Bereich.
- Beispielsweise ist vorgesehen, dass ein oder mehrere der nachfolgenden Zuordnungen ganz oder teilweise genutzt werden können, wobei die Zuordnungen nur beispielhaft, nicht aber beschränkend zu verstehen sind:

Stellgröße	Zielgröße
Luftmasse	NO _x
Luftmasse	CO ₂
Raildruck und/oder Einspritzdruck	Maximale Umsatzrate und/oder Geräusch
Einspritzbeginn der Haupteinspritzung	Lage des 50% Umsatzpunkts α_{50} und/oder Wirkungsgrad
AGR-Ventilposition, Luftmasse	NO _x
Waste Gate Position am Turbolader	Motorspülgefälle Δp
Auslass: Phasenstellerposition bei veränderbarer Auslassventillage und/oder Mehrteiliges AGR-Konzept: AGR-Verteilung zwischen Hoch- und Niederdruck-AGR	Temperatur t Zylinder innen bei Einlaß schließt

- Diese Zuordnungen werden bevorzugt für jeweilige Regler genutzt, über die sodann die Versuche insbesondere an einem Motorteststand durchführbar sind.

Nach Zuordnung und Bestimmen der Beziehung zwischen Stellgrößen und Zielgrößen erfolgt ein automatisiertes Erstellen der Versuchsplanung basierend auf zumindest zwei

einzuhaltenden Zielgrößen. Hierbei können die beiden Zielgrößen und deren jeweiligen Grenzen einen Bereich bzw. Raum ergeben, innerhalb dessen die Ergebnisse von Änderungen der Sollgrößen liegen sollen bzw. dürfen.

- 5 Mittels der oben vorgeschlagenen Vorgehensweise wird insbesondere eine Entwicklung globaler bzw. teilglobaler Emissionsmodelle zur Motorkalibrierung bei Reduktion des Messaufwandes ermöglicht. Hierbei wird unter einem globalen Modell das gesamte Motorkennfeld verstanden, während unter einem teilglobalen Modell eine Teilmenge des gesamten Motorkennfelds zu verstehen ist, zum Beispiel ein Hochlastbereich. Insbesondere
10 erlaubt eine derartige Versuchsplanung, die Last und die Drehzahl ebenfalls als Stellgröße und damit als Parameter mitaufzunehmen, so dass damit eine globale DoE ermöglicht wird.

- Eine Ausgestaltung der Erfindung sieht vor, dass diese bei einer Applikation für ein Steuergerät einer Verbrennungskraftmaschine eingesetzt wird. Derzeit beispielweise verwendete Größen wie Luftmasse, Einspritzbeginn und Ladedruck haben keinen direkten Bezug zu eigentlichen Zielwerten wie insbesondere NO_x-Emission und Verbrauch. Jedoch können diese Größen als Stellgrößen verwendet werden, wenn ausgehend von den Zielgrößen wie Emission, Verbrauch oder Geräusch die Messung am Prüfstand erfolgt. Dadurch
15 gelingt es, den Aufwand für die Durchführung einer DoE zu minimieren. Dieses wird nachfolgend näher erläutert.

- Beabsichtigt ist, eine Versuchsplanung für eine Applikation zu optimieren. Erkannt wurde, dass bei einer bisherigen Versuchsplanung mittels DoE-Verfahren recht schematisch alle
25 variablen Versuchsparameter wie Einspritzmenge und Einspritzzeitpunkt sowie Luftmenge über Drehzahl und Last in bestimmten Grenzen, die sinnvoll erscheinen, geplant und komplett abgefahren werden. Dabei werden insbesondere in den Ecken der normalerweise rechteckigen Versuchsplanungs-Kennfelder für jeden variablen Parameter viele nicht relevante Punkte gefahren. Diese Versuchs-Punkte ergeben z.B. zu hohen Verbrauch und/oder zu hohe Schadstoffkonzentrationen und können nicht für die Applikation
30 genutzt werden. Das vorgeschlagene Verfahren vermeidet diese unnötigen Kennfeldpunkte mittels Versuchsplanung ausgehend von den Zielgrößen, so dass von Beginn an eine erhebliche Zeitersparnis möglich ist.

- 35 Daher wird vorgeschlagen, abzufahrende Kennfelder nicht an Hand der bisher üblichen freien Parameter auszuwählen, sondern an Hand der Zielgrößen wie Verbrauch, Schadstoffkonzentrationen etc. Die Grenzen für diese Zielgrößen sind häufig bereits vorgege-

ben, z.B. durch gesetzliche Grenzwerte oder Zielgrenzwerte des Anwenders der Verbrennungskraftmaschine. Dadurch bleibt im Zielgrößenkennfeld kaum Raum für überflüssige Messpunkte, es sei denn, eine Zielgröße ist nicht erreichbar. Die Vorgehensweise sieht vor, zunächst nur das Grundkennfeld Drehzahl über Last als freie Parameter beizubehalten, aber die übrigen freien Parameter während des Versuchs mittels Applikationsroutine so automatisch zu optimieren, dass sich in jedem Messpunkt die geforderten Zielgrößen gemäß Zielgrößen-DoE-Planung ergeben. Die zugehörigen freien Parameter werden dann zu den vorgegebenen Zielgrößen appliziert.

- 10 In einer nächsten Stufe ist vorgesehen, die Zielwertoptimierung zu globalisieren. Hierzu werden auf der Seite der Zielgrößen z.B. die Fahrbarkeit und auf der Seite der freien Parameter die Auswahl der Drehzahl- und Lastpunkte bei der DoE-Versuchsplanung mit einbezogen. Dadurch werden nicht mehr alle Stellgrößenbereiche wie bisher appliziert. Vielmehr werden nur solche appliziert, in denen wiederum die Zielgrößen erfüllt werden.
- 15 Besonderer Vorteil ist, dass sich die Bestimmung der Versuchsraumgrenze vereinfacht. Die DoE-Versuchsplanung ist somit zielgrößenbasiert.

- Um eine derartige, an den Zielgrößen orientierte DoE-Messung durchzuführen, wird beispielweise ein Prüfstand für die Antriebsvorrichtung genutzt. Dieses ist bevorzugt ein
- 20 Thermodynamikprüfstand, das bedeutet, das an diesem ein wie auch ausgehende Massenströme erfasst, Temperaturen, Leistungen und sonstiges zur Erstellung von Bilanzen und sonstigen Auswertungen ermöglicht ist. Messtechnik an diesem Versuchsstand sieht beispielweise Sensoren zur Ermittlung von Abgas-Emission, von Geräuschemissionen, von Massenströmen, Drücken und Temperaturen vor an unterschiedlichen Stellen der
- 25 Antriebsvorrichtung vor. Weiterhin besteht die Möglichkeit, auf zumindest ein Steuergerät der Antriebsvorrichtung und/oder auf eine Reihe an Endstufen zugreifen zu könne, wobei die Endstufen unterschiedliche Aktuatoren der Antriebsvorrichtung ansteuern können. Des Weiteren werden mehrere Regler vorgesehen, die die Stellgrößen entsprechend vorgegebener Zielgrößenvorgaben einregeln. Die Regler können beispielweise in den Prüf-
- 30 stand integriert vorliegen. Sie können aber auch zusätzlich oder alternativ in einem Rapid-Control-Prototyping-System integriert sein. Dieses kann eine dynamische Beschreibung des zu automatisierenden Systems und dessen Modellbildung, die Regelungs- und Steuerungsentwurf im Modell, die Umsetzung des Regelungs- und Steuerungsentwurf auf dem Steuergerät, die Erprobung der Lösung in einer reinen Simulationsumgebung und/oder
- 35 am realen System umfassen.

Nachdem somit eine Zuordnung und ein Inbeziehung-Setzen von ein oder mehr Stellgrößen der Antriebsvorrichtung mit ein oder mehreren Zielgrößen mittels beispielweise zumindest eines Regelkreises erfolgt, wobei bevorzugt als Zielgröße eine NO_x-Emission und eine CO₂-Emission des Fahrzeugs verwendet werden, besonders bevorzugt zusammen mit einem Verbrauch des Fahrzeugs als weitere Zielgröße verwendet wird, kann auf Basis des ermittelten Zusammenhangs der bzw. die DoEs erstellt werden.

Die Antriebsvorrichtung kann sodann an einem Versuchsstand getestet werden. Die dabei nach der Versuchsplanung des DoEs zu ermittelten Messwerte sind basierend auf Zielgrößen wie Emissionen, Verbrauch oder Geräusch wie auch alternativ bzw. zusätzlich basierend auf prozessrelevanten Parametern wie Lage des 50%-Umsatzpunktes oder der maximalen Umsatzrate. Der Zielraum wird somit mit Messpunkten gefüllt, wobei diese sich im vorgegeben Bereich bzw. Raum begrenzen.

Eine weitere Verbesserung der Versuchsplanung ergibt sich, wenn eine relative Beschreibung der Zielgrößen zu einer Basis erfolgt. Unter Basis ist hierbei ein Ausgangspunkt im Zielgrößenbereich zu verstehen, der beispielweise ein Center Point sein kann. Darunter ist in einem Zielgrößenraum ein zwischen zwei Stufen oder Ebenen angeordneter zusätzlicher Messpunkt zu ein oder mehreren Messpunkten auf der jeweiligen Stufe bzw. Ebene. Damit wird ermöglicht, eine Nicht-Linearität bei Versuchen auf zwei Stufen bzw. Ebenen des Zielgrößenbereichs bzw. -raums festzustellen. Wird eine Zielgröße auf zwei Stufen und dem Center Point untersucht, kann ein möglicher nicht-linearer Zusammenhang in Form einer Krümmung zwischen Zielgröße und Stellgröße übersehen werden. Darüber hinaus kann bei der statistischen Auswertung zusätzlich festgestellt werden, ob der Center Point signifikant ist. Dann hat mindestens eine Zielgröße einen nicht-linearen Einfluss.

