

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
07.02.2007 Patentblatt 2007/06

(51) Int Cl.:
F02M 61/16 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **06117466.0**

(22) Anmeldetag: **19.07.2006**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IS IT LI LT LU LV MC NL PL PT RO SE SI SK TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
AL BA HR MK YU

(71) Anmelder: **SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT**
80333 München (DE)

(72) Erfinder:
• **Voigt, Peter**
09114 Chemnitz (DE)
• **Bullinger, Ralph**
93093 Donaustaff (DE)

(30) Priorität: **02.08.2005 DE 102005036226**

(54) **Verfahren zum Erstellen einer Baugruppe mit einem Rekursionsverfahren zur Optimierung der Baugruppe**

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Erstellen einer Baugruppe [P], mit einem Rekursionsverfahren zur Optimierung einer technischen Eigenschaft [Output,

Q_{nenn}] der Baugruppe [P] mit einer Mehrzahl von Bauteilen [Index: i], insbesondere ein Verfahren zur Optimierung einer Einspritzmenge [Q_{nenn}] eines Kraftstoffinjektors [P] für dessen verbesserte Zweitausbringung.

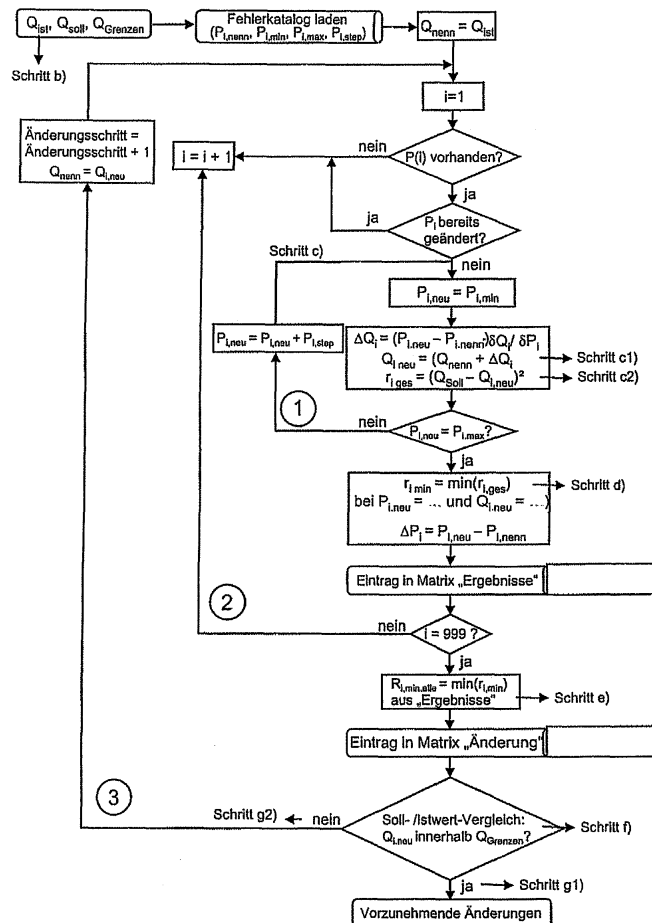


Fig. 7

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren mit einer Rekursion einer Baugruppe, insbesondere zur Optimierung einer Zweitausbringung der Baugruppe.

[0002] Bei komplexen Produkten (Baugruppen, Vorrichtungen, Einrichtungen, Systeme usw.), deren Funktionalität von mehreren Einflussgrößen abhängig ist, besteht ein Problem mit der Handhabung der Nicht-in-Ordnung-Produkte. Z. B. bei Einspritzgeräten, wie dem Pumpe-Düse-Injektor, werden die fertig montierten Pumpen vor der Auslieferung an den Kunden einer Prüfung unterzogen, wobei die Einspritzmengen bei spezifischen Lastpunkten gemessen werden. Befinden sich die Einspritzmengen nicht innerhalb eines geforderten Sollbereichs, so können die Pumpen nicht an den Kunden ausgeliefert werden. Diese Pumpen stellen zunächst einen Ausschuss dar.

[0003] Allgemeines Ziel von Entwicklung und Fertigung ist es, den Ausschuss, insbesondere bei komplexen Produkten, so gering wie möglich zu halten. Sollte eine Erstaussbringung des Produkts nicht möglich sein, ist es notwendig das Produkt derart zu konfigurieren, dass es die SOLLanforderungen erfüllt und somit wenigstens in einem zweiten Schritt den geforderten Anforderungen entspricht. Hierfür ist es erforderlich, ein sinnvolles Konzept für eine Rekursion von Nicht-in-Ordnung-Produkten zu entwickeln, um eine möglichst hohe Zweitausbringung der Produkte zu gewährleisten.

[0004] Im Stand der Technik gibt es einige Verfahren zur Rekursion, wobei z. B. die entsprechenden Produkte einer Wiederholungsmessung unterzogen werden und, wenn die Abweichung in einem bestimmten Bereich liegt, sich die Produkte dennoch für eine Ausbringung eignen. Bei anderen Verfahren werden die Produkte komplett zerlegt und die Einzelteile wieder in die Montage zurückgeführt, da bei solchen Fällen eine ungünstige Kombination aus Einzelteilen vorlag. Eine erneute Montage dieser Teile mit anderen Komponenten soll darauffolgend die Gütekriterien des fertigen Produkts wieder erfüllen.

[0005] Solche Verfahren sind ineffektiv und insbesondere letztere mit hohen Kosten verbunden.

[0006] Es ist daher eine Aufgabe der Erfindung, ein verbessertes Verfahren zum Erstellen einer Baugruppe mit einem Rekursionsverfahren zur Verfügung zu stellen, das mit geringem Aufwand und geringen Kosten die Zweitausbringung des Produkts erhöht. Insbesondere sollte eine Einflussgröße des Produkts, die für die Abweichung von einem Sollwert verantwortlich ist, durch das Rekursionsverfahren einfach zu identifizieren sein.

[0007] Die Aufgabe der Erfindung wird mittels eines Verfahrens mit einem Rekursionsverfahren gemäß dem Anspruch 1 gelöst. Vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung ergeben sich aus den Unter- bzw. Nebenansprüchen.

[0008] Erfindungsgemäß wird eine Einflussgröße, die eine Auswirkung auf ein Arbeitsergebnis (Output) des Produkts hat, bestimmt, die Einwirkung der Einflussgröße quantifiziert und parametrisiert, und durch die Wahl eines Optimierungskriteriums der oder die Parameter bestimmt, die variiert werden müssen, um Produkte mit einem minimalen Aufwand lieferfähig zu machen.

[0009] Bevorzugt werden hierfür eine Vielzahl von Parametern, die einen Einfluss auf das Produkt haben, in Form einer Funktion hinterlegt, was durch Vorversuche bzw. Simulationen erfolgt. Innerhalb eines in der Fertigung auftretenden Toleranzbereichs des Parameters wird dabei dieser Parameter variiert. Eine solche Variation wird bevorzugt durch Berechnung innerhalb des Toleranzbereichs über einen gemessenen Istwert des Outputs hinweg durchgeführt. Dies kann jedoch auch ohne Berechnung geschehen, indem entsprechende Bauteile mit Abmessungen innerhalb des Toleranzbereichs verbaut werden.

[0010] Vor der eigentlichen Rekursion werden die auftretenden Outputs des Produkts abgelegt bzw. notiert, wobei ein solcher "Scan" für jeden Parameter des Produkts durchgeführt wird. Anschließend wird derjenige Parameter innerhalb des Produkts geändert, welcher den gewünschten Output erzielt bzw. dem gewünschten Output des Produkts am nächsten kommt. Bevorzugt wird hierbei ein Residuum berechnet, indem die Mengenabweichungen an allen Prüfpunkten zusammengefasst werden. Bevorzugt geschieht dies über die Summe der kleinsten Fehlerquadrate.

[0011] Für die Parameter ergibt sich somit ein Residuum, die in auf- oder absteigender Reihenfolge geordnet werden. Der Parameter mit dem kleinsten Residuum wird anschließend dafür verwendet, den Output an allen Prüfpunkten des Produkts zu bestimmen. Liegen alle Outputs im zulässigen Toleranzbereich, so ist der Parameter für die Rekursion bestimmt und auch das Maß der Änderung.

[0012] Sollten mit einer solchen ersten Änderung nicht alle Outputs in Ordnung sein, so wird der erste geänderte Parameter in seiner Form beibehalten und anschließend das Rekursionsverfahren komplett neu durchgeführt, wobei jedoch die neuen berechneten Outputs aus der vorherigen Optimierung verwendet werden.

[0013] Es kann erfindungsgemäß eingeschränkt werden, wie viele Parameter geändert werden dürfen, sodass die Berechnung an entsprechender Stelle abbrechen kann. Ein typischer sinnvoller Wert ist der Abbruch nach drei zu ändernden Parametern.

[0014] Ein erfindungsgemäßes Ergebnis ist die Angabe derjenigen Parameter bzw. Bauteile, die zu variieren sind, sowie die Werte, um die die Parameter angepasst werden müssen. Diese Werte können die entsprechenden Absolutmaße bzw. Absolutwerte der entsprechenden Bauteile des Produkts sein, oder z. B. deren Änderungsmaß gegenüber dem momentanen Istwert. Hierbei kann der aktuelle Istwert unbekannt sein. Bei den zu ändernden Größen muss es sich nicht um Abmessungen handeln. So sind - soweit sie für das Produkt änderbar sind - alle möglichen Größen (SI-

Einheiten) des Produkts denkbar. Dies betrifft z. B. Widerstände, Kapazitäten, Zeitdauern und Zeitpunkte, Temperaturen, Energien, Impulse usw.

[0015] Das Verfahren ermöglicht eine effektive Rekursion von komplexen Produkten, die insbesondere eine Vielzahl von Forderungen bzw. Sollwerten erfüllen müssen. Hierdurch ist es möglich, eine hohe Zweitausbringung in der Fertigung des Produkts zu erreichen.

[0016] Ferner können mittels des erfindungsgemäßen Verfahrens häufig auftretende Fehlerquellen ermittelt (Einflussanalyse) und anschließend dauerhaft im Fertigungsprozess eliminiert werden, um in der Folge eine Erstaussbringung des Produkts erhöhen zu können. Dies verbessert die Erstaussbringung der Produkte signifikant, wodurch vor allem bei komplexen Produkten ein sehr hohes Kosteneinsparungspotential besteht.

[0017] Die Erfindung wird im Folgenden anhand eines Ausführungsbeispiels unter Bezugnahme auf die beigefügte Zeichnung näher erläutert. In der Zeichnung zeigen:

Fig. 1 einen Fehlerkatalog eines Pumpe-Düse-Injektors;

Fig. 2a Einspritzmengenverläufe des Pumpe-Düse-Injektors aus Fig. 1 bei Variation eines Dämpfungsspiels bzw. eines Düsenöffnungsdrucks bei jeweils zwei unterschiedlichen Betriebspunkten des Injektors;

Fig. 2b weitere Einspritzmengenverläufe des Injektors in Abhängigkeit des Dämpfungsspiels bzw. des Düsenöffnungsdrucks bei jeweils zwei weiteren zur Fig. 2a unterschiedlichen Betriebspunkten;

Fig. 3 beispielhafte Einspritzmengen bei einer Haupteinspritzung des Injektors;

Fig. 4a einen erfindungsgemäß optimierten Neuzustand des Injektors nach Anwendung eines Gradientenverfahrens;

Fig. 4b einen erfindungsgemäß optimierten Neuzustand des Injektors nach Anwendung eines Line-Search-Verfahrens;

Fig. 5a zwei suboptimale Lösungen nach einer erfindungsgemäßen Optimierung;

Fig. 5b einen erfindungsgemäß optimierten Neuzustand des Injektors nach zwei Berechnungsgängen;

Fig. 6 eine Änderung einer Einspritzmengen-Charakteristik des Injektors nach einer ersten erfindungsgemäßen Berechnung;

Fig. 7 ein Flussdiagramm eines erfindungsgemäßen Rekursionsverfahrens; und

Fig. 8 eine beispielhafte Ermittlung einer Einspritzmengenänderung des Injektors.

[0018] Die folgenden Ausführungen beziehen sich im Wesentlichen auf einen Kraftstoffinjektor, wobei das erfindungsgemäße Verfahren jedoch auf nahezu sämtliche Produkte, Bauteile, Baugruppen, Vorrichtungen, Einrichtungen, Systeme u. ä. anwendbar ist, bei welchen z. B. eine technische Eigenschaft oder ein Arbeitsergebnis (im Folgenden als Output bezeichnet) in irgendeiner Form beeinflussbar ist. Insbesondere dort, wo komplexe Zusammenhänge von z. B. Bauteilabmessungen oder elektrischen/hydraulischen Größen herrschen, also die Änderung eines einzigen Bauteils einer Baugruppe eine Auswirkung auf eine Vielzahl anderer Parameter innerhalb der Baugruppe besitzt, ist das erfindungsgemäße Verfahren anwendbar.

