



Europäisches Patentamt  
European Patent Office  
Office européen des brevets



(11) **EP 1 432 901 B1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:  
**22.11.2006 Patentblatt 2006/47**

(51) Int Cl.:  
**F02D 41/20<sup>(2006.01)</sup> F02D 41/24<sup>(2006.01)</sup>**

(21) Anmeldenummer: **02767102.3**

(86) Internationale Anmeldenummer:  
**PCT/DE2002/002995**

(22) Anmeldetag: **16.08.2002**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:  
**WO 2003/031787 (17.04.2003 Gazette 2003/16)**

(54) **VERFAHREN, COMPUTERPROGRAMM UND STEUER- UND/ODER REGELGERÄT ZUM BETREIBEN EINER BRENNKRAFTMASCHINE, SOWIE BRENNKRAFTMASCHINE**

METHOD, COMPUTER PROGRAM, AND CONTROL AND/OR REGULATING DEVICE FOR OPERATING AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE, AND CORRESPONDING INTERNAL COMBUSTION ENGINE

PROCEDE, PROGRAMME INFORMATIQUE ET APPAREIL DE COMMANDE ET/OU DE REGULATION PERMETTANT DE FAIRE FONCTIONNER UN MOTEUR A COMBUSTION INTERNE, ET MOTEUR A COMBUSTION INTERNE Y RELATIF

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**DE FR IT**

(30) Priorität: **27.09.2001 DE 10147814**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:  
**30.06.2004 Patentblatt 2004/27**

(73) Patentinhaber: **ROBERT BOSCH GMBH  
70442 Stuttgart (DE)**

(72) Erfinder:  
• **JOOS, Klaus  
74399 Walheim (DE)**

- **WOLBER, Jens  
70839 Gerlingen (DE)**
- **FRENZ, Thomas  
86720 Noerdlingen (DE)**
- **AMLER, Markus  
71229 Leonberg-Gebersheim (DE)**

(56) Entgegenhaltungen:  
**EP-A- 0 971 115 WO-A-01/11228**

- **PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 016, no. 047 (M-1208), 6. Februar 1992 (1992-02-06) & JP 03 249371 A (NISSAN MOTOR CO LTD), 7. November 1991 (1991-11-07)**

**EP 1 432 901 B1**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

## Beschreibung

### Stand der Technik

**[0001]** Die Erfindung betrifft zunächst ein Verfahren zum Betreiben einer Brennkraftmaschine, bei dem der Kraftstoff über mindestens eine Kraftstoff-Einspritzvorrichtung, deren Ventilelement von einem Piezoaktor bewegt wird, direkt in mindestens einen Brennraum eingespritzt wird, und bei dem das Drehmoment bestimmt wird, welches bei der Verbrennung der bei einer Einspritzung in den Brennraum eingespritzten Kraftstoffmenge erzeugt wird.

**[0002]** Ein solches Verfahren ist vom Markt her bekannt. Bei ihm wird der Kraftstoff zunächst in eine Hochdruck-Kraftstoffsammelleitung ("Rail") gefördert und in dieser unter hohem Druck gespeichert. An die Kraftstoff-Sammelleitung sind mehrere Injektoren angeschlossen, welche den Kraftstoff direkt in entsprechende Brennräume der Brennkraftmaschine einspritzen. Die Einspritzung kann so erfolgen, dass nur im Bereich der Zündkerze ein zündfähiges Kraftstoff-Luft-Gemisch vorliegt, wohingegen im übrigen Brennraum nur wenig oder überhaupt kein Kraftstoff vorhanden ist (Betriebsart "Schicht"). In dieser Betriebsart ist die Luftzufuhr zum Brennraum im Wesentlichen vollständig entdrosselt, und das Drehmoment wird im Wesentlichen ausschließlich durch die von den Injektoren in die Brennräume eingespritzte Kraftstoffmenge bestimmt.

**[0003]** Um eine möglichst gute Laufruhe gewährleisten zu können und um das Emissionsverhalten der Brennkraftmaschine optimieren zu können, wird bei dem bekannten Verfahren eine sogenannte "Zylindergleichstellung" durchgeführt. Dabei wird für jeden Zylinder der Brennkraftmaschine innerhalb eines Arbeitstaktes (zwei Umdrehungen der Kurbelwelle) das bei der singulären Verbrennung in dem jeweiligen Brennraum erzeugte Drehmoment ermittelt. Die Öffnungszeiten der Injektoren werden dann so verändert, dass die Drehmomentunterschiede zwischen den einzelnen Zylindern minimal werden. Auf diese Weise können Fertigungstoleranzen zwischen den einzelnen Injektoren ausgeglichen werden.