Hinsichtlich der grundsätzlichen Vorgänge zur Versuchsplanung, deren Durchführung wie auch hinsichtlich der Modellierung und Auswertung wird im Übrigen auf die oben angegebene EP 2 088 486 A1 und insbesondere den darin zu diesen einzelnen Themen angegebenen weiterführenden Stand der Technik wie auch auf die im angehängten Recherchebericht dieser Druckschrift angeführten Publikationen verwiesen.

Im Folgenden soll näher auf die Modellierung eingegangen werden, die Voraussetzung für die Versuchsplanerstellung ist. Eine Modellierung unter Verwendung der einzuhaltenden Zielgrößen erfolgt beispielsweise mittels mathematischer Funktionen wie Polynome, Splines, Wavelets, einem neuronalen Netz zum Beispiel unter Einschluss einer Radial-Basis-Funktion und/oder unter Nutzung physikalischer Gesetzmäßigkeiten.

Bei nominalen, d.h. zum Beispiel kategorischen oder auch qualitativen Zielgrößen erfolgt die Auswertung bevorzugt mit Hilfe der Varianzanalyse. Bei quantitativen, d.h. zum Beispiel metrischen Zielgrößen erfolgt die Auswertung bevorzugt mit Hilfe der Regressionsanalyse. So können Regressionsmodelle verwendet werden, die auf einer Linearkombination von Basisfunktionen beruhen:

Lineares Modell ohne Wechselwirkungen: $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3$ bei drei Zielgrößen

Lineares Modell mit Wechselwirkungen: $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_1x_2 + a_5x_1x_3 + a_6x_2x_3$ bei drei Zielgrößen

Quadratische oder auch kubische Modelle mit Wechselwirkungen: $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_1^2 + a_3x_2 + a_4x_2^2 + a_5x_3 + a_6x_3^2 + a_7x_1x_2 + a_8x_1x_3 + a_9x_2x_3$ bei drei Zielgrößen

Diese Modelle kann man als Taylor-Entwicklungen bis zum Grad $n=1$ bzw. $n=2$ auffassen. Die Modellparameter a_i werden so bestimmt, dass die Abweichungen zwischen Daten und Modell möglichst klein sind. Man kann zum Beispiel die Summe der quadrierten Abweichungen minimieren.

Kennt man die tatsächliche Form des funktionalen Zusammenhangs zwischen Zielgrößen und Stellgrößen, so kann man die Stellgrößen in dieser Funktion mit nichtlinearer Regression anpassen.

Somit können DoEs erstellt werden, die Folgendes berücksichtigen:

- Anzahl der zu untersuchenden Zielgrößen, bevorzugt mehr als zwei, insbesondere mehr als fünf, zum Beispiel sechs
- Art der zu untersuchenden Zielgrößen
- Bestehende Informationen über den Zusammenhang zwischen Zielgrößen und Stellgrößen durch Modellierung
- Gewünschte Genauigkeit/Zuverlässigkeit der Aussagen, zum Beispiel über die ermittelte Signifikanz der einzelnen Ergebnisse.

Eine Weiterbildung des Verfahrens sieht vor, dass vor der Ausführung der Versuchsplannerstellung eine Kalibrierung der Modellierung erfolgt. Durch die Kalibrierung kann die Genauigkeit erhöht werden. Beispielweise kann für eine Kalibrierung eine nicht-optimierte

Kalibrierung eines Motors genutzt werden. Diese kann als eine Basis im Versuchsraum verwendet werden. Für globale DoE's sind die zielgrößenbasierten Grenzen über die Drehzahl und Last eventuell sehr weit. Daher kann es sinnvoll sein, diese Grenzen in Bezug zu einem Basispunkt der Zielgröße zu definieren. Dieses erleichtert die anschließende Versuchsplanung. Des Weiteren kann eine Aufteilung des globalen DoE's insbesondere dann sinnvoll sein, wenn in verschiedenen Teilbereichen unterschiedliches Verhalten von Zielgrößen feststellbar ist. So ist beispielsweise eine NOx-Emission bei Hochlast von anderen Stellgrößen beeinflussbar als eine NOx-Emission bei Niedriglast. Daher wird beispielsweise bei emissionsabhängigen Applikationen ein teilglobales, die Hochlast betreffendes DoE und ein teilglobales, die Tieflast betreffendes DoE erstellt.

Nach der Durchführung der Versuche und der Ermittlung der Messwerte kann eine Validierung der Messwerte erfolgen. Dazu können die gewonnenen Werte mit denjenigen abgeglichen werden, die in weiteren Tests am Prüfstand zu Vergleichszwecken gewonnen wurden. Beispielsweise kann vorgesehen sein, dass auf Basis der festgelegten Modellstruktur, einer Bestimmung der wesentlichen Größen und der Validierung sich ergibt, dass die Modellstruktur geändert werden muss.

Eine weitere Ausgestaltung einer vorgeschlagenen Versuchsplanerstellung sieht vor, dass eine Übertragung auf andere Sollwerte erfolgt. Diese Übertragung kann beispielsweise auf die maximale Umsatzrate, die Temperatur bei Einlass schließt oder auf einen sonstigen Sollwert erfolgen. Insbesondere ist aber auch eine Übertragung in ein Steuergerät eines Motors vorgesehen.

Gemäß einem weiteren Gedanken der Erfindung wird eine Verwendung von Messergebnissen erstellt mittels des vorgeschlagenen Verfahrens bei der Erstellung einer Fahrzeugapplikation vorgeschlagen. Insbesondere kann auf diese Weise ein Steuergerät, bevorzugt ein Motorsteuergerät bedatet werden.

Auch wird gemäß eines weiteren Gedankens, der auch unabhängig von den obigen wie auch nachfolgenden Aspekten wie aber auch verknüpft mit ihnen sein kann, ein Versuchsstand vorgeschlagen, der folgendes aufweist:

- eine zu testende Antriebsvorrichtung,
- eine Messwertaufnahme und eine Messwertauswertung,
- einen jeweils vorgegebenen Wertebereich für jeweils eine Zielgröße, wobei zumindest zwei Zielgrößen vorgegeben sind aus der Gruppe umfassend eine NOx-Emission, eine

CO₂-Emission, einen Verbrauch der Verbrennungskraftmaschine und eine Rußpartikel-Emission,

- zumindest einen Regelkreis, der ein In-Beziehung-Setzen von ein oder mehr Stellgrößen der Antriebsvorrichtung mit ein oder mehreren Zielgrößen aufweist, wobei Werte der Zielgröße als Sollwerte des Regelkreises vorgegeben sind, und
- mit einer implementierten Versuchsplanerstellung und Durchführung nach einem der obigen und/oder nachfolgenden Gedanken bzw. Merkmalen.

Die Antriebsvorrichtung ist vorzugsweise eine Fahrzeug-Antriebsvorrichtung, zum Beispiel umfassend eine Verbrennungskraftmaschine und/oder ein Elektro-Antrieb. Die Messwertaufnahme weist zumindest einen oder mehrere Sensoren wie auch eine oder mehrere zugehörige Datenleitungen auf, mittels der Ist-Werte von Parametern der Antriebsvorrichtung erfasst werden können. Bevorzugt können mittels der Messwertaufnahme Ist-Größen der Zielgrößen aufgenommen werden. Dieses ermöglicht zum Beispiel bei der Durchführung der Testreihen, dass entsprechend der Zielgrößen als Sollwerte der eingesetzten Regelkreise eine Überprüfung jederzeit möglich ist. Vorzugsweise ist die Messwertaufnahme Bestandteil von ein oder mehreren Regelkreisen, die bei der Durchführung der Versuchsplanung eingesetzt werden. Eine Messwertauswertung umfasst zumindest einen Speicher, indem zum Beispiel durch die Messwertaufnahme erfasste Werte abrufbar hinterlegt werden können. Der Speicher kann beispielsweise ein oder mehrere Bereiche aufweisen, in denen unterschiedliche Daten ablegbar bzw. abrufbar sind. So kann zum Beispiel ein erster Speicherbereich den Versuchsplan aufweisen, ein zweiter Speicherbereich ermittelte Werte zu dem Versuchsplan. Auch können unterschiedliche Speicher hierfür vorgesehen sein, ebenso voneinander getrennte Speicher wie auch miteinander integrierte Speicher. Vorzugsweise ist mit dem Speicher eine CPU verbunden. Diese erlaubt, dass aufgenommene Messwerte erfasst und ausgewertet werden und so zum Beispiel ein Datenkennfeld ermittelt wird. Auch kann die CPU, oder auch eine andere CPU, genutzt werden, um zum Beispiel die Durchführung des Versuchsplans automatisiert durchzuführen. Weitere Einzelheiten von möglichen Komponenten des Versuchsstands gehen aus der obigen wie auch der nachfolgenden Beschreibung und den zugehörigen Figuren hervor.