[0019] Bei Kraftstoffinjektoren, wie z. B. dem Pumpe-Düse-Injektor, werden die Injektoren in der Fertigung montiert und vor der Lieferung an einen Kunden einer Prüfung unterzogen, wobei die Einspritzmengen bei spezifizierten Prüfpunkten überprüft werden. Die Einspritzmengen der Injektoren ergeben sich aus einer Überlagerung von Einflüssen verschiedenster Parameter, die sich vor allem aus Fertigungstoleranzen ergeben. Diese Fertigungstoleranzen können zwar eingeschränkt werden, jedoch lassen sich die Abmessungen eines Bauteils nie auf den Nominalwert beschränken. Die Vielzahl der Parameter eines Kraftstoffinjektors und die Forderung, Vor- VE, Haupt- HE und Nachspritzmengen bei verschiedenen Lastpunkten einzuhalten, führen zu einem vieldimensionalen Problem, das mit einfachen Visualisierungen nicht mehr beschreibbar ist.

[0020] Die Kraftstoffeinspritzmenge Q eines Kraftstoffinjektors P (im Folgenden als Pumpe P bezeichnet) ist von mehreren Parametern P_i abhängig:

$$Q = f(P_1, P_2, P_3, \dots, P_n)$$

[0021] Dies führt aufgrund von Fertigungstoleranzen und durch die Montage entstehenden Toleranzketten, zu erheblichen Mengen-Schwankungen (Outputs) der Pumpen P .

[0022] Im Lastenheft ist eine sogenannte 100%-Prüfung gefordert. Das bedeutet, dass nach der Montage die Mengen der Vor- VE und der Haupteinspritzung HE jeder Pumpe P auf Prüfständen kontrolliert werden müssen. Diese Messung ist bei folgenden vier Prüfpunkten durchzuführen:

- LU: Standleerlauf ($n = 800 \text{ min}^{-1}$)
- VU: untere Volllast ($n = 1000 \text{ min}^{-1}$)

- VM: max. Drehmoment ($n = 1900 \text{ min}^{-1}$)
- VO: obere Volllast ($n = 4200 \text{ min}^{-1}$)

[0023] Beim Prüfpunkt VO findet keine Voreinspritzung VE statt. Hier wird nur die Haupteinspritzmenge HE gemessen.

[0024] Die ermittelten Mengen-Istwerte müssen mit den geforderten Sollwerten aus dem Lastenheft übereinstimmen, wobei die Sollwerte der Vor- VE und Haupteinspritzung HE innerhalb bestimmter Toleranzgrenzen variieren können.

Tabelle 1: Einspritzmengen-Sollwerte [mm^3]

Sollwerte	LU		VU		VM		VO	
	VE	HE	VE	HE	VE	HE	VE	HE
	1,5	3	1,5	45	1,5	72	-	65
1. obere Toleranz	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	-	1,5
1. untere Toleranz	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	-	1,5
2. obere Toleranz	1,0	2,4	1,0	2,4	1,0	2,4	-	2,4
2. untere Toleranz	1,0	2,2	1,0	2,4	1,0	2,4	-	2,4

[0025] Wie der obigen Tabelle 1 zu entnehmen ist, existieren zwei Toleranzbereiche: Die ersten Toleranzgrenzen sind im Lastenheft vorgeschrieben. Die Einspritzmengen Q der fertigen Pumpen P müssen sich innerhalb dieser Grenzen befinden. Der zweite Toleranzbereich stellt eine Überprüftoleranz $\ddot{U}T$ dar. Er ist bei Wiederholungsmessungen ausschlaggebend. Berücksichtigt wird hier noch zusätzlich die Messwiederholbarkeit einer Prüfeinrichtung und die Streuungen der Messergebnisse zwischen mehreren Prüfeinrichtungen (sog. Spannstellenversatz). Die Überprüftoleranz errechnet sich zu:

$$\ddot{U}T = T_1 + \sqrt{T_2^2 + T_3^2}$$

mit T_1 = Abliefertoleranz, T_2 = Messwiederholbarkeit einer Prüfeinrichtung und T_3 = Spannstellenversatz. Der Wurzel- ausdruck entspricht einer statistischen Aufsummierung, bei der verhindert wird, dass sich die Streuungen gegenseitig aufheben.

[0026] Das erfindungsgemäße Ziel ist eine Gleichstellung der Pumpen P bezüglich ihrer Einspritzmengen Q. Befindet sich eine Pumpe P nach Messung der Einspritzmengen Q zu den 100%-Prüfpunkten nicht innerhalb des geforderten Sollbereichs des Lastenhefts, ist eine Korrektur durch gezielte Veränderung geeigneter Parameter P_i der Pumpe P durchzuführen. Folgende Punkte sind zum Erreichen dieser Gleichstellung notwendig:

1. Zusammenstellung der Einflussgrößen P_i auf die Einspritzmengen Q der Pumpe P und Quantifizierung Q_i dieser Einflussparameter, und

2. Erstellung eines Rekursionsverfahrens zur Optimierung der Einspritzmengen.

[0027] Es sind also alle bzw. alle wichtigen Parameter P_i zu ermitteln, die einen Einfluss auf die Einspritzmengen Q der Pumpe P ausüben. Sie bilden den sog. Fehlerkatalog. Die jeweilige Quantifizierung Q_i dieser Einflussgrößen P_i ist notwendig, um das Verhalten auf die Einspritzmengen Q bei Variation des Parameters P_i darzustellen. Diese Abhängigkeiten werden mittels hydraulischer Versuche, Simulationen etc. in Erfahrung gebracht.

[0028] Die Istwerte aller Einflussgrößen P_i sind jedoch unbekannt. Das Verfahren kann also nur anhand der unter 1. ermittelten Abhängigkeiten und der gemessenen Einspritzmengen Q_{ist} (Istoutput; Schritt b) des Verfahrens (s. u.)) eine Optimierung durchführen. Es soll geeignete Parameter P_i und deren Dimension bestimmen, die zu ändern sind, um mit den Einspritzmengen Q in den Sollbereich zu gelangen.

[0029] Die Pumpe P besteht aus mehreren Bauteilen i. In einem in Fig. 1 dargestellten Fehlerkatalog ist eine Zuordnung der Einflussgrößen P_i zu einem jeweiligen Bereich sinnvoll, um einem strukturierten Aufbau gerecht zu werden.

[0030] Jede Einflussgröße P_i erhält eine eigene Nummer. Über sie ist der Parameter P_i eindeutig identifizierbar und ermöglicht eine einfache Automatisierung. Die Einteilung der Einflussgrößen P_i im Fehlerkatalog ist wie folgt (vgl. Fig. 1):

Tabelle 2

Parameternummer	Bereich
P001 - P299	Kopf
P200 - P399	Aktor
P400 - P599	Fuß
P600 - P799	Düse
P800 - P999	Unit

[0031] Diese Einteilung ermöglicht eine Ergänzung mit eventuellen neu auftretenden Einflussparametern P_i zu einem bestimmten Bereich.

[0032] Der Fehlerkatalog enthält zu jeder Einflussgröße P_i das Nennmaß und dessen Gültigkeitsbereich (Wertebereich), in dem er variiert werden darf. Dieser Gültigkeitsbereich ist durch seine Fertigungstoleranz, seine räumliche Gegebenheit, oder eine andere physikalische Größe (z. B. Piezo-Energiebereich) definiert. Allerdings ist nicht jede Einflussgröße P_i für eine Änderung geeignet. Feste Prozessparameter P_i (z. B. Kraftstofftemperatur) üben zwar einen Einfluss auf die Einspritzmengen Q aus, könnten aber nicht im Rahmen einer Rekursion einer Pumpe P geändert werden, da sie in keinem direkten Zusammenhang mit der Pumpe P stehen. Daher gibt die Spalte REK an, ob die Einflussgröße P_i zur Bestimmung der Rekursion verwendet werden soll oder nicht. Sie hat jedoch für eine Einflussanalyse (s. u.) der Pumpen P keine Bedeutung, da hierfür alle Kenngrößen berücksichtigt werden. Die Spalte Schrittweite (ΔP) definiert die Auflösung des Parameterwertes P_i innerhalb seines Variationsbereichs für die spätere Berechnung. Bevorzugt wird für jede Einflussgröße P_i bei der Rekursion dieselbe Anzahl von Schritten verwendet, was eine Residuenberechnung erleichtert. Zu jedem Parameter P_i ist auch eine Priorität angegeben. Die Vergabe der Prioritäten erfolgt nach der Größe des Einflusses auf eine Einspritzmengenveränderung:

Tabelle 3

Priorität	Mengeneinfluss
1	groß
2	gering
3	sehr gering

[0033] Sie hat aber keinen Einfluss auf den Programmablauf. Sie soll dem Anwender nur einen schnellen Überblick über die Wichtigkeit des jeweiligen Parameters P_i verschaffen. Die Bestimmung bzw. Auswahl der Parameters P_i entspricht einem Schritt a1) des Verfahrens (s. u.).

[0034] Eine Quantifizierung Q_i der Einwirkung auf einen Output Q (Einspritzmengen) der Pumpe P findet z. B. mittels hydraulischer Versuche und 1D-Simulationen für alle Einflussgrößen P_i statt. Sie stellen die Abhängigkeit der Einspritzmengen $Q_i = f(P_i)$ von den Parameterwerten P_i dar. Bei den Simulationen bzw. Versuchen wird immer nur ein Parameter P_i variiert, während die anderen konstant gehalten wurden. Die Änderung der Parameterwerte P_i erfolgt in definierten Schrittweiten innerhalb ihres Gültigkeitsbereichs.

[0035] Die jeweiligen Abbildungen der Fig. 2a und 2b stellen die simulierten Einspritzmengenverläufe Q der Haupteinspritzung HE in Abhängigkeit vom Dämpfungsspiel (Fig. 1: P400) und vom Düsenöffnungsdruck (Fig. 1: P600) zu den vier Prüfpunkten dar. Die Quantifizierung Q_i der Einflussgrößen entspricht einem Schritt a2) des Verfahrens (s. u.).

[0036] Die Graphen der Fig. 2a und 2b weisen ein unterschiedliches Kurvenverhalten auf. Sie können linear verlaufen, beschreiben aber auch gebrochen-rationale, Wurzel-, Exponential-, oder Polygon-Funktionen. Wie man erkennen kann, eignen sich die Parameter P400 und P600 generell zum Erhöhen, oder zum Verringern aller vier Haupteinspritzmengen. Sie wären jedoch jeweils beide für eine Optimierung äußerst ungeeignet, die eine Kombination aus Erhöhen und Absenken der Einspritzmengen Q bei den unterschiedlichen Lastpunkten erfordert, wie es beispielhaft in Fig. 3 dargestellt ist.

[0037] Im Fall der Fig. 3 müsste ein anderer Parameter P_i zur Gleichstellung verwendet werden, der eine Einspritzmengencharakteristik nach einer solchen Vorgabe besitzt.

[0038] Es ist natürlich auch möglich, dass sich eine Parametervariation gar nicht oder nur sehr gering auf eine Einspritzmenge Q auswirkt (vgl. Fig. 2b rechts oben).

[0039] Die Daten aus Versuch und Simulation sind für die Optimierung zu verwenden. Sie treffen Aussagen zur Charakteristik der Einspritzmengenverläufe der einzelnen Einflussgrößen P_i . Durch die Vielzahl an Parametern P_i und

somit den verschiedensten Kombinationen aus den Graphen der VE und HE, ist eine Gleichstellung der Pumpen P möglich.

[0040] Die zu optimierenden Einspritzmengen der Vor- VE und Haupteinspritzung HE zu den acht Betriebspunkten werden nachfolgend der Einfachheit halber als Gütekriterium G_K bezeichnet. Das Gütekriterium G_K ist von den Parametern P_i abhängig:

$$G_K = f(P_1, P_2, P_3, \dots, P_n)$$

[0041] Der Sollzustand der Gütekriteriums G_K^{soll} ist daher durch

$$G_K^{\text{soll}} = f_K(P_1^{\text{soll}}, P_2^{\text{soll}}, P_3^{\text{soll}}, \dots, P_n^{\text{soll}})$$

definiert. Der Istzustand des Gütekriteriums G_K^{ist} ist durch Messungen ermittelt worden und daher bekannt. Einen solchen Istzustand zeigt z. B. Fig. 3, welcher beispielhaft für das Folgende gelten soll.

[0042] Wenn der Istzustand nicht innerhalb des zulässigen Wertebereichs des Sollzustands liegt (s. Fig. 3), soll er durch eine gezielte Parameterveränderung dem Sollzustand angeglichen werden:

$$G_K^{\text{soll}} \approx G_K^{\text{ist}} + \underbrace{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial G_{Ki}}{\partial P_i} \cdot \Delta P_i \right)}_{\Delta G_K} \quad (1)$$

[0043] Hierbei dürfen die Parameterwerte P_i aufgrund ihrer Toleranzen nur innerhalb bestimmter Grenzen variieren:

$$P_{i, \min} \leq P_i \leq P_{i, \max}$$

[0044] Das partielle Differential in Gleichung 1 stellt die Änderung des Gütekriteriums über dem jeweiligen Parameter P_i dar. Multipliziert mit den Parameteränderungen P_i ergibt sich daraus eine Änderung des Gütekriteriums ΔG_K :

$$\Delta G_K = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial G_{Ki}}{\partial P_i} \cdot \Delta P_i \right) \quad (2)$$

[0045] Es sei an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass das Gütekriterium G_K die zu optimierenden Einspritzmengen Q darstellt. Somit beeinflusst eine Parametervariation die Mengen der Vor- VE und Haupteinspritzung HE zu allen Prüfpunkten.