**[0004]** Die vorliegende Erfindung hat die Aufgabe, ein Verfahren der eingangs genannten Art so weiterzubilden, dass Fertigungsunterschiede zwischen einzelnen Injektoren noch besser berücksichtigt werden. Auch soll das Alterungsverhalten der Injektoren berücksichtigt werden. Dies alles soll so erfolgen, dass weder das Emissionsverhalten noch der Kraftstoffverbrauch der Brennkraftmaschine verschlechtert werden.

**[0005]** Diese Aufgaben werden bei einem Verfahren der eingangs genannten Art dadurch gelöst, dass aus dem Drehmoment eine aktuelle Ventilkennlinie der in die Brennkraftmaschine eingebauten Kraftstoff-Einspritzvorrichtung wenigstens näherungsweise bestimmt wird, wobei die Ventilkennlinie einen Kraftstoff-Massenstrom, der von der Kraftstoff-Einspritzvorrichtung abgegeben werden soll, mit einer dem Piezoaktor zuzuführenden An-

steuerenergie verknüpft.

### Vorteile der Erfindung

**[0006]** Die Erfindung hat den Vorteil, dass die aktuelle Ventilkennlinie jeder individuellen Kraftstoff-Einspritzvorrichtung der Brennkraftmaschine bekannt ist. Eine solche Ventilkennlinie stellt einen Zusammenhang her zwischen jener Kraftstoffmenge, die von der Kraftstoff-Einspritzvorrichtung abgegeben werden soll, und der hierfür dem Piezoaktor zuzuführenden Ansteuerenergie. Da die Ventilkennlinie aktuell ermittelt wird, sind bei ihr die individuellen Parameter des Piezoaktors, wie beispielsweise ein altersbedingter Verschleiß, und auch Parameter der individuellen Einspritzvorrichtung, wie beispielsweise eine Veränderung der Durchlässigkeit der Austrittsöffnungen, berücksichtigt.

**[0007]** Ähnlich wie bei einer "Vorsteuerung" wird der individuelle Piezoaktor dieser Kraftstoff-Einspritzvorrichtung daher bereits weitgehend optimal angesteuert. Bei einer mehrzylindrigen Brennkraftmaschine müsste eine nachgeschaltete Zylindergleichstellung daher nur noch in geringerem Umfang eingreifen. Eine optimale Laufruhe und ein optimales Emissionsverhalten werden bei einer Brennkraftmaschine, die mit dem erfindungsgemäßen Verfahren betrieben wird, somit schnell und zuverlässig erreicht.

**[0008]** Dabei erfolgt die Anpassung nicht durch eine Verlängerung oder eine Verkürzung der Einspritzdauer der Kraftstoff-Einspritzvorrichtung, sondern durch eine Veränderung des Hubes des Piezoaktors und somit der Strömungsgeschwindigkeit des Kraftstoffs beim Austritt aus der Kraftstoff-Einspritzvorrichtung. Dem liegt die Überlegung zugrunde, dass bei einem Piezoaktor der Hub des Piezoaktors von der Energie abhängt, die dem Piezoaktor zugeführt wird. Je nach Stärke der Energie ist der Hub des Piezoaktors kleiner oder größer, und je nach Hub des Piezoaktors ist die eingespritzte Kraftstoffmenge kleiner oder größer.

**[0009]** Indem die aktuelle und individuelle Ventilkennlinie eines Piezoaktors bekannt ist, kann der Hub des Piezoaktors sehr präzise eingestellt werden. Somit kann bei dem erfindungsgemäßen Verfahren die Einspritzdauer, also der Zeitpunkt des Beginns der Einspritzung und der Zeitpunkt des Endes der Einspritzung, ausschließlich im Hinblick auf eine optimale Verbrennung mit optimalem Emissions- und Verbrauchsverhalten ausgewählt werden.

**[0010]** Das erfindungsgemäße hat auch den Vorteil, dass auch ein altersbedingter Verschleiß des Piezoaktors wirkungsvoll kompensiert werden kann. Dies wird dadurch erreicht, dass die Ventilkennlinie immer weitgehend aktuell ist. Unter dem Begriff "aktuell" wird hier nicht verstanden, dass ständig die individuelle Ventilkennlinie bestimmt werden muss. Die Bestimmung der Ventilkennlinie soll so erfolgen, dass ein altersbedingter Verschleiß möglichst gut erfasst werden kann.