Des Weiteren wird ein Computerprogrammprodukt mit Programmcode-Mitteln vorgeschlagen, die auf einem computerlesbaren Speichermedium gespeichert sind zur Durchführung eines Verfahrens wie oben beschreiben, bei einer Ausführung des Programms auf einem Computer. Dieses ermöglicht zum Beispiel bestehende Installationen nachträglich mit dieser Vorgehensweise auszurüsten. So können schon bestehende Testsysteme

durch ein Update nachträglich in die Lage versetzt werden, eine Versuchsplanung wie vorgeschlagen zu erstellen bzw. auszuführen.

Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen gehen aus den nachfolgenden
5 Figuren hervor. Die folgenden Figuren zeigen ein Ausführungsbeispiel eines Verbrennungsmotors mit einem Generator. Die aus den einzelnen Figuren hervorgehenden Einzelheiten und Merkmale sind jedoch nicht auf diese jeweilige Figur beziehungsweise das Ausführungsbeispiel beschränkt. Vielmehr können ein oder mehr Merkmale mit einem
10 oder mehr Merkmalen aus verschiedenen Figuren wie auch mit aus der obigen Beschreibung hervorgehenden Merkmalen zu neuen Ausgestaltungen verknüpft werden. Insbesondere dienen die nachfolgenden Ausführungen nicht als Beschränkungen des jeweiligen Schutzbereiches, sondern erläutern einzelne Merkmale sowie ihr mögliches Zusammenwirken untereinander. Es zeigen:

15 Fig. 1 zeigt beispielhaft eine zu testende Verbrennungskraftmaschine,

Fig. 2 zeigt in schematischer Ansicht eine Vorgehensweise nach dem Stand der Technik,

Fig. 3 zeigt in schematischer Ansicht eine Vorgehensweise, wie sie nunmehr vorgeschla-
20 gen wird,

Fig. 4 zeigt in schematischer Ansicht eine Übertragung auf globale DoEs,

Fig. 5 zeigt ein Beispiel eines Ergebnisraums,
25

Fig. 6 zeigt ein Beispiel einer Modellierung unter Verwendung einer Radialbasisfunktion,

Fig. 7 zeigt eine Validierung,

30 Fig. 8 zeigt einen ersten Ablaufplan,

Fig. 9 zeigt einen zweiten Ablaufplan zur Durchführung des vorgeschlagenen Verfahrens,
und

35 Fig. 10 zeigt beispielhaft einen einsetzbaren Regler.

Fig. 1 zeigt in beispielhafter Darstellung eine getestete Verbrennungskraftmaschine mit schematisch dargestellten, verschiedenen Bereichen, die bei der Entwicklung jeweils entsprechend eines Lastenheftes entwickelt und gleichzeitig miteinander als Gesamtkonzept die gestellten übergeordneten Erfordernisse erbringen muss. So sind das Zylinderkopf-Konzept, das Ventiltriebssystem, das Verbrennungssystem, das Kühlkonzept, das Abgasrückführungskonzept wie auch das Booster-System auszulegen und zu testen. Dieses kann sehr umfangreich hinsichtlich notwendiger Messwerte und dafür notwendige Versuchsstandtests sein. Die Messreihen sind nach herkömmlicher Weise sehr groß auszu-
legen, zeitintensiv und teuer. Bisher werden direkt zugängliche Stellgrößen in DoE-Plänen verwendet, wie zum Beispiel Luftmasse, SOI, etc. Eine Abdeckung von Zielbereichen ist
nur mit aufwändigen Constrains auf den Eingangsgrößen möglich, oder der Zielraum kann nur bedingt abgedeckt werden. Vorzugsweise ist die Verbrennungskraftmaschine als Antriebsvorrichtung 1 in einem Prüfstand 2 angeordnet. Der Prüfstand 2 umfasst neben der Antriebsvorrichtung 1 zumindest eine Messwertaufnahme 3 und eine Messwertauswertung 4, die beide jeweils schematisch dargestellt sind. Messwertaufnahme 3 und Messwertauswertung 4 können angepasst an die jeweiligen Zielgrößen und damit an unterschiedliche Bereiche 5 der Antriebsvorrichtung 1 ausgelegt sein. Die Messwertaufnahme 3 ist beispielhaft schematisch dargestellt von jedem eingekreisten Bereich 5 der Antriebsvorrichtung 1 zur Messwertauswertung 4 verlaufend, wobei jeder Bereich 5 zum Beispiel ein oder mehrere Sensoren 6 aufweist. Über die angedeuteten Datenleitungen 7 können Signale, beispielweise Messsignale aber auch Stellsignale für Aktuatoren, den jeweiligen Bereichen 5 zu- bzw. gegebenenfalls von dort auch abgeführt werden.

Fig. 2 zeigt den bisher bekannten Stand der Technik hinsichtlich der Nutzung von DoEs. Ausgegangen wird hierbei vom Versuchsraum. Dieser kann dadurch begrenzt sein, dass Drehzahlen oder Geschwindigkeiten außerhalb des angedachten Einsatzbereichs des Fahrzeugs liegen. Der Versuchsraum wird im Wesentlichen durch die Stellgrößen festgelegt.

Fig. 3 zeigt hingegen die Vorgehensweise wie vorgeschlagen. Dabei wird von den Zielgrößen ausgegangen und im Versuch die Stellgrößen so variiert, dass die Zielgrößen erreicht werden. Es wird somit ein Zielgrößenraum vorgegeben, den die Stellgrößen bei Änderung einhalten müssen. Auf diese Weise wird der Versuchsraum auf eine Größe beschränkt, in der die ausgeführten Versuche tatsächlich im Zielgrößenraum ihr Ergebnis haben, haben sollen oder aber zumindest nahe daran liegen. Hierbei kann es zu einer Verwendung physikalisch relevanter Inputs wie q , αX_{50} , $\log(c(\text{NO}_x))$, TC_{Cyl} , dp , r_{EGR} an Stelle von Luftmasse, SOI, etc. in Form von Stellgrößen kommen.

Hierbei bedeuten:

αX_{50}	Lage des 50% Umsatzpunktes
$\log(c(\text{NO}_x))$	NO_x -Konzentration, an einem beliebigen oder ausgewähltem Punkt im Abgasstrang
TCyl	Temperatur im Zylinder bei Einlass schließt; idR nicht gemessen sondern modelliert
dp	Motorspülgefälle
rEGR	AGR-Massenverteilung
SOI	Einspritzbeginn der Haupteinspritzung
q	Einspritzmenge, entspricht der Last

Die NO_x -Konzentration wird beispielweise hier in logarithmischer Form genutzt. Es hat sich gezeigt, dass bei Auswertungen aufgrund unterschiedlich starken bzw. schwachen Konzentrationen in unterschiedlichen Bereichen eine Darstellung vorteilhaft mittels dieser Darstellungsweise möglich ist. Gleiches gilt auch für andere Zielgrößen und deren Werteverteilung aufgrund eines ausgeführten Versuchsplans. Beispielsweise können unterschiedliche Mechanismen und damit Stellgrößen ein Anzeichen dafür sein, dass eine logarithmische Darstellung der Ergebnisse für eine Zielgröße vorteilhaft ist. Betreffend einer NO_x -Konzentration ist dieses beispielweise dann vorteilhaft, wenn ein Niedriglast- und ein Hochlastbereich zusammen betrachtet werden. Im Niedriglastbereich ist eine andere NO_x -Konzentration als im Hochlastbereich vorliegend, die ansonsten gemeinsam nicht so klar dargestellt in einem Diagramm zur Verfügung gestellt werden können.

Neben einer Nutzung des vorgeschlagenen Verfahrens im Rahmen lokaler DoE's kann dieses auch in der Serienkalibrierung bei Steuergeräten von Verbrennungskraftmaschinen Verwendung finden. Lokale DoE's sind hierbei DoE's mit jeweils einem Lastpunkt und spezieller Drehzahl, innerhalb der die Zielgrößen durch die Stellgrößen in dem vorgebbaren Bereich bzw. Raum angesteuert werden können. Lokale DoE's sind somit auf einen Lastpunkt beschränkt. Vorteile des vorgeschlagenen Verfahrens sind eine deutliche Vereinfachung der Versuchsraumbestimmung, eine bessere Ausfüllung des Zielraumes und eine Begrenzung des Versuchsraumes auf die tatsächlich sinnvollen Bereiche. Fig. 3 zeigt den Zusammenhang zwischen Versuchsraum und Zielraum. Der Pfeil in der Zeichnung ist umgekehrt zu dem in Fig. 2 ausgerichtet. Der Zielraum wird durch Begrenzungen wie zum Beispiel einer Emissionsgrenze für zum Beispiel NO_x festgelegt, wobei NO_x eine der

Zielgrößen ist. Auch kann eine instabile Verbrennung, ein Klopfen, eine zu geringe Leistung oder auch die Rauchgrenze, im Englischen auch Smokelimit, abgekürzt SMKL genannt, eine Begrenzung des Zielraums bzw. des Zielbereichs vorgeben.

- 5 Die Stellgrößen können während der Versuchsdurchführung auch Zielgrößenwerte erreichen, die außerhalb des Versuchsraums liegen. Durch die Vorgehensweise, bevorzugt rechteckige Räume abzufahren, können etwa 30 bis 40 % der Zielgrößenwerte außerhalb des vorgegeben Zielgrößenbereichs bzw. -raums liegen. Dieses weiter zu beschränken ist möglich, bedarf aber weiterer Aufwendungen. Daher wird bei der zielgrößenbasierten
- 10 DoE-Auslegung auch danach abgewogen, welcher Aufwand bei der weiteren Begrenzung der Zielgrößen bzw. der Zuordnung noch sinnvoll gegenüber der Durchführung ohne weitere Begrenzung ist.