[0046] Im Folgenden werden zwei Lösungsverfahren (Gradienten-Verfahren und Line-Search-Verfahren) für das Optimierungsproblem vorgestellt.

[0047] Beim Gradienten-Verfahren ist der Gradient $\text{grad}U$ eines skalaren Ortsfelds $U(x,y,z)$ bzw. $U(\vec{r})$ das Vektorfeld, das jedem Punkt des skalaren Felds U einen Vektor in Richtung größter Funktionszunahme zuordnet. Als skalares Feld wird eine skalare Größe U bezeichnet, die eine differenzierbare Funktion darstellt:

$$\vec{V}(\vec{r}) = \text{grad}U(\vec{r})$$

[0048] Das Gütekriterium G_K ist eine Funktion bzw. skalare Größe, die o. g. Definition entspricht. Die Parameter (Variablen) sind im Vektor $\vec{p}$ enthalten. Die Gleichung beschreibt also das totale Differential des skalaren Felds $G_K(\vec{p})$:

$$dG_K = \frac{\partial G_{K1}}{\partial P_1} \cdot dP_1 + \frac{\partial G_{K2}}{\partial P_2} \cdot dP_2 + \frac{\partial G_{K3}}{\partial P_3} \cdot dP_3 + \dots + \frac{\partial G_{Kn}}{\partial P_n} \cdot dP_n =$$

$$= \text{grad}G_K \cdot d\vec{p}$$

[0049] Die obigen partiellen Differentiale stellen die Richtungsableitungen zu den Parametern dar. Die Optimierungsaufgabe ergibt sich jetzt zu:

$$G_K^{\text{soll}} \approx G_K^{\text{ist}} - \text{grad}G_K \cdot d\vec{p}$$

[0050] Beim Gradienten-Verfahren werden verbesserte Werte in Richtung des stärksten Abstiegs gesucht. In der Regel geht man jedoch so lange in eine Richtung, bis man die tiefste Stelle erreicht hat (= Line-Search). Erst jetzt wird wieder ein neuer Gradient berechnet um dem Minimum der Funktion näher zu kommen. Eine Optimierung der Gleichung (1) mit dem Gradienten-Verfahren, würde das optimale Ergebnis (Neuzustand = Sollwert) liefern. Dies ist in Fig. 4a dargestellt.

[0051] Da eine Änderung aller Parameter P_i sehr zeitaufwendig und mit hohen Kosten verbunden ist, wird bevorzugt die Variation nur eines Parameters P_i angestrebt. Ferner ist die Anwendung des Gradienten-Verfahrens meist nicht möglich, da die Funktion, die die Abhängigkeit des Gütefunktional von allen Parametern P_i beschreibt, oft unbekannt ist. Im vorliegenden Ausführungsbeispiel ist zur Ermittlung der Einspritzmengenverläufe Q_i immer nur eine Einflussgröße P_i variiert worden, während die anderen konstant gehalten wurden. Die partiellen Ableitungen können daher nicht berechnet werden. Es kann bei diesem Ausführungsbeispiel nur eine suboptimale Lösung ermittelt werden, die auf einem Line-Search basiert.

[0052] Der Line-Search entspricht einer direkten eindimensionalen Suche. Das optimale Ergebnis (Neuzustand = Sollwert) ist mit diesem Verfahren nicht erreichbar. Ziel ist es hier, mit den neu ermittelten Werten innerhalb des zulässigen Wertebereichs des Sollzustands zu gelangen, was in Fig. 4b dargestellt ist.

[0053] Der Line-Search ermittelt alle möglichen Neuzustände bei Variationen einer einzigen Einflussgröße:

$$G_{K1}^{\text{neu}} = G_K(P_1^{\text{variiert}}, P_2^{\text{soll}}, P_3^{\text{soll}}, \dots, P_n^{\text{soll}})$$

$$G_{K2}^{\text{neu}} = G_K(P_1^{\text{soll}}, P_2^{\text{variiert}}, P_3^{\text{soll}}, \dots, P_n^{\text{soll}})$$

...

$$G_{Kn}^{\text{neu}} = G_K(P_1^{\text{soll}}, P_2^{\text{soll}}, P_3^{\text{soll}}, \dots, P_n^{\text{variiert}})$$

[0054] Die Neuzustände sind jetzt nur noch von jeweils einem variablen Parameter P_i abhängig. Da die partiellen Ableitungen der anderen konstant gehaltenen Parameter P_i wegen $\Delta P = 0$ entfallen, vereinfacht sich die Gleichung (1) zu:

$$G_{Ki}^{neu} = G_K^{ist} + \frac{dG_{Ki}}{dP_i} \cdot \Delta P_i$$

[0055] Mit Hilfe eines Vergleichs des Sollzustands mit den ermittelten Neuzuständen, ist es jetzt möglich, einen geeigneten Parameter P_i und dessen Wert zu ermitteln, dessen Neuzustand innerhalb des zulässigen Sollbereichs liegt:

$$G_K^{soll,unten} \leq G_{Ki}^{neu} \leq G_K^{soll,oben} \quad (3)$$

[0056] Sollte eine Parameteränderung dem Wertebereich des Sollzustandes nicht genügen, kann durch Variation weiterer Einflussgrößen P_i das gewünschte Ziel erreicht werden. Auf diese Möglichkeit wird jedoch erst später eingegangen. Um einer logischen Reihenfolge gerecht zu werden, ist erst die Erläuterung des Verfahrens zur Ermittlung eines geeigneten Parameters P_i nötig.

[0057] Das zu optimierende Gütekriterium G_K besteht aus mehreren Einspritzmengen $Q_{i,j,k}$:

$$Q_{i,j,k}^{neu} = Q_{j,k}^{ist} + \frac{dQ_{i,j,k}}{dP_i} \cdot \Delta P_i \quad (4)$$

i: Parameter;

j: Art der Einspritzung (j=1: Voreinspritzung VE, j=2: Haupteinspritzung HE);

k: Prüfpunkt (k=1: LU; k=2: VU; k=3: VM; k=4: VO)

[0058] Mit der Gleichung (3) ergibt sich die Optimierungsaufgabe zu:

$$Q_{j,k}^{soll,min} \leq Q_{j,k}^{ist} + \frac{dQ_{i,j,k}}{dP_i} \cdot \Delta P_i \leq Q_{j,k}^{soll,max} \quad (5)$$

D. h. der Line-Search für die Bestimmung der einzelnen Neuzustände zu jedem Parameter P_i muss für jeden Betriebspunkt j, k und jede Einspritzart VE, HE durchgeführt werden:

$$Q_{i,1,1}^{neu} = Q_{1,1}^{ist} + \frac{dQ_{i,1,1}}{dP_i} \cdot \Delta P_i$$

$$Q_{i,1,2}^{neu} = Q_{1,2}^{ist} + \frac{dQ_{i,1,2}}{dP_i} \cdot \Delta P_i$$

...

$$Q_{i,2,4}^{neu} = Q_{2,4}^{ist} + \frac{dQ_{i,2,4}}{dP_i} \cdot \Delta P_i$$

Basierend auf den bisherigen Erkenntnissen sind zur Veranschaulichung der Anforderungen zunächst zwei Beispiele angegeben. Die beiden Lösungsansätze führen die Optimierung mittels Iteration der Gleichung (5) auf zwei verschiedene

Arten durch. Ferner sind die Probleme bzw. Fragen angegeben, die sich aus ihrer Anwendung ergeben würden. Die folgenden Beispiele sind nicht als ausgearbeitete Lösungsvorschläge anzusehen. Sie sollen lediglich dem Verständnis dienen, die Problematik näher bringen und auf wichtige Kriterien hinweisen, die eine Lösung erfüllen muss.

5 Beispiel 1: Iterative Optimierung der acht Gleichungen unabhängig voneinander: => jede Gleichung wird separat optimiert

[0059]

10

$$Q_{1,1}^{\text{soll,min}} \leq Q_{1,1}^{\text{ist}} + \frac{dQ_{i,1,1}}{dP_i} + \Delta P_i \leq Q_{1,1}^{\text{soll,max}}$$

15

$$Q_{1,2}^{\text{soll,min}} \leq Q_{1,2}^{\text{ist}} + \frac{dQ_{i,1,2}}{dP_i} + \Delta P_i \leq Q_{1,2}^{\text{soll,max}}$$

...

20

$$Q_{2,4}^{\text{soll,min}} \leq Q_{2,4}^{\text{ist}} + \frac{dQ_{i,2,4}}{dP_i} + \Delta P_i \leq Q_{2,4}^{\text{soll,max}}$$

25

[0060] Mit sehr großer Wahrscheinlichkeit werden durch diese Iteration der acht Gleichungen mehrere verschiedene Parameter P_i bestimmt. Ferner besteht die Möglichkeit, dass zu einem Parameter P_i mehrere verschiedene Parameterwerte P_i errechnet werden. Wenn keine Lösung gefunden wurde: Welcher Parameter P_i würde das bestmögliche Ergebnis liefern um dem Sollbereich näher zu kommen?

30

[0061] Da ein Parameter P_i nicht gleichzeitig zwei oder mehrere verschiedene Werte annehmen kann, ist eine Optimierung der Gleichungen unabhängig voneinander meist ungeeignet. Eine Lösung bestehend aus mehreren Parametern P_i ist unbrauchbar. Sie entspricht nicht der Optimierungsaufgabe, einen einzigen geeigneten Parameter P_i und dessen Wert zu ermitteln, um ins Zielfenster zu gelangen. Es kann jedoch Situationen geben, bei welchen solch ein Vorgehen vorteilhaft ist. Dies muss jedoch im Einzelfall entschieden werden.

35

Beispiel 2: Iterative Optimierung der acht Gleichungen abhängig voneinander: => Optimierung der Gleichungen in Matrizenform

[0062]

40

$$Q_{j,k}^{\text{soll,min}} \leq Q_{j,k}^{\text{ist}} + \frac{dQ_{i,j,k}}{dP_i} \cdot \Delta P_i \leq Q_{j,k}^{\text{soll,max}}$$

45

[0063] Die hierbei auftauchenden Fragen sind: Wenn mehrere Lösungen gefunden wurden: Welche ist die Beste? Wenn keine Lösung gefunden wurde: Welcher Parameter P_i würde das bestmögliche Ergebnis liefern um dem Sollbereich näher zu kommen?

50

[0064] Eine Lösung bestehend aus mehreren Parametern P_i ist nun ausgeschlossen. Ebenfalls ist es auch nicht mehr möglich, zu einem Parameter P_i mehrere verschiedene Werte zu erhalten. Die Frage nach der besten Lösung kann jedoch auch hier nicht beantwortet werden.

55

[0065] Die Notwendigkeit nach der Suche der besten Lösung, veranschaulicht Fig. 5a. Beide Lösungen der Fig. 5a liegen im Sollbereich. Wie aus der Abbildung ersichtlich ist, liegen die berechneten Einspritzmengen Q der Lösung 1 näher an den Grenzwerten, während die Lösung 2 nahe den Sollwerten ist. Da Berechnungen für gewöhnlich von der Praxis abweichen, ist es daher besser den ermittelten Parameter P_i der Lösung 2 entsprechend zu ändern, da hier die Wahrscheinlichkeit größer ist, mit den neuen Einspritzmengen $Q_{i,\text{neu}}$ tatsächlich in den Sollbereich zu gelangen.

[0066] Ebenfalls notwendig ist eine Suche nach dem bestmöglichen Ergebnis, wenn keine Lösung gefunden wurde. Auf diese Weise hat man eine erst Änderung ermittelt, die durchzuführen ist, um dem Sollbereich näher zu kommen.

Eventuell bedarf es dann nur noch einer zweiten Parameteränderung P_i um in das gewünschte Zielfenster zu gelangen. Dies verdeutlicht Fig. 5b.

[0067] Der zur Bestimmung der besten Lösung verwendete Algorithmus basiert auf der Gaußschen Minimumbedingung. Die Gaußsche Minimumbedingung, auch "Methode der kleinsten Quadrate" genannt, wird in Ausgleichs- und Fehlerrechnungen verwendet.

$$Q := \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 = \sum_{i=1}^n v_i^2 \rightarrow \min \quad (6)$$

[0068] Dieses Verfahren dient der Suche nach einer Approximationsfunktion $y = f(x)$ zu mehreren Wertepaaren (x_i, y_i) mit $i = 1, \dots, n$. Dabei werden die vertikalen Abweichungen v_i (= Residuen, Approximationsfehler) der Werte y_i zu den berechneten Funktionswerten $f(x_i)$ bestimmt. Mit der Forderung, dass die Summe Q der Quadrate der Abweichungen v_i minimal sein muss, erhält man die bestmögliche Annäherung an die Wertepaare. (Mit Q sind hier keine Einspritzmengen gemeint.)