Fig. 4 zeigt in schematischer Ansicht einen Übertrag eines Zielraums auf einen anderen in

15 Form eines Übertrags auf globale DoE's. Hierbei kommt es zur Verwendung physikalisch relevanter Inputs wie zum Beispiel Δp , NO_x, T_{cyl}, rEGR, α_{50} oder auch dmfbmax, welches eine Abkürzung für eine maximale Umsatzrate des Treibstoffs im Brennraum ist. Zumindest zwei, bevorzugt die meisten Größen werden im Versuchsplan relativ zu einer Basis variiert. Das bedeutet, dass ein Basispunkt als Ausgangspunkt genommen wird und

20 dann die Grenzen der Zielgrößen relativ zu diesem Basispunkt ermittelt und sodann die Versuchsplanung daran aufgebaut wird. Eine Unterteilung des Kennfelds in Zonen bzw. eine Aufteilung nach Inputs kann erfolgen, insbesondere auch aus verschiedenen Gründen zu unterschiedlichen Aufteilungen führen. Beispiel hierbei können unterschiedliche Zielsetzungen sein, aber auch verschiedene Relevanzen von Zielgrößen in unterschiedli-

25 chen Bereichen eines Kennfeldes. Zum Beispiel kann einerseits die CO₂-Emission in einem Bereich relevant sein, in einem anderen Bereich ist es die NO_x-Emission und der Verbrauch. Beispielhaft ist eine Aufteilung dargestellt, die unterschiedliche Stell- bzw. Zielgrößen bedingen:

30 a) Low Load mit q, NMOT, rEGR, Δp , NO_x, T_{cyl}, α_{50}

b) High Load mit q, NMOT, rEGR, Δp , NO_x, α_{50}
mit einerseits den Stellgrößen für a):

q, NMOT, dmfbmax, tiPil1, qPil1

35 und andererseits den Stellgrößen für b)

q, NMOT, tiPil1, tiPil2, qPil1, qPil2,

wobei die ggfls. vorher noch nicht angeführten Abkürzungen verschiedener Stellgrößen noch folgendes bedeuten:

q: Einspritzmenge, was der Last entspricht
5 NMOT: Drehzahl Kurbelwelle
tiPil1: Zeitpunkt Piloteinspritzung 1
qPil1: Menge Treibstoff Piloteinspritzung 1
tiPil2: Zeitpunkt Piloteinspritzung 2
qPil2: Menge Treibstoff Piloteinspritzung 2

10

Fig. 5 zeigt beispielhaft ein schematisches Beispiel für einen Testplan, nämlich für den Bereich High Load in Form eines n-dimensionalen DoE's. Eingesetzt wurde hierbei ein aus dem DoE-Bereich bekanntes Verfahren, nämlich das Space Filling Design, wobei jedoch eine logarithmische Verteilung der xNOx erfolgte. Angegeben sind bei diesem Beispiel:

15

135 Punkte inklusive 3 Stabilisierungspunkte, 5 Wiederholungspunkte, 8 Validierungspunkte für einen Drehzahlbereich von 1200-2800 rpm und 10 bis 50 mg/Hub Einspritzmenge. Die relativen Versuchsraumgrenzen sind für alle Sollwerte - außer Drehzahl n und Einspritzmenge q, qPil, tiPil - ausgehend von einer Basiskalibrierung.

20

Zur relativen Modellierung der Änderungen sollte jedem DoE Punkt auch ein Basispunkt hinzugehören. Basispunkt meint der gewählte Drehzahl-Last-Punkt aus dem Basisdatensatz ohne Änderungen. Sollte es nötig sein, zum Beispiel auf Grund langsamer Konditionierungen, den Versuchsplan z.B. nach Ladelufttemperatur zu sortieren, dann sollte dies bevorzugt in V- oder W-Form gemacht werden, d.h. steigend und wieder fallend, um anschließend in der Lage zu sein, Driftkorrekturen anzuwenden. Die Anordnung des Versuchsplans in steigender und wieder fallender Weise, d.h. in V- oder W-Form kann auch umgekehrt erfolgen, in Abhängigkeit vom Beginn des Versuchsplans. Auch kann dieses bei unterschiedlichen Konditionen Verwendung finden und ist nicht nur bei langsamer Konditionierung anwendbar. Insbesondere wenn eine Driftkorrektur vorgenommen wird, ist die Verwendung von fallenden bzw. steigenden Werten und umgekehrt bevorzugt.

25

30

Es hat sich herausgestellt, dass ein Modell basierend auf physikalischen Inputs und Funktionen es erlaubt, globale Zusammenhänge abbilden zu können. Ein lineares Modell basierend auf konventionellen Inputs wie zum Beispiel Luftmasse und SOI haben jedoch

35

gezeigt, dass die Modellgenauigkeit gegebenenfalls unbrauchbar sein kann und dass Tendenzen zudem falsch abgebildet sein könnten.

Eine Optimierung der physikalischen Modellierung erlaubt es, ein Motorverhalten auf die vorgeschlagene Weise gut darstellen zu können. Alle Modelle sind hierbei grundsätzlich extrapolierbar. Es können gemäß einer Ausgestaltung keine physikalisch unsinnigen Werte auftreten, z.B. eine Rußzahl $SZ < 0$. Weitere Auswertungen der Messdaten und Modelle können zum einen zur Methodenentwicklung genutzt werden, zum anderen zur Optimierung von einer Bedatung sowie für Steuergeräte-Funktionen bei Fahrzeugen.

Eine globale Optimierung ist ebenfalls möglich. Hierzu ist es beispielweise hilfreich, eine Nutzung einer sogenannten Toolbox vorzusehen. Eine Weiterbildung sieht vor, die Optimierung auf eine Verbrauchsoptimierung mit Randbedingungen zu reduzieren.

Fig. 6 zeigt hierzu ein Beispiel einer Modellierung mit einer Toolbox. Die Modellierung erfolgte anhand einer Matlab/Simulink-Toolbox unter Verwendung nicht linearer Modelle, z. B. Radialbasisfunktionen. Die Darstellung zeigt die Vorteile einer logarithmischen Auswertung, da sehr stark voneinander abweichende Konzentrationen trotzdem zusammen angezeigt und ausgewertet werden können.

Fig. 7 zeigt eine Validierung unter Hochlast High Load, wobei Zielgrößen zum einen durch Experiment nach vorgeschlagener Weise ermittelt wurden, zum anderen durch Simulation ermittelt wurde.

Erste Ergebnisse zu dem vorgeschlagenen Verfahren zeigen folgendes:

- Ein Motorverhalten scheint grundsätzlich darstellbar;
- Es wurde bislang einige Erfahrung mit der MBC gesammelt, die diese Aussage bestätigen;
- Es können physikalisch unsinnigen Werte auftreten, z.B. $SZ < 0$
- Es gibt gemäß einer Ausgestaltung keine Extrapolierbarkeit. Interpolationsfehler, die bei der Modellerstellung nicht erkannt werden, bergen durch die sehr flexiblen Modelle große Gefahren,
- Es können auch komplexe Zusammenhänge wie Druckwellen im Rail/Injektor abgebildet werden.
- Die Verwendung nicht physikalischer Modelle erfordert den Einsatz kommerzieller Tools wie zum Beispiel Model Based Calibration Toolbox, Matlab und geschultes Personal;

- Eine Abbildung von z.B. Druckwellen ist möglich,
- Weiteres Optimierungspotenzial durch angepasste Versuchspläne bei Unterscheidung zwischen globalen und lokalen Variablen, z.B. für $\alpha \times 50$
- Risiko bei nicht physikalischer Modellierung sind mögliche Interpolationsfehler sowie keine Extrapolierbarkeit;
- Auch bei nicht physikalischer Modellierung ist es bevorzugt, den Versuchsplan über physikalische Größen zu erstellen und zu fahren, da so der Vorbereitungsaufwand deutlich reduziert wird,
- Weiterhin ist eine logarithmische Verteilung von Sollkonzentrationen hilfreich, um eine bessere Modellgüte zu erzielen.

Fig. 8 zeigt in beispielhafter Ausgestaltung einen ersten Ablaufplan. Hierbei werden nach dem Aufsetzen des DoE-Plans durch Zuordnung von Stellgrößen zu Zielgrößen und Begrenzen des Zielgrößenraums Messungen am Prüfstand durchgeführt. Hierbei werden die Zielgrößen durch möglichst einfache Regelkreise eingestellt, so dass sie im vorgebbaren Zielgrößenraum liegen. Es wird hierbei bevorzugt für jeden Betriebspunkt jede Stellgröße solange eingeregelt, bis die Zielgrößen-Kennwerte erreicht sind. Das wird für Sodann kann eine Modellierung unter Verwendung der Zielgrößen zum Beispiel nach mathematischen Methoden erfolgen, wobei im Anschluss daran eine Kalibrierung erfolgen kann. Eine Validierung der so aufgefundenen Werte kann am Prüfstand durch Messung erfolgen. Anschließend kann die Übertragung erfolgen, das bedeutet zum Beispiel die Bedienung auf ein Motorsteuergerät.