[0069] Bei geeigneter Wahl von f (z. B. Ausgleichspolynome, gebrochen rationale Ansatzfunktionen, usw.) werden so die Koeffizienten der Approximationsfunktion ermittelt. Durch Quadrieren der Residuen werden negative Beträge ausgeschlossen, die sich andernfalls bei der Summenbildung eventuell aufheben würden. Die Anforderungen an die Lösung der Optimierungsaufgabe werden von diesem Verfahren, auch Residuenverfahren genannt, erfüllt.

[0070] Ausgehend von der Theorie der Gaußschen Minimumbedingung in Kombination mit dem Line-Search-Verfahren wird der Algorithmus in folgender Form gestaltet und die Gleichung (6) modifiziert:

$$r_{i, \text{ges}} := \sum_{k=1}^4 \left(\sum_{j=1}^2 (Q_{j,k}^{\text{sol}} - Q_{i,j,k}^{\text{neu}})^2 \right) \rightarrow \min$$

i: Parameter;

j: Art der Einspritzung (j=1: Voreinspritzung VE, j=2: Haupteinspritzung HE);

k: Prüfpunkt (k=1: LU, k=2: VU, k=3: VM, k=4: VO).

[0071] Durch Variation der Parameterwerte P_i innerhalb ihrer zulässigen Grenzen erhält man nun nach Gleichung (4)

alle möglichen Neuzustände $Q_{i,j,k}^{\text{neu}}$ zu einem Parameter i . Die so berechneten Einspritzmengen werden jetzt wiederum einzeln mit den zugehörigen Sollzuständen $Q_{i,j,k}^{\text{sol}}$ verglichen; es entstehen die Residuen $r_{i,j,k}$. Die Summe der so berechneten Abweichungen bildet das Gesamtresiduum $r_{i, \text{ges}}$.

$$r_{i, \text{ges}} := \sum_{k=1}^4 \left(\sum_{j=1}^2 r_{i,j,k} \right) \rightarrow \min$$

[0072] Mit der Forderung, dass das Residuum minimal sein muss, d. h. die Abweichungen am geringsten sind, ist die Wahrscheinlichkeit groß, eine mögliche Lösung des Problems zu erhalten. Es wird der optimale Parameterwert P_i ermittelt, bei dem das Mengenresiduum $r_{i, \text{ges}}$ minimal ist.

[0073] Um der Anforderung, den besten Parameter P_i zu ermitteln, gerecht zu werden, wird dieser Vorgang für alle Parameter P_i wiederholt. Aus der so berechneten Vielzahl an Residuen wird nun die Lösung mit dem kleinsten Residuum gesucht.

[0074] Eine mögliche Lösung der Optimierungsaufgabe ist dann gefunden, wenn jetzt noch die zugehörigen, berechneten Einspritzmengen $Q_{j,k}$ innerhalb des zulässigen Wertebereichs des Sollzustands liegen:

$$Q_{j,k}^{\text{soll,min}} \leq Q_{i,j,k}^{\text{neu}} \leq Q_{j,k}^{\text{soll,max}}$$

5 **[0075]** Ist dies nicht der Fall, ist automatisch die bestmögliche Änderung ermittelt worden, die durchzuführen ist, um in die Nähe des Zielfensters zu gelangen. Die Änderung weiterer Parameter P_i ist jetzt notwendig um die Pumpe P in den Sollbereich zu bringen.

[0076] Durch die Variation eines Parameters P_i verändert sich auch die Charakteristik der Einspritzmengenverläufe, also die Lage der einzelnen Einspritzmengen zueinander, was in Fig. 6 dargestellt ist.

10 **[0077]** Daher ist es jetzt nicht möglich, das nächste kleinste Residuum der ersten Berechnung für eine zweite Änderung zu verwenden. Es ist also ein weiterer Berechnungsgang notwendig, bei dem die berechneten, neuen Einspritzmengen Q der vorherigen Berechnung herangezogen werden. Dieser Vorgang ist so oft zu wiederholen, bis das gewünschte Ziel erreicht ist.

[0078] Die weiteren Änderungen sind jedoch nicht ganz korrekt. Bei den Simulationen (z. B. 1D-Simulation) bzw. 15 Versuchen (z. B. hydraulische Versuche) für die Zusammenstellung der Einflussfunktionen Q_i auf die Einspritzmengen Q wurde immer nur ein Parameter P_i variiert, während die anderen auf Nennmaß konstant gehalten wurden. Diese Daten werden für die Berechnung verwendet. Nach der ersten Parameteränderung verlieren also die Daten der anderen Einflussgrößen P_i ihre Gültigkeit. Sind mehrere Änderungen zum Erreichen des Zielfensters notwendig, müsste nach dem erste Line-Search der Gradient mit den Daten der aktuellen Position im skalaren Feld neu berechnet werden, um 20 so erneut den Weg des steilsten Abstiegs zu erhalten. Diese Vorgehensweise wäre mathematisch korrekt, kann aber hier nicht durchgeführt werden, da die Funktion des Gütefunktional in Abhängigkeit von allen Einflussgrößen P_i unbekannt ist.

[0079] Diesem Problem kann dadurch begegnet werden, indem Einflussfunktionen P_i der einzelnen Einspritzmengen Q in Abhängigkeit von allen Einflussgrößen P_i aufgestellt werden. Die entsprechenden Einflussfunktionen Q_i können z. 25 B. mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation bestimmt werden. Der Fehler, der sich nach einer Änderung aus einer erneuten Anwendung des Line-Search ergibt ist damit beseitigt. Bei der Monte-Carlo-Simulation werden Pumpenparameter P_i statistisch simuliert, wobei hierbei Einflussfunktionen Q_i aufgestellt werden, die alle anderen Pumpenparameter P_i berücksichtigen.

[0080] Generell findet eine Quantifizierung der Einflussgrößen P_i in Form von Einflussfunktionen Q_i derart statt, dass 30 Versuche und Simulationen miteinander abgeglichen werden, um für das erfindungsgemäße Verfahren zuverlässige Ergebnisse zu bekommen. Dies kann z. B. durch Fertigungsanalysen, Vorversuche, Versuche und/oder Simulationen, insbesondere der eben erwähnten Monte-Carlo-Simulation, sowie durch 1D- und 2D-Simulationen erfolgen. Insbesondere Fertigungsanalysen eignen sich sehr gut zur Aufstellung entsprechender Einflussfunktionen Q_i , wodurch der Herstellungsprozess der Pumpen P sehr gut mathematisch abgebildet werden kann und entsprechende Einflussfunktionen 35 Q_i aufstellbar sind, die mittels des Rekursionsverfahrens einerseits optimierbar sind und andererseits aufgrund der Ergebnisse aus der Rekursion entsprechende Eingriffe in der Fertigung getätigt werden können, um aufgrund dieser Erkenntnisse die Erstausrüstung der Pumpen P zu erhöhen.

[0081] Ferner sind nur die gemessenen Einspritzmengen-Istwerte $Q_{j,k}$ der Pumpen P bekannt, nicht aber die Istwerte der Parameter P_i selbst. Die Optimierung der Pumpen P kann also nur anhand der gemessenen Mengen Q_{ist} erfolgen. 40 Daher wird angenommen, dass der Parameterwert P_i in der Realität im Idealfall genau das Nennmaß hat. Die Mengenabweichungen Q nach Gleichung (4) werden also zwischen dem Parameter-Nennwert und dem aktuellen Parameterwert berechnet, der sich aus dem Durchlaufen der Programmschleife ergibt. Um hierfür noch genauere Ergebnisse erzielen zu können, kann beispielsweise im Fehlerkatalog anstelle des Parameternennmaßes auch ein Wert hinterlegt werden, der durch Fertigungsanalysen (z. B. Gaußverteilung) in Erfahrung gebracht wurde. Sind andererseits die Istwerte der 45 Parameter P_i bekannt so ist es selbstverständlich möglich diese statt deren Nennwerten beim erfindungsgemäßen Verfahren anzuwenden.

[0082] Im Folgenden wird eine softwaretechnische Umsetzung des oben beschriebenen Rekursionsverfahrens erläutert. Diese softwaretechnische Umsetzung ist beispielhaft und die Erfindung soll nicht darauf beschränkt sein.

[0083] Bevorzugt wird der in Fig. 1 beispielhaft dargestellte Fehlerkatalog in einem bestimmten Format in einer EXCEL- 50 Tabelle abgelegt, auf welches ein MATLAB-Programm zugreift. Ferner greift das MATLAB-Programm auf die Simulations- und Versuchsdaten der Einflussfunktionen Q_i zu, wobei diese Daten bevorzugt in einem txt-Format vorliegen. Ferner greift das MATLAB-Programm auf eine Datei zu, in welcher die Sollwerte Q_{soll} und Toleranzbereiche Q_{Grenzen} der Einspritzmengen Q abgelegt sind. Bevorzugt liegt diese Datei ebenfalls im txt-Format vor. Dadurch, dass das Programm gesondert auf diese Datei mit den Sollwerten Q_{soll} und Toleranzbereichen Q_{Grenzen} zugreift ist eine einfache 55 Änderung bzw. Anpassung j, k der Prüfpunkte bzw. Einspritzmengen Q, z. B. für eine Nacheinspritzung, gewährleistet.

[0084] Der in der EXCEL-Tabelle abgelegte Fehlerkatalog ist in Fig. 1 dargestellt. Hierbei besitzt jede Einflussgröße P_i eine eigene Nummer. Die Einteilung der Kenngrößen im Fehlerkatalog entspricht der Tabelle 2 (s. o.).

[0085] Diese Einteilung ermöglicht eine ständige Ergänzung mit eventuell neu auftretenden Einflussparametern P_i zu

einem bestimmten Bereich. Der Fehlerkatalog enthält zu jedem Parameter P_i das Nennmaß $P_{i,nenn}$ und dessen Gültigkeitsbereich $P_{i,min}$ bis $P_{i,max}$, in dem er variiert werden darf. Dieser Gültigkeitsbereich ist durch seine Fertigungstoleranz, seine räumliche Gegebenheit, oder eine andere physikalische Größe definiert. Allerdings ist nicht jede Kenngröße für eine Änderung geeignet. Feste Prozessparameter üben zwar einen Einfluss auf die Einspritzmenge Q aus, können aber nicht im Rahmen einer Rekursion geändert werden, da sie in einem direkten Zusammenhang mit der Pumpe P stehen. Daher gibt die Spalte REK an, ob das Programm die Einflussgröße zur Bestimmung der Rekursion verwenden soll, oder nicht. Sie hat jedoch für eine separat von einer Rekursion durchzuführende Einflussanalyse keine Bedeutung, da hier alle Kenngrößen berücksichtigt werden. Die Spalte Schrittweite ΔP definiert die Auflösung des Parameterwerts P_i innerhalb seines Variationsbereichs für die spätere Berechnung.

[0086] Zu jedem Parameter P_i ist auch eine Priorität angegeben. Die Vergabe der Prioritäten nach der Größe des Einflusses auf eine Einspritzmengenveränderung ΔQ ist in Tabelle 3 dargestellt (s. o.). Sie hat aber keinen Einfluss auf den Programmablauf. Sie soll dem Anwender nur einen schnellen Überblick über die Wichtigkeit des jeweiligen Parameters P_i verschaffen. Genau so verhält es sich auch mit den Angaben zum Musterstand und zur Auswertung der Versuchs- bzw. Simulationsergebnisse (s. Fig. 1 rechts). Falls der Anwender eine Auswertung über die Einspritzverläufe Q_i über einem bestimmten Parameter P_i einsehen will, findet er hier gleich die Bezeichnung des zugehörigen Berichts. Die Aktualität der Daten ist mit der Angabe des Musterstandes schnell ersichtlich. Bei mehreren Anwendern ist es sinnvoll diese Datei nur schreibgeschützt anzuzeigen.

[0087] Folgende Daten werden aus der EXCEL-Tabelle "Fehlerkatalog" importiert:

- Parameternummer P_i
- Bezeichnung
- Nennmaß $P_{i,nenn}$
- Einheit
- oberes Abmaß $P_{i,max}$
- unteres Abmaß $P_{i,min}$
- REK (Indikator für Berechnungsart Rekursion)
- Schrittweite ΔP , $P_{i,step}$

[0088] Probleme beim Importieren der Daten ergeben sich, wenn in der EXCEL-Datei einzelne Zellen mit einer zu MATLAB inkompatiblen Schriftart wie "Symbol" formatiert sind. Dieser Zeichensatz ist von MATLAB nicht lesbar. Soll also eine Zelle beispielsweise den griechischen Buchstaben " Δ " enthalten, so ist dieser aus der Symbolpalette einzufügen. Diese Zeichencodierung bereitet keine Probleme.

[0089] Eine Verknüpfung der EXCEL-Fehlerkatalog Tabelle mit dem MATLAB-Programm ist sinnvoll, da nur eine Datenbank der Einflussgrößen P_i zu pflegen und somit die Aktualität der Daten in jedem Fall gewährleistet ist.

[0090] Die Verwendung einer EXCEL-Tabelle ist aus folgenden Gründen vorteilhaft. Für die Pflege, Erweiterung und Einsicht der Datenbank sind keine MATLAB Kenntnisse erforderlich. Mit dem Tabellenkalkulationsprogramm EXCEL kann nahezu jedermann umgehen. EXCEL ermöglicht eine unkomplizierte, übersichtliche und saubere Darstellung in Tabellenformat mit Filter- und Suchfunktionen zum schnellen Auffinden bestimmter Daten. Die Datenbank ist eine eigenständige Datei und kann somit unabhängig von MATLAB geöffnet werden.