Fig. 9 zeigt einen zweiten Ablaufplan. Im Unterschied zum vorherigen erfolgt die Modellierung unter Verwendung physikalisch relevanter Größen, zum Beispiel solchen, wie oben und in der Figur dargestellt. Es besteht auch die Möglichkeit, eine Modellierung unter Nutzung von beiden in Fig. 8 und Fig. 9 dargestellten Möglichkeiten zu gewinnen. Insbesondere bei mehrfach wechselseitigen Abhängigkeiten von mehreren Stell- und Zielgrößen besteht die Möglichkeit, bei Einregelung der Zielgrößen mehrdimensionale Regelalgorithmen, Funktionen, Kennfeldern oder auch modellgestützter Algorithmen zu verwenden.

Fig. 10 zeigt einen grundsätzlichen Aufbau eines einsetzbaren Regler, bei dem als Sollwert die Zielgröße eingesetzt wird. Ein derartiger Regler wird an einem Prüfstand des zu untersuchenden Motors eingesetzt, um ein In-Verbindung-Setzen zwischen der Zielgröße und der Stellgröße gemäß der Zuordnung zu ermöglichen. Durch diese zielgrößenbasierte Vorgehensweise wird ermöglicht, dass nur Stellgrößen eingesetzt werden, die einen Istwert der Zielgröße in dem vorgebbaren Zielgrößenraum haben. Liegen Stellgrößenberei-

che vor, die dieses verhindern und automatisch zu Istwerten außerhalb führen, brauchen diese nicht weiter berücksichtigt werden.

Ansprüche

1. Versuchsplanerstellung und Durchführung einer Messreihe aufweisend
- Ermitteln von Betriebsdaten einer zu testenden Antriebsvorrichtung eines Fahrzeugs
- 5 mittels einer automatisierten statistischen Versuchsplanung (DoE),
wobei die Versuchsplanung zumindest die folgende Schritte beinhaltet:
- Identifizieren von ein oder mehreren Zielgrößen, die die Antriebsvorrichtung in einem Testbetrieb einzuhalten hat, und Eingrenzen von relevanten Werten von den ein oder mehreren Zielgrößen,
- 10 - Zuordnung von ein oder mehr Stellgrößen der Antriebsvorrichtung zu den ein oder mehreren Zielgrößen und
- automatisiertes Erstellen der Versuchsplanung basierend auf zumindest zwei einzuhaltenden Zielgrößen.
- 15 2. Versuchsplanerstellung und Durchführung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass jeweils ein Wertebereich für eine Zielgröße vorgegeben wird, wobei ein Wert der jeweiligen Zielgröße nur innerhalb dieses Wertebereichs liegen darf, und erst danach das Erstellen der Versuchsplanung ausgehend von dem jeweiligen Wertebereich der Zielgröße erfolgt, wobei die Versuchsplanung ein Einstellen von Stellgrößen vermeidet, die zu
- 20 einem Herausführen aus dem jeweiligen Wertebereich der Zielgröße führen.
3. Versuchsplanerstellung und Durchführung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass jeweils ein Wertebereich für eine Zielgröße vorgegeben wird, wobei ein Wert der jeweiligen Zielgröße nur innerhalb dieses Wertebereichs liegen darf, und erst
- 25 danach das Erstellen der Versuchsplanung ausgehend von dem jeweiligen Wertebereich der Zielgröße erfolgt, wobei die Versuchsplanung ein Einstellen von Stellgrößen mit einer, um bevorzugt zumindest den Faktor 1/5, geringeren Auflösung vorsieht bei Werten für die Zielgröße, die zu einem Herausführen aus dem jeweiligen Wertebereich der Zielgröße führen.
- 30 4. Versuchsplanerstellung und Durchführung nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass ein Inbeziehung-Setzen von ein oder mehr Stellgrößen der Antriebsvorrichtung mit ein oder mehreren Zielgrößen mittels zumindest eines Regelkreises erfolgt.
- 35

5. Versuchsplanerstellung und Durchführung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass als Zielgröße eine NO_x-Emission und eine CO₂-Emission des Fahrzeugs verwendet werden.
- 5 6. Versuchsplanerstellung und Durchführung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein Verbrauch des Fahrzeugs als Zielgröße verwendet wird.
- 10 7. Versuchsplanerstellung und Durchführung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Antriebsvorrichtung an einem Versuchsstand getestet und dabei die Zielgrößen mittels Regelkreise eingestellt werden.
- 15 8. Versuchsplanerstellung und Durchführung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Regelkreise vorgegebene Zielgrößenwerte als Sollwerte nutzen.
9. Versuchsplanerstellung und Durchführung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine Modellierung unter Verwendung der einzuhaltenden Zielgrößen erfolgt.
- 20 10. Versuchsplanerstellung und Durchführung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass eine Kalibrierung der Modellierung erfolgt.
- 25 11. Versuchsplanerstellung und Durchführung nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, dass eine Validierung der Modellierung erfolgt.
12. Versuchsplanerstellung und Durchführung nach einem der vorhergehenden Ansprüche 9, 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, dass eine Übertragung der Modellierung auf andere Sollwerte erfolgt.
- 30 13. Versuchsplanerstellung und Durchführung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass in einem ersten Schritt zunächst ein Grundkennfeld Drehzahl über Last als freie Parameter beibehalten werden, übrige freien Parameter während der Durchführung der Messreihe mittels zumindest einer Applikationsroutine so automatisch optimiert werden, dass sich in jedem Messpunkt die geforderten Zielgrößen gemäß einer Zielgrößen-DoE-Planung ergeben, und dass in einem nachfolgenden Schritt eine Zielwertoptimierung globalisiert wird, wobei auf der Seite der freien Parameter die Auswahl der Drehzahl- und Lastpunkte bei der DoE-Versuchsplanung mit einbezogen
- 35

wird, wobei nur solche Stellgrößenbereiche appliziert werden, in denen wiederum die Zielgrößen erfüllt werden.

14. Versuchsstand (1) aufweisend:

- 5 - eine zu testende Antriebsvorrichtung (2),
- eine Messwertaufnahme (3) und eine Messwertauswertung (4),
- einen jeweils vorgegebenen Wertebereich für jeweils eine Zielgröße, wobei zumindest zwei Zielgrößen vorgegeben sind aus der Gruppe umfassend eine NO_x-Emission, eine CO₂-Emission, einen Verbrauch der Verbrennungskraftmaschine und eine Rußpartikel-
- 10 Emission,
- zumindest einen Regelkreis, der ein In-Beziehung-Setzen von ein oder mehr Stellgrößen der Antriebsvorrichtung (2) mit ein oder mehreren Zielgrößen aufweist, wobei Werte der Zielgröße als Sollwerte des Regelkreises vorgegeben sind, und
- mit einer implementierten Versuchsplanerstellung und Durchführung nach einem der
- 15 vorhergehenden Ansprüche 1 bis 13.

15. Verwendung von Messergebnissen erstellt mittels eines Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche bei der Erstellung einer Fahrzeugapplikation.

- 20 16. Computerprogrammprodukt mit Programmcode-Mitteln, die auf einem computerlesbaren Speichermedium gespeichert sind zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 13, bei einer Ausführung des Programms auf einem Computer.