[0091] Das Programm liest ferner die Simulations- und Versuchsdaten zu jeder Einflussgröße P_i aus einem Protokoll ein. Sie werden für die Berechnung verwendet. Die Datei sollte in einem txt-Format vorliegen und folgendem Aufbau gerecht werden, um Fehler zu vermeiden:

Tabelle 4

Zeile	Inhalt
1	Parameterwerte P_i
2	VE LU
3	HE LU
4	VE VU
5	HE VU
6	VE VM
7	HE VM
8	0

(fortgesetzt)

Zeile	Inhalt
9	HE VO

[0092] In der ersten Zeile befinden sich die Parameterwerte P_i bei denen die Messung bzw. Simulation erfolgt ist. Die dabei gewählte Schrittweite $P_{i,step}$ der Parametervariation bestimmt somit die Anzahl der Messreihen (= Spaltenanzahl) und kann beliebig gewählt werden - sie sollte keinen Einfluss auf die Funktionalität der Software. In den darauf folgenden acht Zeilen sind die zugehörigen Einspritzmengen Q_i der vier Prüfpunkte der Vor- VE und Haupteinspritzung HE anzugeben. Zwischen den einzelnen Werten sind bevorzugt Leerzeichen bzw. Tabstopps einzufügen, um Einlesefehler zu vermeiden.

[0093] Die Simulations- und Versuchsdaten werden zur Bestimmung der Mengenänderungen nach Gleichung (2) benötigt.

[0094] Ferner liest das Programm die Sollwerte Q_{soll} und Toleranzbereiche $Q_{Grenzen}$ der Einspritzmengen Q ein. Diese Werte sind in einer Datei hinterlegt und werden bei jedem Programmstart eingelesen. Für die Berechnung werden immer die aktuell gespeicherten Daten verwendet. Die entsprechenden Werte der Datei finden sich in Tabelle 1 (s. o.).

[0095] Die Rekursionssoftware kann z. B. die Durchführung zweier Berechnungsarten gestatten:

- Rekursion (= Optimierung) der Einspritzmenge Q der Pumpe P durch Änderung geeigneter Einflussgrößen P_i , oder
- Einflussanalyse unter Einbeziehung aller Parameter P_i , die einen Einfluss auf die Einspritzmengen Q ausüben.

[0096] Bei der Berechnungsart Rekursion erfolgt eine Optimierung der Einspritzmengen Q durch Änderung geeigneter Kenngrößen. Die Parameter P_i werden dabei so bestimmt, dass sich die neu berechneten Mengen innerhalb des gewählten Toleranzbereichs (eins oder zwei) befinden. Die Einspritzmengen Q der lieferbaren Pumpen P müssen sich innerhalb der ersten Toleranzgrenzen befinden. Für die Berechnung werden hier nur die Parameter P_i herangezogen, die im Fehlerkatalog in der Spalte REK mit einem "x" versehen sind. Die ermittelten Einflussgrößen P_i sind dann um den angegebenen Parameterwert zu ändern.

[0097] Bei der Einflussanalyse werden alle im Fehlerkatalog enthaltenen Parameter P_i verwendet. Die hier ermittelten Ergebnisse können somit von denen der Rekursionsberechnung abweichen. Diese Ursachenforschung ermöglicht die Identifikation der Kenngröße, die für die Abweichung zu einem Sollwert verantwortlich ist. Bei mehrmaligem Auftreten dieses Parameters P_i an verschiedenen Pumpen P , ist diese Fehlerquelle im Prozess zu eliminieren. Der Parameter P_i ist dann um den Wert zu ändern, der sich aus dem Mittelwert aller Berechnungen zur Einflussanalyse ergibt.

[0098] Die vom Programm zu importierenden Simulations- und Versuchsdaten stellen oft nur wenige Wertepaare aus dem gesamten Variationsbereich einer Einflussgröße P_i dar. Beispielsweise wurde das Dämpfungsspiel nur mit einer Auflösung von $2\text{ }\mu\text{m}$ simuliert (vgl. Fig. 2a und 2b). Die Programmschleife zur Bestimmung der neuen Einspritzmengen Q muss aber in viel kleineren Schrittweiten rechnen, um brauchbare Ergebnisse zu liefern. Daher ist es notwendig, mit den bekannten Wertepaaren geeignete Näherungsfunktionen zu ermitteln, die die Einspritzmengen Q in Abhängigkeit vom Parameterwert P_i möglichst genau beschreiben. Mit diesem Approximationen lassen sich dann auch Einspritzmengen Q zwischen zwei gemessenen Wertepaaren berechnen.

[0099] MATLAB bietet für eine solche Approximation verschiedene vorgefertigte Befehle an. So ist z. B. eine Polynomregression möglich, wobei die Ausgleichspolynome leicht zu differenzieren und zu integrieren sind. Mittels solchen Ausgleichspolynomen können einige Parameter P_i der Pumpe P sehr gut approximiert werden. Dies sind z. B. die Parameter P400 und P401, (Dämpfungsspiel und Dämpfungsvorhub im Fuß) und der Parameter P600 (Düsenöffnungsdruck an der Düse). Nachteilig bei Polynomen höherer Ordnung ist allerdings ihre Neigung zum Schwingen, was diese zur Glättung von Wertepaaren mit asymptotischem Verhalten ungeeignet macht. Hierfür eignen sich eher gebrochen rationale Ansatzfunktionen. Für Approximation mit Polynomregression der Parameter P400 und P401 eignet sich ein Polynom vierter Ordnung, wohingegen sich für die Approximation mit Polynomregression der Einflussgröße P600 ein Polynom ersten Grads eignet.

[0100] Ferner eignen sich Interpolationsverfahren, um Werte zwischen zwei gemessenen Wertepaaren zu bestimmen. Insbesondere Funktionen mit asymptotischem Verhalten lassen sich in ihren a-symptotischen Bereichen realitätsnaher abbilden als mit Ausgleichspolynomen. Dies gilt insbesondere für die lineare Interpolation. Eine andere Möglichkeit der Interpolation ist die kubische Spline-Interpolation, die einen glatten harmonischen Kurvenverlauf ermöglicht. Dieser wird umso genauer, je mehr Interpolationsstellen zur Verfügung stehen. Ein weiterer Unterschied zur Polynomregression ist, dass hier alle Messpunkte erreicht werden. Die kubische Spline-Interpolation ermöglicht, das stückweise Zusammen setzen einzelner Polynomfunktionen, die jeweils zwischen zwei Schnittstellen gebildet werden. Durch die Anwendung der kubischen Spline-Interpolation ergibt sich ebenfalls wieder das Problem ungewollter Schwingungen zwischen zwei Wertepaaren; jedoch ergaben Untersuchungen an mehreren Einflussgrößen, dass die Interpolationsfehler bei der Be-

rechnung kubischer Spline-Funktionen sehr viel geringer sind, als die der Polynomregression. Daher ist die Anwendung einer kubischen Spline-Interpolation für den Kraftstoffinjektor bevorzugt.

[0101] Fig. 7 zeigt ein Flussdiagramm des erfindungsgemäßen Programms, dass das Rekursionsverfahren in drei Schleifen 1 bis 3 umsetzt.

[0102] Zu Beginn lädt das Programm den realen Output Q_{ist} (gemessene Einspritzmengen) der Pumpe P bzw. fordert einen Benutzer auf die entsprechende(n) Größe(n) einzugeben. Ferner lädt das Programm die entsprechenden Soll-Outputs Q_{soll} und den Sollbereich $Q_{Grenzen}$ des Outputs Q. Darüber hinaus lädt das Programm, wie oben beschrieben, die relevanten Daten aus dem "Fehlerkatalog" und ordnet der Variable Q_{nenn} , die einen gewünschten Output (Nennoutput) der Pumpe P repräsentiert, den, bevorzugt gemessenen Istwert, Q_{ist} der Pumpe P zu.

[0103] Für den ersten Durchlauf gelangt das Programm direkt zur inneren Schleife 1 des Flussdiagramms. In der inneren Schleife 1 werden die Werte des Parameters P_i selbst, vom unteren Abmaß $P_{i,min}$ bis zum oberen Abmaß $P_{i,max}$ in bestimmten Schrittweiten $\Delta P_i (=P_{i,step})$ verändert. Die hierzu erforderlichen Daten sind bereits aus dem Fehlerkatalog geladen worden. Um die Gleichung (4) im Programm besser handhaben zu können, wurde sie wie folgt umgestellt:

$$Q_{i,j,k}^{neu} = Q_{j,k}^{ist} + \Delta Q_{i,j,k} \quad (7)$$

$$\text{mit} \quad \Delta Q_{i,j,k} = \frac{dQ_{i,j,k}}{dP_i} \cdot \Delta P_i = Q_{i,j,k}^{mess} \Big|_{P_i} - Q_{i,j,k}^{mess} \Big|_{P_{i,nenn}} \quad (8)$$

$$\text{mit} \quad P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,max}.$$

[0104] Hier werden die Mengenänderungen $\Delta Q_{i,j,k}$ aus Gleichung (8) mittels Spline-Interpolation aus den Verläufen der Einspritzmengen $Q_{i,j,k}$ über dem jeweiligen Parameter P_i ermittelt.

[0105] Wie bereits erwähnt, sind nur die gemessenen Einspritzmengen-Istwerte Q_{ist} der Pumpen P bekannt, nicht aber die Istwerte der Parameter P_i selbst. Daher wird angenommen, dass der Parameterwert P_i genau das Nennmaß $P_{i,nenn}$ hat. Mit der Gleichung (8) wird dies berücksichtigt, da hier Mengenabweichungen vom Parameter-Nennwert $P_{i,nenn}$ ermittelt werden. Diese Annahme bewirkt also ein Anheben bzw. Absenken der ermittelten Einspritzmengenverläufe Q aus Simulation und Versuch um den Differenzbetrag zu den Mengen-Istwerten Q_{ist} . Berechnet werden aber nur die Mengenänderungen zwischen dem Parameter-Nennwert $P_{i,nenn}$ und dem aktuellen Parameterwert P_i , der sich aus dem Durchlaufen der ersten Schleife 1 ergibt. Dies ist in Fig. 8 dargestellt.

[0106] Die Berechnung der Gleichung (7) erfolgt nun in Matrizenform. In den Spalten befinden sich die Vor- VE und Haupteinspritzmengen HE zu den jeweiligen Betriebspunkten. Die Zeilenanzahl wird durch die Anzahl der Durchläufe der ersten Programmschleife 1 bestimmt, die sich aus der Schrittweite und der Größe des Variationsbereichs ergibt.

$$n_{i,zeilen} = \frac{P_{i,max} - P_{i,min}}{\Delta P_i} + 1$$

[0107] Alle Einspritzmengen Q zu jeder Parameteränderung ΔP_i stehen in der Matrix in einer separaten Zeile. Parallel dazu erfolgt die Bestimmung der Residuen $r_{i,ges}$ in einer weiteren Matrix. Sie enthält zu jedem Parameterwert P_i das Residuum $r_{i,ges}$ mit den zugehörigen Einspritzmengen.

[0108] Die mittlere Schleife 2 ermöglicht die Berechnung aller im Fehlerkatalog vorhandenen Einflussgrößen P_i . Ist ein Parameter P_i bereits geändert worden, wird er im neuen Berechnungsgang übersprungen. Nachdem die Berechnung der inneren Schleife 1 abgeschlossen ist, wird aus der Matrix aller ermittelten Residuen $r_{i,min}$ die kleinste Abweichung $\min(r_{i,ges})$ herausgesucht. Diese Zeile der Matrix wird dann in einer neuen Matrix für mögliche Ergebnisse gespeichert. Damit ist aber noch nicht gesagt, dass diese Lösung Einspritzmengen Q innerhalb des Sollbereichs $Q_{Grenzen}$ liefert. Sie stellt zu dem aktuellen Parameter P_i lediglich die bestmögliche Näherung an den Sollwert Q_{soll} dar. Dieser Vorgang wird nun für alle Einflussgrößen P_i wiederholt. Man erhält so zu jedem Parameter P_i die bestmögliche Änderung, die in dieser Matrix hinterlegt wird.

[0109] In der äußeren Schleife 3 wird die Anzahl der vorzunehmenden Änderungen bestimmt. Nachdem die Berech-

nung für alle Parameter P_i erfolgt ist, wird aus der Matrix "Ergebnisse", der Parameter P_i mit dem kleinsten Mengenresiduum $r_{i,min,alle} = \min(r_{i,min})$ ermittelt. Er verkörpert die bestmögliche Näherung an den Sollwert und wird daher in der Matrix für durchzuführende Änderungen gespeichert. Jetzt erst findet der Soll-/IstwertVergleich statt. Befinden sich die berechneten Einspritzmengen Q zu dem Parameter P_i innerhalb des Sollbereichs $Q_{Grenzen}$, wird die Schleife verlassen.

Ist dies nicht der Fall, werden die durch die Änderungen bestimmten Mengen für einen neuen Berechnungsgang verwendet. Die Schleife wird so lange durchlaufen, bis alle Einspritzmengen im Sollbereich liegen. Anschließend werden die dafür notwendigen Änderungen von der Software ausgegeben.

[0110] Beispielsweise eignet sich der Parameter P400 generell zur Erhöhung, oder Verringerung aller Einspritzmengen.

[0111] Das entwickelte Verfahren gestattet eine effektive Rekursion von komplizierten Bauteilen i , die eine Vielzahl von Forderungen erfüllen müssen. Mit dem Verfahren ist es möglich, eine hohe Zweitausbringung in der Fertigung zu gewährleisten. Sie stellt die Basis für eine Gleichstellung der Pumpen P bezüglich ihrer Mengen dar. Für die Anwendung in der Praxis sind Messdaten zu den Einflussgrößen wichtig. Das Verfahren kann nur zuverlässige Aussagen treffen, wenn die Aktualität der verwendeten Daten gegeben ist. Die Änderung eines Parameters P_i im Prozess erfordert eine Aktualisierung der Daten zu den anderen Einflussgrößen.

[0112] Das Verfahren ist in diesem Ausführungsbeispiel für die Optimierung der Vor- und Haupteinspritzmengen ausgelegt. Selbstverständlich ist auch die Integration der Nacheinspritzmengen.

[0113] Das Verfahren dient aber nicht nur der Bestimmung der Rekursion, sondern gestattet auch, unter Einbeziehung aller ermittelten Einflussgrößen (einschließlich fester Prozessparameter), eine Ursachenforschung zu betreiben - die Frage: "Welcher Parameter P_i ist für die gemessenen Mengenabweichungen ΔQ zum Sollwert verantwortlich?", kann nun gelöst werden. Das kann nur der Parameter P_i mit dem geringsten Mengenresiduum $r_{i,min,alle}$ sein. Natürlich kann diese Frage nicht mit der Berechnung einer Pumpe P repräsentativ beantwortet werden. Zu viele Einflussgrößen P_i könnten das Ergebnis verfälschen. Erst die Durchführung von Einflussanalysen, insbesondere in der Serienfertigung, an mehreren Pumpen P ermöglicht, aufgrund auftretender Häufigkeiten, die Beantwortung dieser Frage. Werden dann diese ermittelten Fehlerquellen im Prozess eliminiert, ist man dem Sollwert Q_{soll} automatisch näher gerückt. Eine fortwährende Optimierung garantiert somit eine stetige Verbesserung der Pumpen P und damit verbunden eine Verringerung der Nacharbeit und des Ausschusses.

[0114] Dieses Verfahren kann selbstverständlich für sämtliche Anwendungsgebiete verwendet werden, in welchen es gilt, eine von mehreren Parametern abhängige Größe (Output) zu optimieren bzw. Einflussanalysen zur Fehlersuche durchzuführen.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Erstellen einer Baugruppe $[P]$, mit einem Rekursionsverfahren zur Optimierung einer technischen Eigenschaft [Output, Q_{nenn}] der Baugruppe $[P]$ mit einer Mehrzahl von Bauteilen [Index: i], insbesondere zur Optimierung einer Einspritzmenge $[Q_{nenn}]$ eines Kraftstoffinjektors $[P]$ für dessen verbesserte Zweitausbringung, mit den Schritten:

a1) Bestimmung einer baulich bedingten Einflussgröße $[P_i]$, insbesondere einer Abmessung, der Baugruppe $[P]$ die eine Einwirkung auf einen Nennoutput $[Q_{nenn}]$ der Baugruppe $[P]$ besitzt; und

a2) Quantifizierung der Einwirkung der Einflussgröße $[P_i]$ bezüglich des Nennoutputs $[Q_{nenn}]$ der Baugruppe $[P]$;
b) Ermitteln, insbesondere Messen, wenigstens eines Istoutputs $[Q_{ist}]$ an wenigstens einem Betriebspunkt [Indizes: j, k] der Baugruppe $[P]$;

c) Variation der in Schritt a2) quantifizierten Einflussgröße $[P_i]$ über einen Wertebereich $[P_{i,min} \leq P_i = P_{i,neu} \leq P_{i,max}]$, insbesondere einen Abmessungsbereich, der Einflussgröße $[P_i]$ hinweg, wobei für einen Wert im Wertebereich $[P_{i,min} \leq P_i = P_{i,neu} \leq P_{i,max}]$ eine Abweichung $[r_i]$ gegenüber dem ermittelten Istoutput $[Q_{nenn} = Q_{ist}]$ ermittelt wird; und

h) Ersetzen des Bauteils $[i]$ in der Baugruppe $[P]$ durch ein Bauteil $[i]$ mit einer technischen Funktion, insbesondere einer Abmessung, die von einer von der Abweichung $[r_i]$ bestimmten Veränderung an der Baugruppe $[P]$ vorgegeben wird.

2. Verfahren gemäß Anspruch 1, wobei in Schritt a2) des Verfahrens die Quantifizierung der Einwirkung der Einflussgröße $[P_i]$ auf den Nennoutput $[Q_{nenn}]$ der Baugruppe $[P]$ in Form einer Einflussfunktion, insbesondere in Form einer mathematischen Einflussfunktion $[Q_i = f(P_i)]$, erfolgt.

3. Verfahren gemäß Anspruch 1 oder 2, insbesondere gemäß Anspruch 2, wobei im Verfahren bei Schritt

c) eine Parametervariation [innere Schleife: 1] der Einflussgröße $[P_i]$ in der Einflussfunktion $[Q_i]$ über den Wertebereich $[P_{i,min} \leq P_i = P_{i,neu} \leq P_{i,max}]$ der Einflussgröße $[P_i]$ hinweg durchgeführt wird; wobei
 c1) jeweils eine modifizierte Einflussfunktion $[Q_{i,neu}]$ aufgestellt wird, die sich aus einer Korrelation des ermittelten Istoutputs $[Q_{nenn} = Q_{ist}]$ oder einem bereits berechneten Istwert des Outputs $[Q_{nenn} = Q_{i,neu}^*]$ einer modifizierten Einflussfunktion $[Q_{i,neu}]$, und einer Änderung der Einflussfunktion $[\Delta Q_i]$ zusammensetzt, und wobei
 c2) jeweils eine Berechnung eines Residuums $[r_{i,ges}]$ der modifizierten Einflussfunktion $[Q_{i,neu}]$ an der veränderten Einflussgröße $[P_{i,neu}]$ gegenüber einem Solloutput $[Q_{Soll}]$ der Baugruppe $[P]$ stattfindet.

4. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei in Schritt h) des Verfahrens ein Bauteil $[i]$ mit derjenigen technischen Funktion in die Baugruppe $[P]$ eingebaut wird, das die geringste Abweichung vom Nennoutput $[Q_{nenn}]$ in der Baugruppe $[P]$ ergeben hat.

5. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 4, insbesondere gemäß Anspruch 3, wobei das Verfahren bei einer Mehrzahl von Betriebspunkten [Indizes: j, k] der Baugruppe $[P]$ ferner folgenden Schritt [mittlere Schleife: 2] umfasst:

d) Ermittlung wenigstens eines kleinsten Residuums $[r_{i,min} = \min(r_{i,ges})]$ der Einflussfunktionen $[Q_i = Q_{i,j,k}]$.

6. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 5, insbesondere gemäß Anspruch 5, wobei das Verfahren für eine oder mehrere weitere Einflussgrößen $[P_{i=(i+1)}]$ und entsprechende Einflussfunktionen $[Q_{i=(i+1)}]$ bei bevorzugt einmaligen Anwenden des Verfahrens durchgeführt wird.

7. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 6, insbesondere gemäß Anspruch 6, wobei das Verfahren ferner folgenden Schritt umfasst:

e) Ermittlung wenigstens eines global kleinsten Residuums $[r_{i,min,alle} = \min(r_{i,min}) = \min(\min(r_{i,ges}))]$ aller Einflussfunktionen $[Q_i]$, bevorzugt aus den jeweils kleinsten Residuen $[r_{i,min}]$ der Einflussfunktionen $[Q_i]$.

8. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 7, insbesondere gemäß Anspruch 7, wobei das Verfahren ferner folgenden Schritt umfasst:

f) Vergleich eines berechneten Istwerts der modifizierten Einflussfunktion $[Q_{i,neu}]$, bevorzugt desjenigen Istwerts der modifizierten Einflussfunktion $[Q_{i,neu}^*]$ mit dem global kleinsten Residuum $[r_{i,min,alle}]$, mit einem Sollbereich $[Q_{Grenzen}]$ des gewünschten Nennoutputs $[Q_{nenn}]$ der Baugruppe $[P]$.

9. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 8, insbesondere gemäß Anspruch 8, wobei das Verfahren ferner folgenden Schritt umfasst:

g1) falls der berechnete Istwert der modifizierten Einflussfunktion $[Q_{i,neu}^*]$ innerhalb des Sollbereichs $[Q_{Grenzen}]$ des Nennoutputs $[Q_{nenn}]$ der Baugruppe $[P]$ liegt: Angabe möglicher bevorzugter Veränderungen an der Einflussgröße $[P_i]$ der Baugruppe $[P]$; oder
 g2) falls Schritt g1) nicht zutrifft [äußere Schleife: 3]: Neubearbeitung des Rekursionsverfahrens, wobei statt des ermittelten Istoutputs $[Q_{nenn} = Q_{ist}]$ der berechnete Istwert des Outputs $[Q_{nenn} = Q_{i,neu}^*]$ tritt, der bevorzugt das global kleinste oder wenigstens ein kleines Residuum $[r_{i,min,alle}]$ aller Einflussfunktionen $[Q_i]$ aufweist.

10. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei in Schritt a2) des Verfahrens die Quantifizierung der Einflussgrößen $[P_i]$ durch Fertigungsanalysen, Vorversuche, Versuche und/oder Simulationen, insbesondere Monte-Carlo-, 1D- und 2D-Simulationen erfolgt.

11. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei in Schritt a1) des Verfahrens, z. B. gemessene oder empirisch ermittelte, Einzelwerte eines Outputs $[Q]$ der Baugruppe $[P]$ bei dimensionsvariiert Einflussgröße $[P_i]$ mittels einer Näherungsfunktion zu einer jeweiligen Einflussfunktion $[Q_i]$ verbunden werden, wobei die Näherungsfunktion eine Inter- und/oder Extrapolationsfunktion und/oder eine Approximationsfunktion umfasst, wobei eine Interpolation bevorzugt eine Spline-Interpolation, insbesondere eine kubische Spline-Interpolation ist.

12. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 11, wobei in Schritt c) des Verfahrens die Einflussfunktion $[Q_i]$ das Verhalten der Einflussgröße $[P_i]$ über einen Toleranz-, Abmaß- oder allgemeinen Wertebzw. Dimensionsbereich $[P_{i,min} \leq P_i = P_{i,neu} \leq P_{i,max}]$ der Einflussgröße $[P_i]$ beschreibt, und

die Berechnung einer jeden veränderten Einflussgröße $[P_{i,neu}]$ über den jeweiligen Bereich $[P_{i,min} \leq P_{i,neu} \leq P_{i,max}]$ hinweg stattfindet, wobei, bevorzugt, die anderen Einflussgrößen $[P_j]$, sofern sie in die betreffende Einflussgröße $[P_i]$ eingehen, einen festen Wert, bevorzugt ihren Nennwert $[P_{i,nenn}]$ haben.