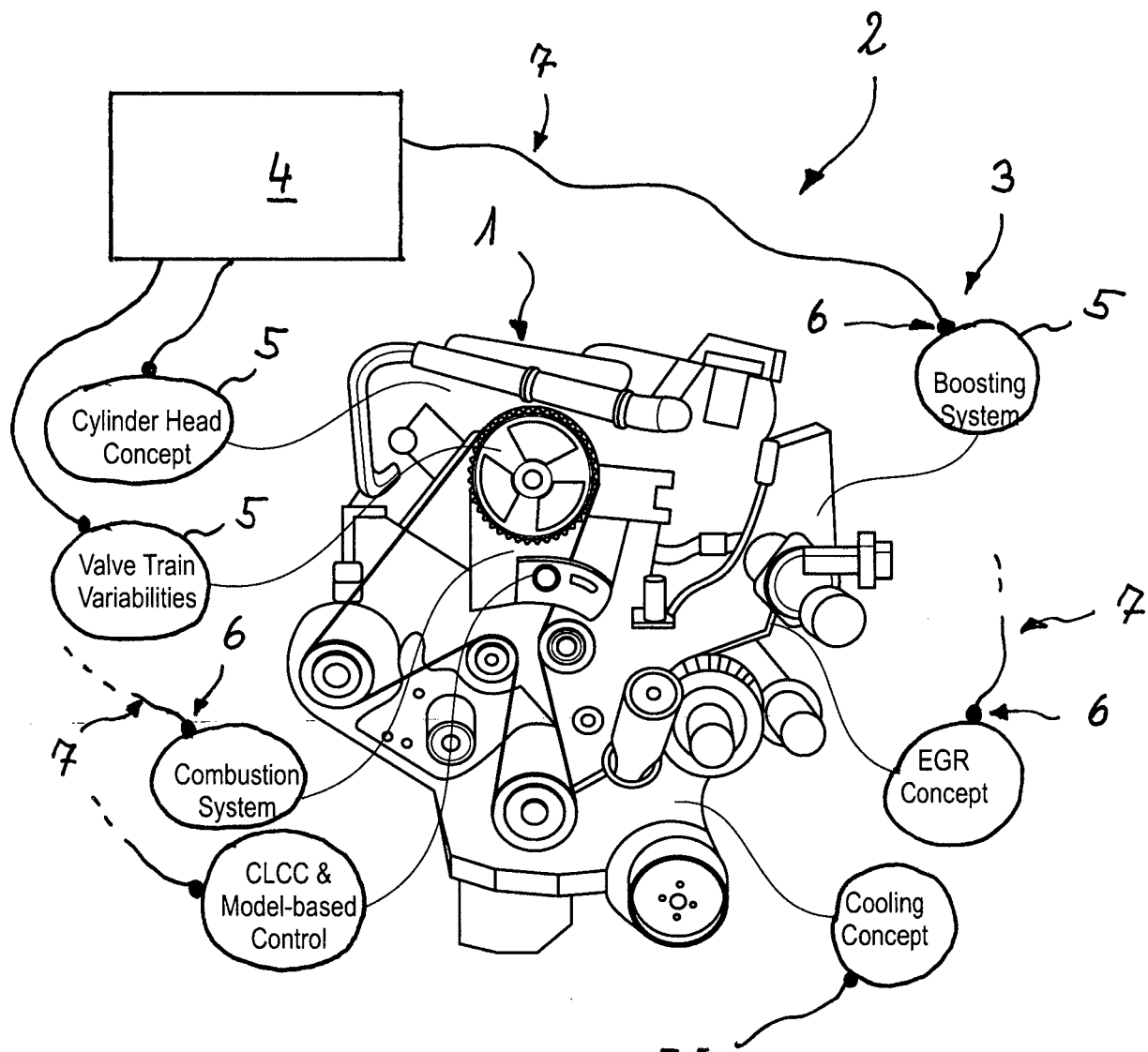


Fig. 1

2/8

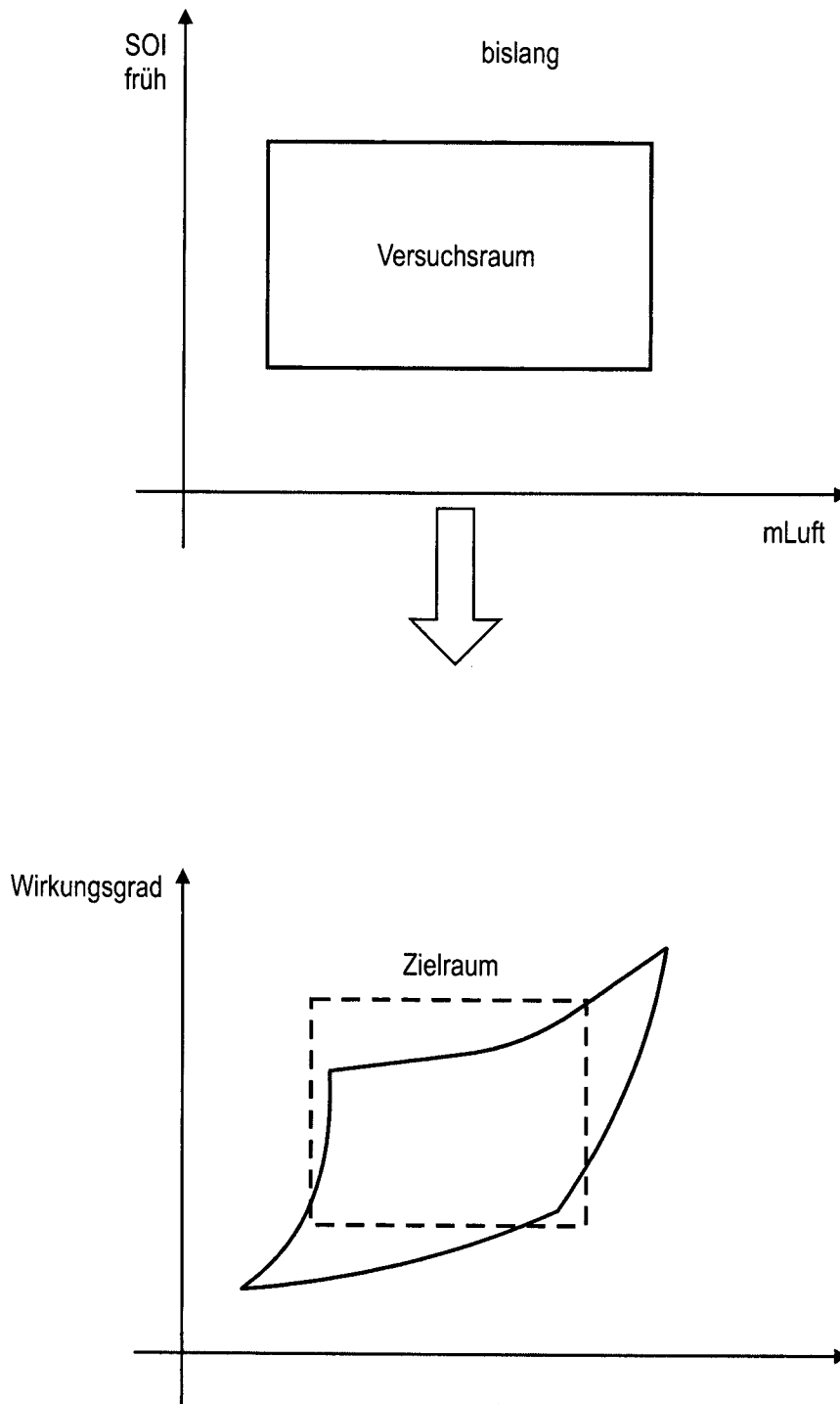


Fig. 2

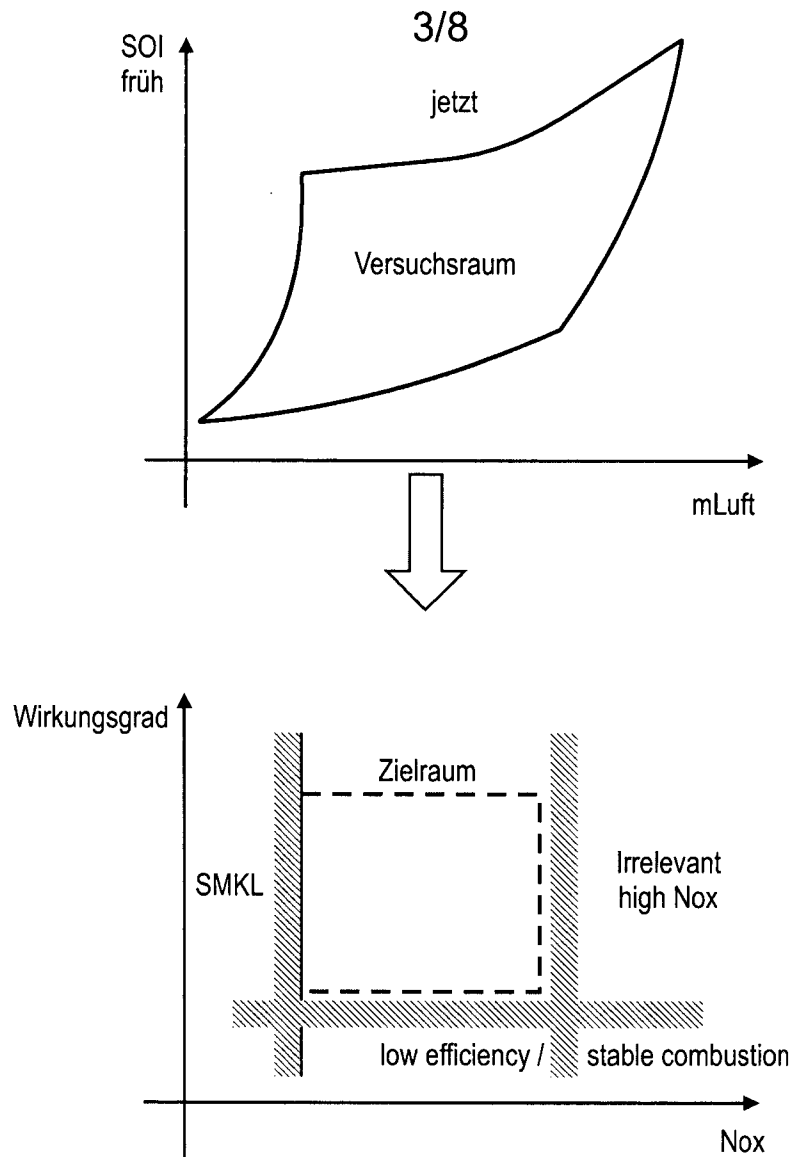


Fig. 3

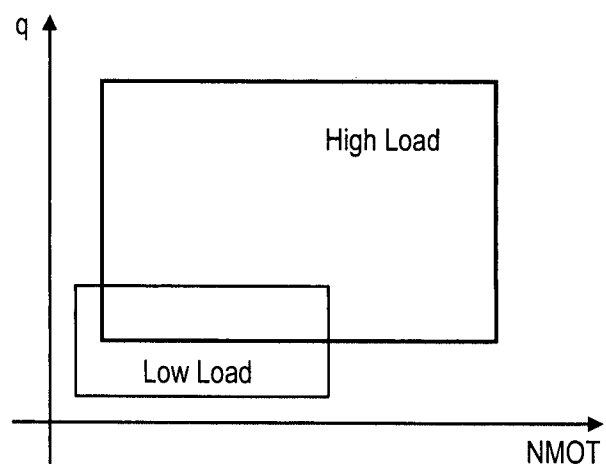


Fig. 4

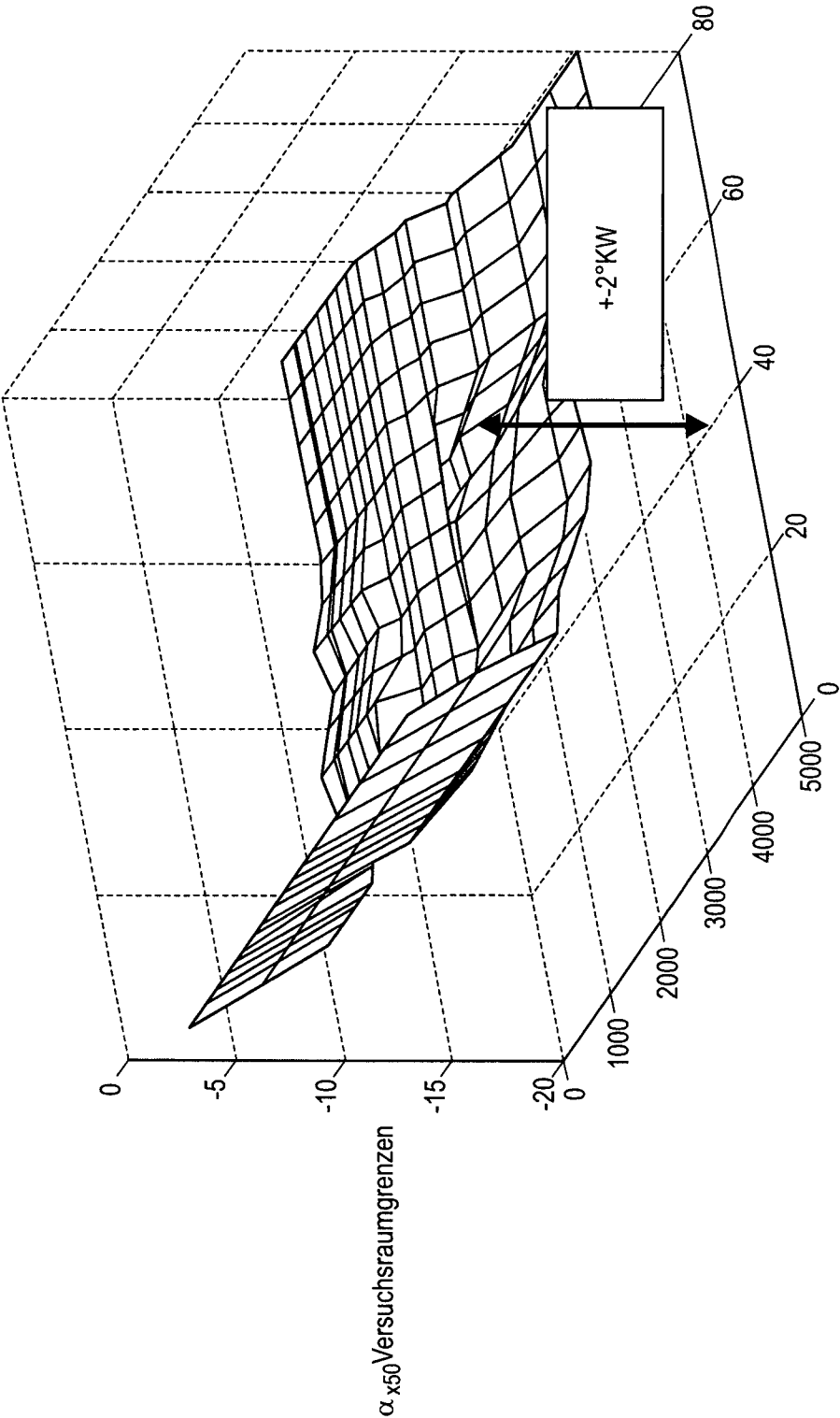


Fig. 5

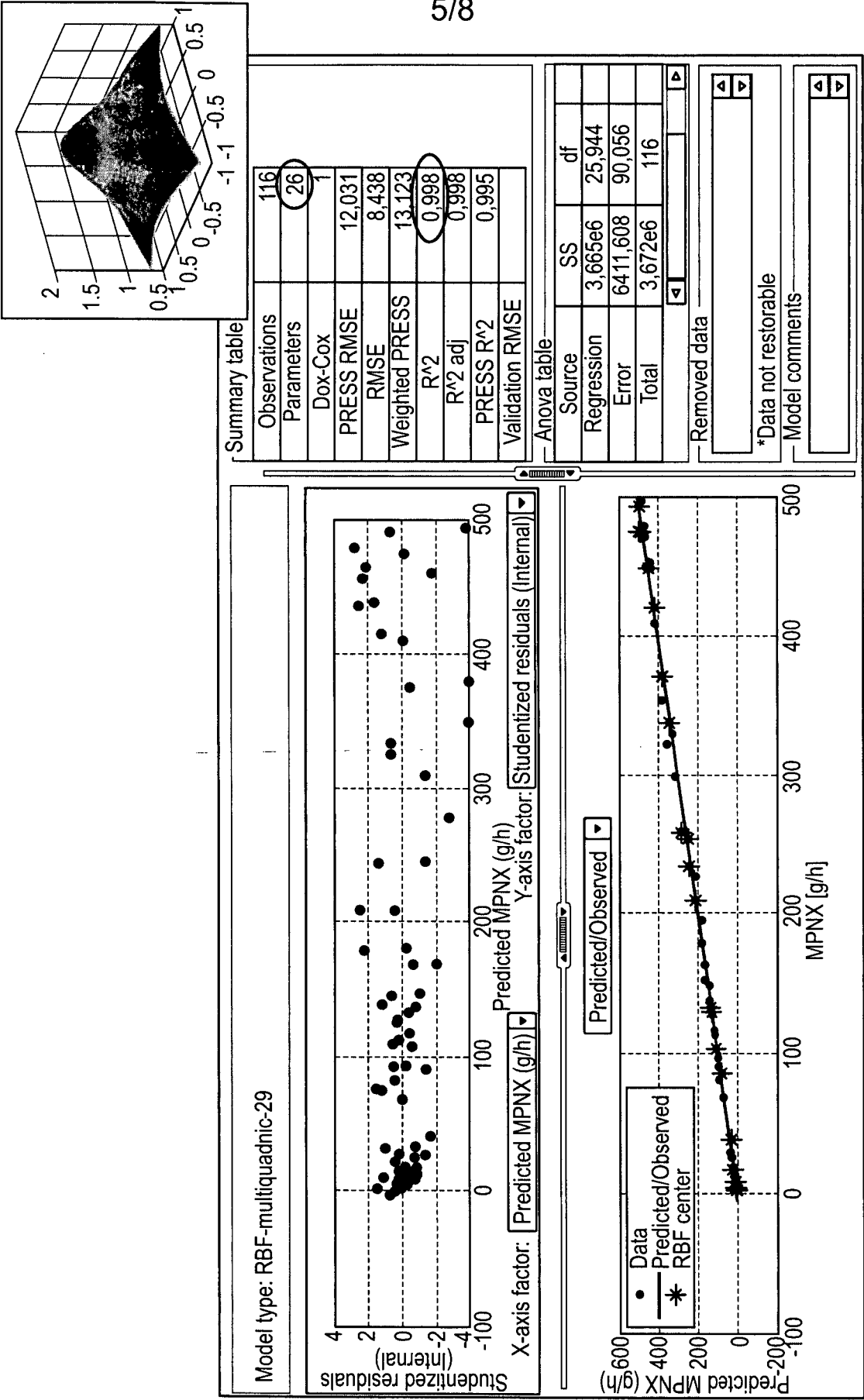


Fig. 6

6/8

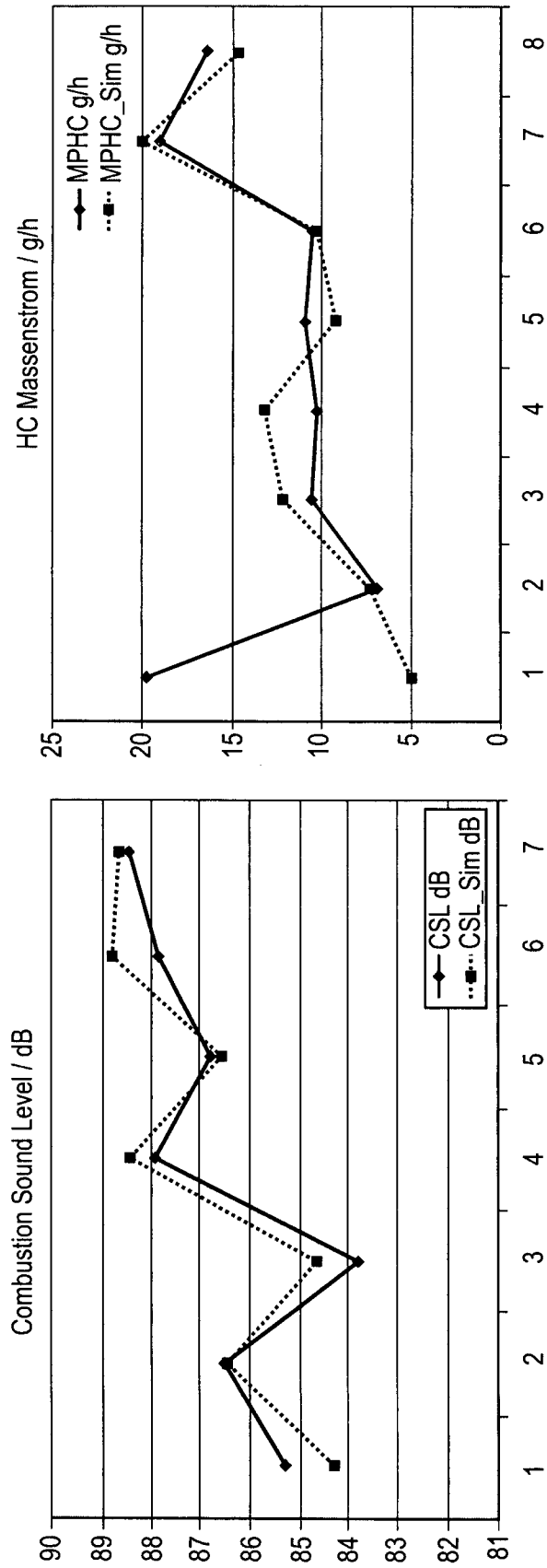