- 5 13. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 12, wobei in Schritt c) des Verfahrens die Parametervariation der Einflussgröße $[P_i]$ über den Wertebereich $[P_{i,min} \leq P_i = P_{i,neu} \leq P_{i,max}]$ hinweg mit einer gewissen Schrittweite $[P_{i,step}]$ vollzogen wird.
- 10 14. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 13, wobei in Schritt c) des Verfahrens die veränderte Einflussgröße $[P_{i,neu}]$ in der modifizierten Einflussfunktion $[Q_{i,neu}]$ dergestalt parametervariiert wird, dass ein Nennwert $[P_{i,nenn}]$ der Einflussgröße $[P_i]$ in die modifizierte Einflussfunktion $[Q_{i,neu}]$ eingeht, wobei, bevorzugt, eine Differenz $[P_{i,neu} - P_{i,nenn}]$ aus veränderter Einflussgröße $[P_{i,neu}]$ im jeweilig gültigen Wertebereich $[P_{i,min} \leq P_{i,neu} \leq P_{i,max}]$ und dem Nennwert $[P_{i,nenn}]$ der Einflussgröße $[P_i]$ gebildet wird, und,
 - 15 bevorzugt, diese Differenz $[P_{i,neu} - P_{i,nenn}]$ mit dem partiellen Differenzial $[\delta Q_i / \delta P_i]$ der Einflussfunktion $[Q_i]$ nach der Einflussgröße $[P_i]$ multipliziert wird, wodurch sich die Änderung der Einflussfunktion $[\Delta Q_i]$ ergibt.
- 20 15. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 14, wobei in Schritt c) des Verfahrens die Berechnung der modifizierten Einflussfunktion $[Q_{i,neu}]$ als Summe $[Q_{i,neu} = Q_{nenn} + \Delta Q_i]$ aus dem ermittelten Ist-output $[Q_{nenn} = Q_{ist}]$ der Baugruppe $[P]$ bzw. in einem späteren Durchlauf aus dem berechneten Istwert $[Q_{nenn} = Q_{i,neu}^*]$ einer modifizierten Einflussfunktion $[Q_{i,neu}]$, und der Änderung der Einflussfunktion $[\Delta Q_i]$ gebildet wird.
- 25 16. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 15, wobei in Schritt c) des Verfahrens das Residuum $[r_{i,ges}]$ auf der Gaußschen Minimumbedingung basiert, insbesondere aus der Summe der kleinsten Fehlerquadrate jeweils am betreffenden Wert $[P_{i,neu}]$ der modifizierten Einflussfunktion $[Q_{i,neu}(P_{i,neu})]$ gebildet wird, wobei das Residuum $[r_{i,ges} = \sum (Q_{Soll} - Q_{i,neu})^2]$ bevorzugt **dadurch** gebildet wird, dass Soll- $[Q_{Soll}]$ oder Nennoutputs $[Q_{nenn}]$ der Baugruppe $[P]$ mit errechneten Werten der modifizierten Einflussfunktion $[Q_{i,neu}]$ korreliert werden.
- 30 17. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 16, wobei in Schritt d) des Verfahrens die Residuen $[r_{i,min}$ bis $r_{i,max}]$ in aufsteigender Reihenfolge geordnet werden, wobei, bevorzugt, die entsprechenden Werte von veränderten Einflussgrößen $[P_{i,neu}]$ und die modifizierten Einflussfunktionen $[Q_{i,neu}]$ mitgeordnet werden und,
 - 35 bevorzugt, eine Differenz $[\Delta P_i = P_{i,neu} - P_{i,nenn}]$ des Werts der veränderten Einflussgröße $[P_{i,neu}]$ und des Nennwerts der Einflussgröße $[P_{i,nenn}]$ der Baugruppe $[P]$ berechnet wird, die ein Maß für eine Änderung an einem Bauteil $[i]$ bzw. an einer Bauteilgruppe $[i]$, der Baugruppe $[P]$ ist.
- 40 18. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 17, wobei in Schritt e) des Verfahrens bevorzugt alle Residuen $[r_{i,min,alle}$ bis $r_{i,max,alle}]$ in aufsteigender Reihenfolge geordnet werden, wobei, bevorzugt, ausgewählte Werte zu diesen Residuen $[r_{i,min,alle}$ bis $r_{i,max,alle}]$ mitgeordnet werden.
- 45 19. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 18, wobei in Schritt f) des Verfahrens für eine Ausgabe der notwendigen Änderung an der Baugruppe $[P]$ die betreffende Einflussgröße $[P_i]$ und/oder der berechnete vorzeichenbehaftete Wert der herausgefundenen Einflussgröße $[P_{i,neu}^*]$ und/oder seine physikalische Einheit und/oder seine allgemeine Bezeichnung $[Bauteil\ i]$ optisch ausgegeben wird.
- 50 20. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 19, wobei in dem Rekursionsverfahren bevorzugt diejenigen Einflussgrößen $[P_i]$ verwendet werden, die einen direkten baulichen Einfluss auf die Baugruppe $[P]$ haben, oder, für einen anderen Fall, ausschließlich diejenigen Einflussgrößen $[P_i]$ verwendet werden, die keinen konstruktiven Einfluss auf die Baugruppe $[P]$ haben.
- 55 21. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 20, wobei nicht alle, bevorzugt wenige, besonders bevorzugt vier, insbesondere drei, insbesondere bevorzugt zwei und insbesondere besonders bevorzugt ein einziger Wert der herausgefundenen Einflussgröße $[P_{i,neu}^*]$ dafür verantwortlich ist, welches Bauteil $[i]$ der Baugruppe $[P]$ oder welche Bauteile $[i]$ der Baugruppe $[P]$ geändert werden sollen bzw. welcherart die Baugruppe $[P]$ zu ändern ist.
22. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 21, wobei die Änderung in der Baugruppe $[P]$ aufgrund derjenigen veränderten Einflussgröße $[P_{i,neu}]$ vorgenommen wird, die eine möglichst einfache und/oder möglichst schnelle und/oder möglichst kostengünstige Veränderung der Baugruppe $[P]$ erlaubt.

23. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 22, wobei mehrere Einflussgrößen $[P_i]$ in einem Fehlerkatalog mit ihrem Nennwert $[P_{i, \text{nenn}}]$ und entsprechender Toleranz zusammengefasst sind.

24. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 23, wobei die Einflussgrößen $[P_i]$ priorisiert sind.

25. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 24, wobei das Verfahren auf Einspritzmengen $[Q_{j,k}]$ eines Kraftstoffinjektors $[P]$ angewendet wird und die Einspritzmengen $[Q_{j,k}]$ für einen Standleerlauf $[k=LU=1]$, eine untere Volllast $[k=VU=2]$, ein maximales Drehmoment $[k=VM=3]$ und eine obere Volllast $[k=VO=4]$ eines Kraftfahrzeugmotors optimiert werden.

26. Verfahren gemäß Anspruch 25, wobei die Einspritzmengen $[Q_{j,k}]$ für eine Vor- $[j=VE=1]$ und/oder eine Haupteinspritzung $[j=HE=2]$ optimiert werden.

27. Verfahren gemäß Anspruch 25 oder 26, wobei die Einspritzmengen $[Q_{i,j,k}]$ für unterschiedliche Sollbereiche der Nenneinspritzmengen $[Q_{\text{nenn},j,k}]$ und für unterschiedliche Toleranzbereiche $[P_{i, \text{min}} \leq P_{i, \text{neu}} \leq P_{i, \text{max}}]$ von Einflussgrößen $[P_i]$ des Kraftstoffinjektors $[P]$ optimiert werden können.

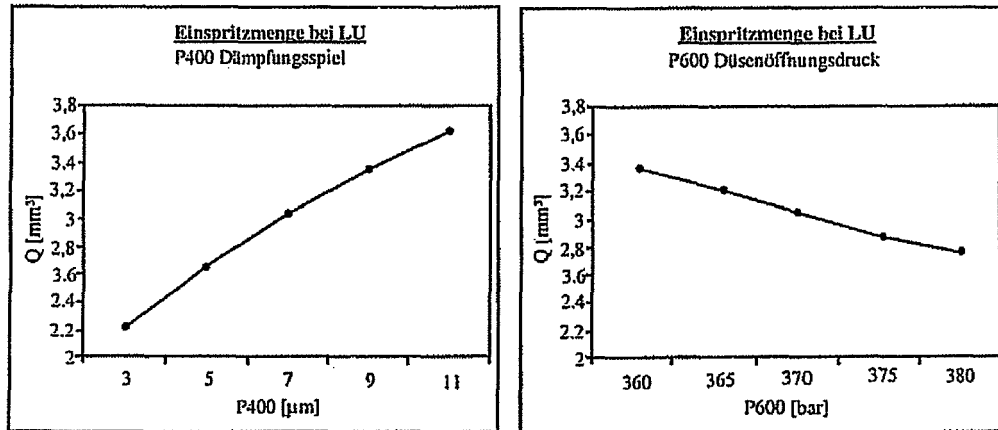
28. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 25 bis 27, wobei bevorzugte Einflussgrößen $[P_i]$ im Kraftstoffinjektor $[P]$:

- eine elektrische und/oder mechanische Steifigkeit eines Piezoventils bzw. -aktuators;
- ein Hebelübersetzungsverhältnis;
- Ventilhub einer Düsennadel und/oder einer Ventalnadel, insbesondere ein Leerhub einer Düsennadel;
- Durchmesser von Drosseln und/oder Bohrungen, sowie deren Verrundungen;
- Spiele zwischen Bauteilen $[i]$, insbesondere ein Dämpfungsspiel bzw. dafür verantwortliche Bauteilabmessungen;
- Druckstufen; und/oder
- Leckagespiele, insbesondere an hochdruckführenden Teilen, sind.

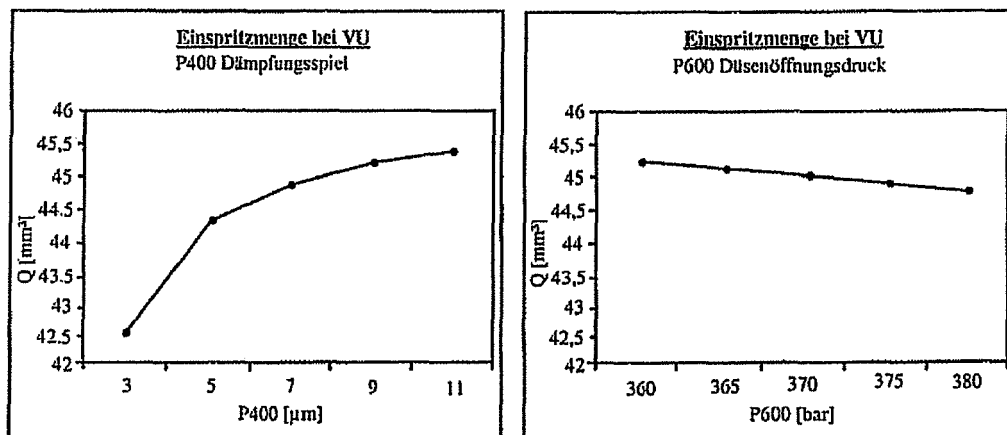
29. Kraftstoffinjektor, insbesondere Pumpe-Düse-Injektor $[P]$, der mittels eines Verfahrens gemäß einem der Ansprüche 1 bis 28 derart optimiert ist, dass er sich für eine Zweitausbringung eignet.

Bereich	Parameter	Einflussgröße Pi		Nachweis SV	Nennmaß	Einheit	Priorität	Berechnung		Gültigkeitsbereich			Simulation/ Versuch
								REK	AP	von	bis	Musterstand	
Kopf	P001	Leerhub		SV	4	µm	1		0,1	2	10	B4.0	
Kopf	P002	Ventilfederkraft		SV		N	1						
Kopf	P003	Ventilfederrate				N/mm	3						
Kopf	P004	HD-Druckstufe Ventilinadel		SV		mm²	1						
Kopf	P005	ND-Druckstufe Ventilinadel		SV		mm²	1						
Kopf	P006	Ventilnadelhub				µm	2						
Kopf	P007	Führungsspiel Ventilinadel				µm	2						
Kopf	P008	Ringspaltspiel ND-Kolben Ventilinadel				µm	2						
Kopf	P009	Plungerspiel				µm	2						
Kopf	P010	HD-Dichtlänge Plunger				mm	3						
Kopf	P011	ND-Dichtlänge Plunger				mm	3						
Kopf	P012	Totvolumen Absteuerkammer				mm³	2						
Kopf	P013	Totvolumen Aktorraum				mm³	3						
Kopf	P014	Totvolumen Verschlussklappe				mm³	3						
Kopf	P015	Durchmesser ND-Ausgleichsbohrung				mm²	3						
Aktor	P200	Piezoenergie		SV	40	mJ	1		0,1	30	70	B4.0	
Aktor	P201	Aktorfenperatur				°C	3						
Fuß	P400	Dämpfungsspiel		SV	7	µm	1	x	0,1	3		B3.2	SIM_20030911
Fuß	P401	Dämpfungsvorhub		SV	0	µm	1	x	0,1	-30		B3.2	SIM_20030911
Fuß	P402	Totvolumen Dämpfungskammer				mm³	2						
Fuß	P403	Totvolumen im Federhalter				mm³	3						
Fuß	P404	Durchmesser Zulaufbohrung				mm	3						
Fuß	P405	Durchmesser Rücklaufbohrung				mm	3						
Fuß	P406	Durchmesser HD-Bohrung				mm	3						
Fuß	P407	Durchmesser Entlüftungsbohrung				mm	3						
Fuß	P408	Durchmesser Zulaufdrossel				mm	2						
Fuß	P409	Durchmesser Drossel der Anschlagscheibe				mm	2						
Fuß	P410	Durchlaß Füllrohr				mm²	3						
Düse	P600	Düsenöffnungsdruck		SV	370	bar	1	x	0,1	360	380	B3.2	SIM_20030911
Düse	P601	Düsenfederrate				N/mm	3						
Düse	P602	Düsendrucktiefe		SV		mm²	1						
Düse	P603	Düsendurchlaß		SV		mm²	1						
Düse	P604	Düsenadelanhub				mm	2						
Düse	P605	Düsenadelspiel				µm	3						
Düse	P606	Totvolumen in der Düse				mm³	2						
Unit	P800	Spüllmenge				mm³	2						
Unit	P801	Kraftstofftemperatur		SV		°C	1						
Unit	P802	HD-Totvolumen				mm³	2						
Unit	P803	Plungerfederkraft				N	3						
Unit	P804	Einspannkraft Zylinderkopf				kN	3						
Unit	P805	Schadsvolumen hydraulischer Kreis				mm³	2						