Fig. 7

7/8

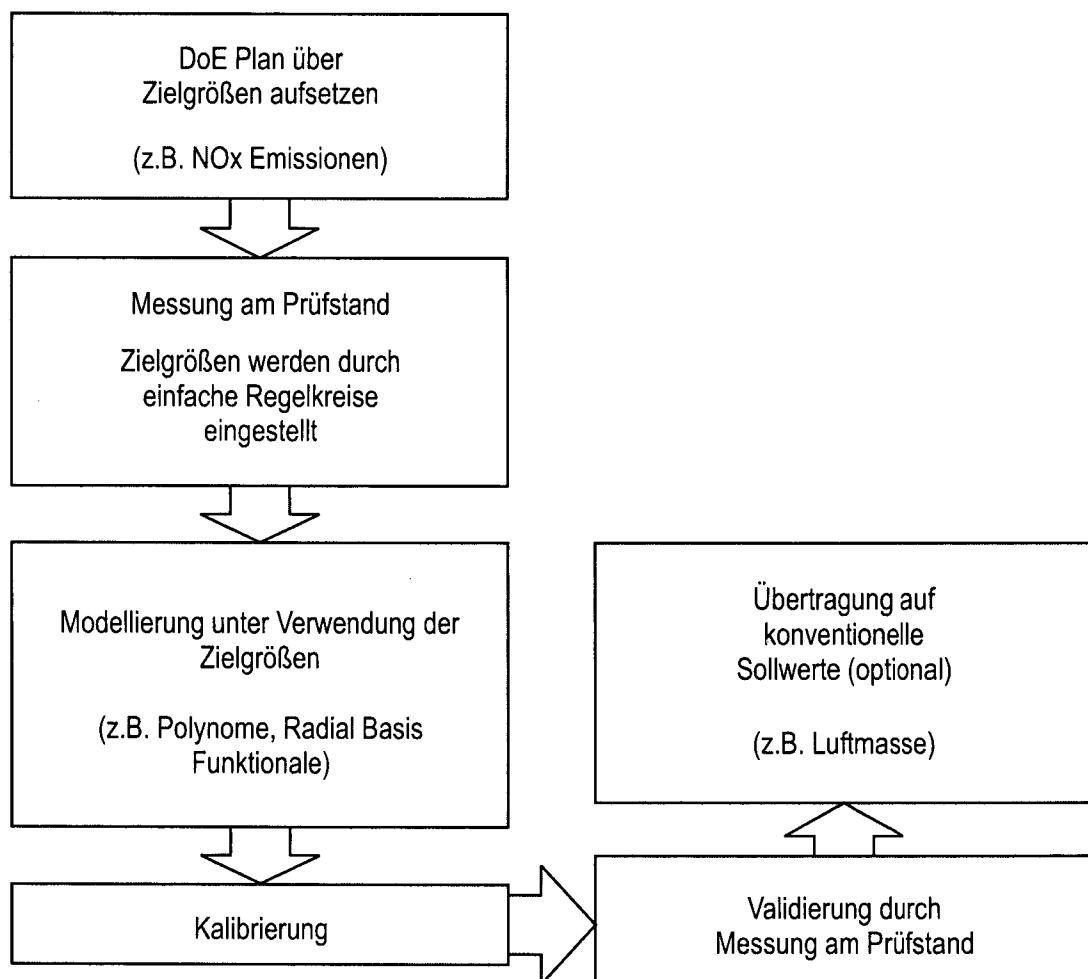


Fig. 8

8/8

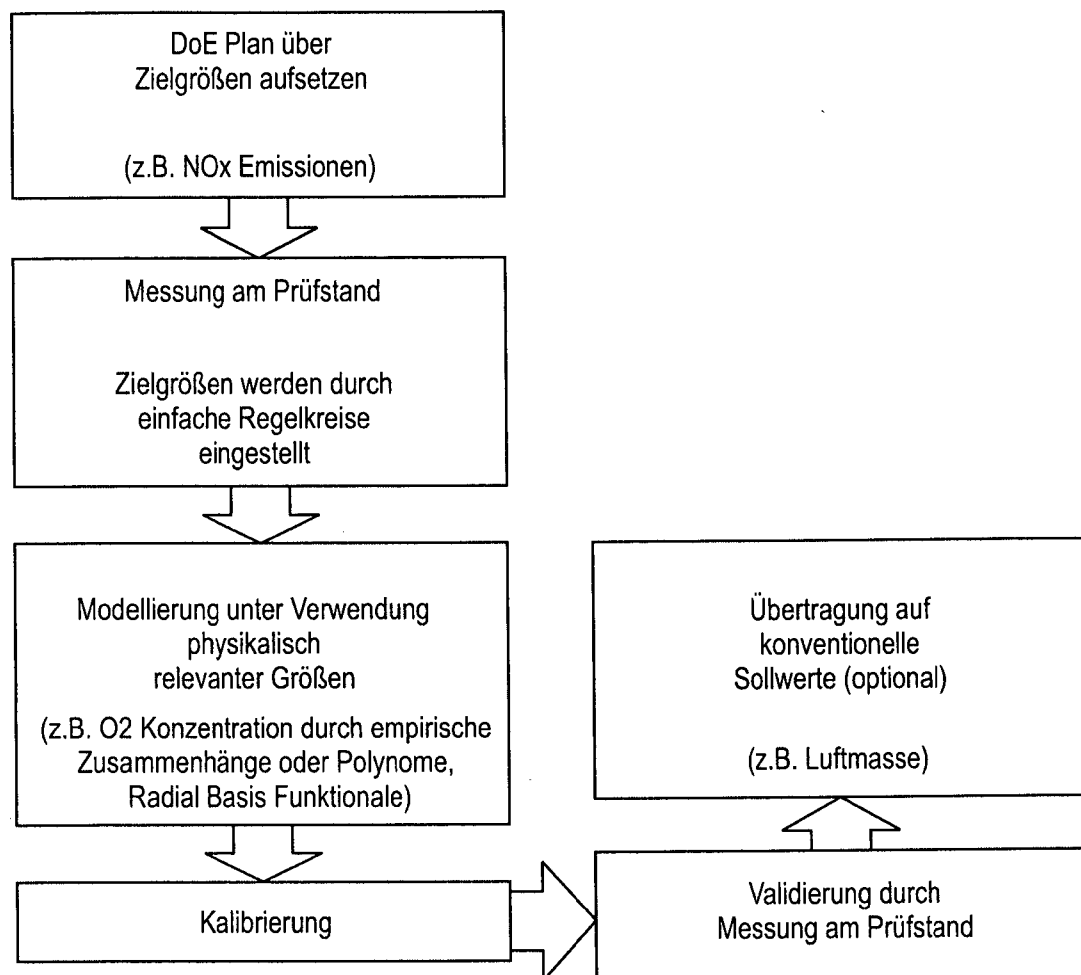


Fig. 9

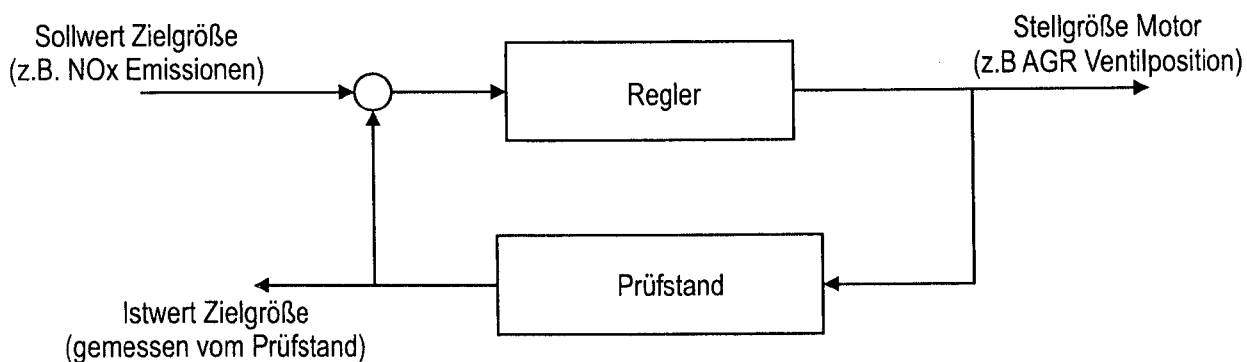


Fig. 10