Fig. 1

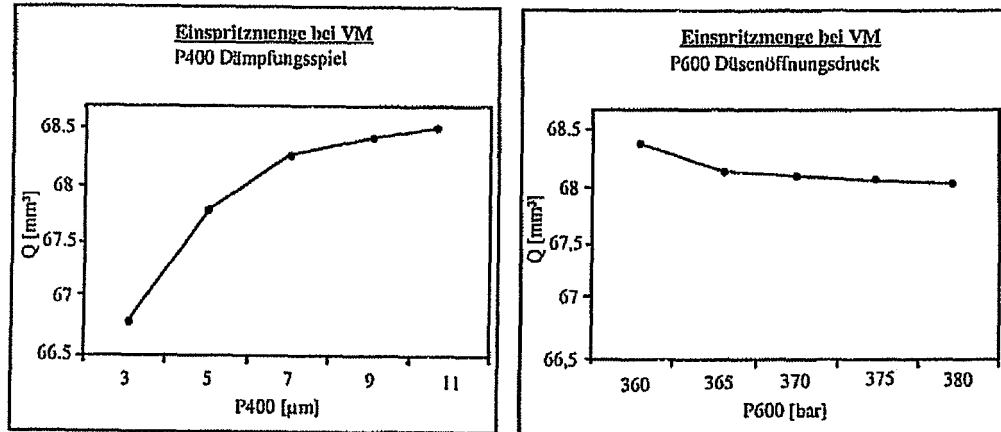


LU-Einspritzmengenverläufe der HE bei Variation von P400 und P600

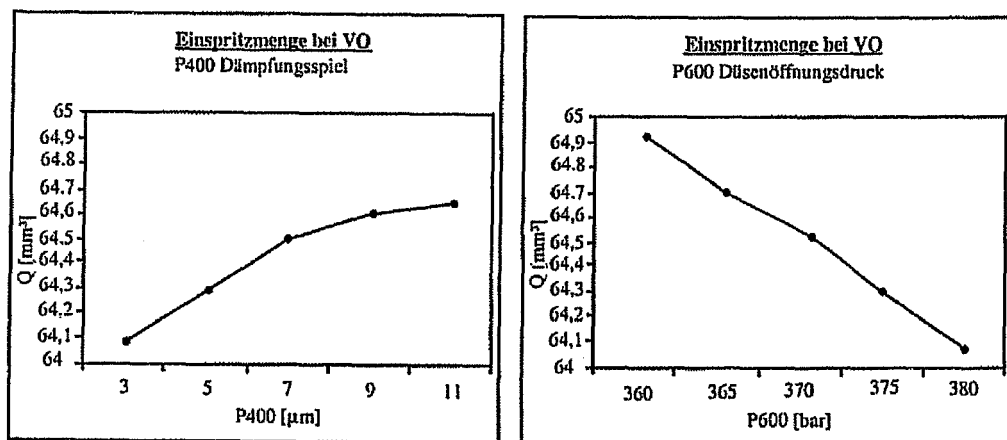


VU-Einspritzmengenverläufe der HE bei Variation von P400 und P600

Fig. 2a



VM-Einspritzmengenverläufe der HE bei Variation von P400 und P600



VO-Einspritzmengenverläufe der HE bei Variation von P400 und P600

Fig. 2b

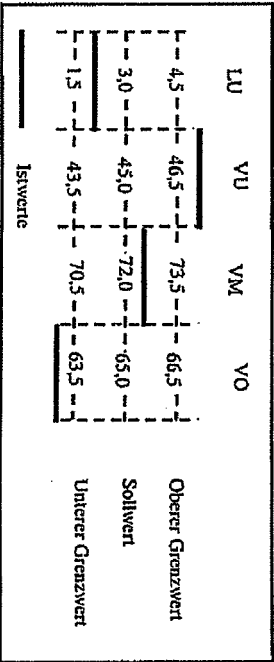


Fig. 3:

Beispiel für Einspritzmengen der HE [mm³]

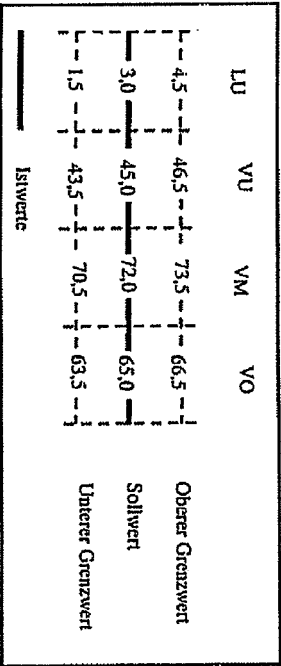


Fig. 4a:

Neuzustand nach Anwendung des Gradienten-Verfahrens

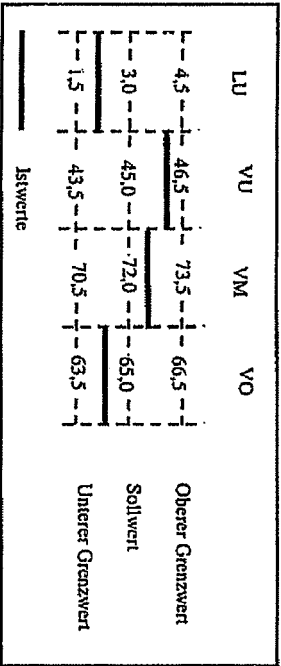


Fig. 4b:

Neuzustand nach Anwendung des Line-Search-Verfahrens (Beispiel)

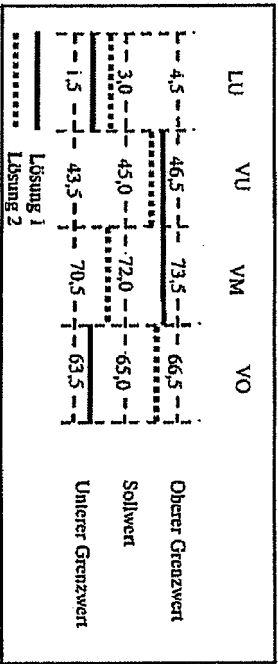


Fig. 5a:

Mehrere suboptimale Lösungen nach der Optimierung

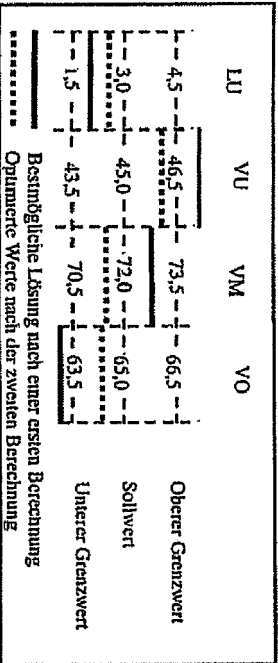


Fig. 5b:

Optimierter Neuzustand nach zweiter Berechnungsergebnissen

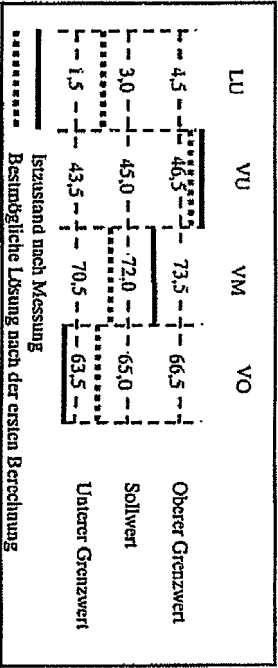


Fig. 6: Änderungen der Einspritzmengencharakteristik nach
Der ersten Berechnung

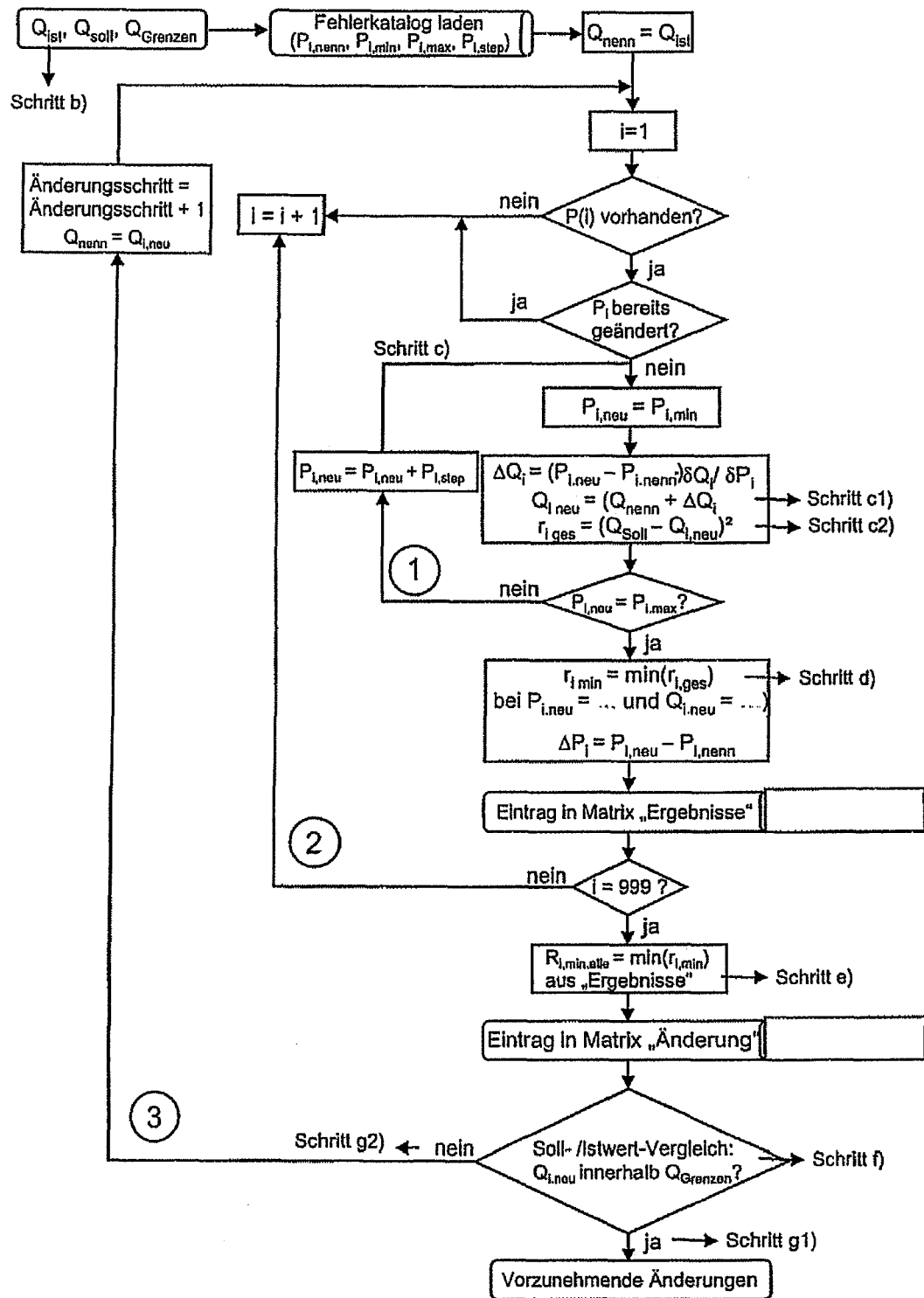
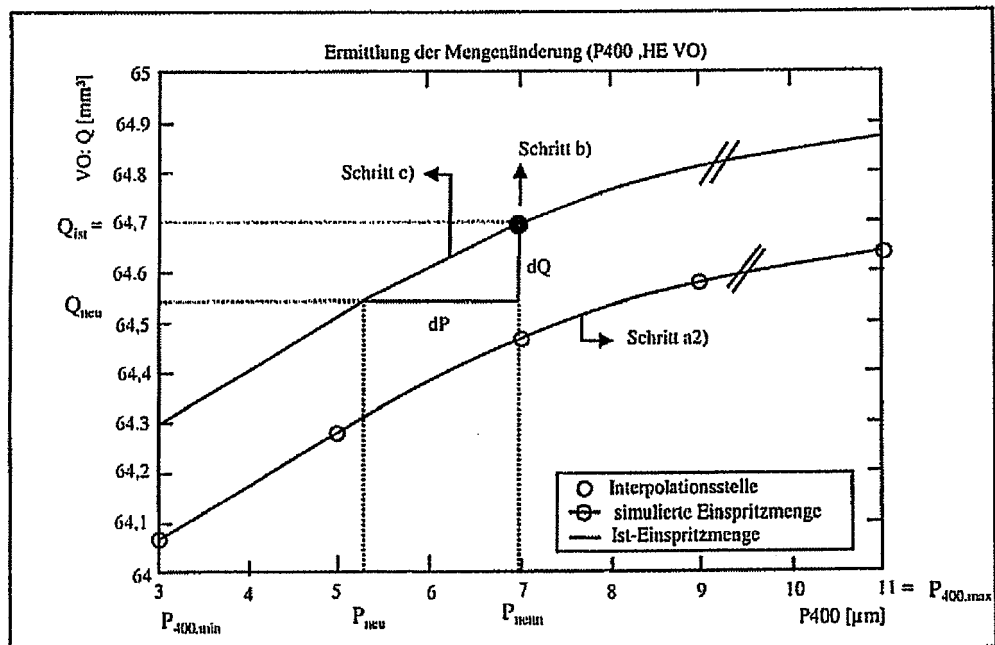


Fig. 7



Ermittlung der Mengenänderung am Beispiel von P400, HE VO:
 Parameter-Nennmaß = 7 μm; gemessene Einspritzmenge 64,7 mm³ = Ist output Q_{ist}

Fig. 8