**[0011]** Durch die Kenntnis von der aktuellen Ventil-

kennlinie können Fertigungsunterschiede zwischen den einzelnen Injektoren sehr gut berücksichtigt werden. Da der Hub und somit auch der Kraftstoffstrom des individuellen Injektors dank des erfindungsgemäßen Verfahrens sehr präzise eingestellt werden kann, ist das Emissionsverhalten und auch der Kraftstoffverbrauch der mit dem erfindungsgemäßen Verfahren betriebenen Brennkraftmaschine immer optimal.

**[0012]** Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind in Unteransprüchen angegeben.

**[0013]** In einer ersten Weiterbildung wird vorgeschlagen, dass das Verfahren folgende Schritte umfasst:

**[0014]** Aus dem Drehmoment wird jene Kraftstoffmenge bestimmt, welche diesem Drehmoment wenigstens theoretisch zugrundeliegt, und aus dieser Kraftstoffmenge und der zugehörigen Öffnungsdauer der Kraftstoff-Einspritzvorrichtung wird der entsprechende Kraftstoff-Massenstrom ermittelt;

aus dem Kraftstoff-Massenstrom und jener Ansteuerenergie des Piezoaktors, mit der die Einspritzung bewirkt wurde, welche zu dem Drehmoment führte, wird ein Wertepaar gebildet;

anhand des aus dieser Ansteuerenergie und diesem Kraftstoff-Massenstrom bestehenden Wertepaars wird für diesen Piezoaktor aus einer vorhandenen Mehrzahl von Ventilkennlinien jene Ventilkennlinie ausgewählt, die am nächsten zu diesem Wertepaar liegt.

**[0015]** Es ist beispielsweise möglich, dass in einem Speicher eine Mehrzahl von Ventilkennlinien oder eine ganze Schar von Ventilkennlinien abgelegt ist. Da die üblichen Ventilkennlinien, welche den Zusammenhang zwischen der einzuspritzenden Kraftstoffmenge und der hierfür erforderlichen Ansteuerenergie bilden, sich nicht überschneiden, ist eine eindeutige Zuordnung der am besten geeigneten Funktion auch nur bei Vorliegen eines einzigen Wertepaares bereits zuverlässig möglich. Die in dem Speicher abgelegten Ventilkennlinien wurden zuvor durch Versuche ermittelt. Sie decken die üblicherweise vorkommenden Alterungs- und Verschleißeinflüsse sowie Fertigungstoleranzen ab.

**[0016]** Es versteht sich, dass dieses Verfahren nur im Schichtbetrieb der Brennkraftmaschine durchgeführt werden kann. Dies hängt damit zusammen, dass nur im Schichtbetrieb ein direkter Zusammenhang zwischen dem aus einer individuellen Einspritzung resultierenden Drehmoment und der eingespritzten Kraftstoffmenge besteht. Es versteht sich aber auch, dass die ermittelte Ventilkennlinie auch in einem "Homogenbetrieb" der Brennkraftmaschine verwendet werden kann und dort zu den erfindungsgemäßen Vorteilen führt. In diesem liegt der Kraftstoff weitgehend homogen im Brennraum vor, und das Drehmoment hängt auch von der zugeführten Luftmasse ab, welche üblicherweise durch die Stellung einer Drosselklappe eingestellt wird.

**[0017]** Vorteilhaft ist auch, wenn die Ansteuerung des Piezoaktors von einem Wert oberhalb einer Spannung, bei der das dem Piezoaktor zugeordnete Ventilelement in einer Stellung ist, in der der Kraftstoff-

Massenstrom des Kraftstoffs überwiegend durch Sitzdrosselung bestimmt wird, reduziert wird, und dass gleichzeitig das Drehmoment, welches auf den Einspritzungen basiert, die während der Reduktion der Ansteuerung erfolgen, überwacht wird, und dass dann, wenn das Drehmoment um mindestens einen bestimmten Wert abfällt, das aus Kraftstoff-Massenstrom und Ansteuerenergie bestehende Wertepaar gebildet wird.

**[0018]** Dem liegt folgende Erkenntnis zugrunde: Aus der Kennlinie einer Kraftstoff-Einspritzvorrichtung mit Piezoaktor ist bekannt, dass der Kraftstoffmassenstrom in einem ersten Hubbereich nach dem Abheben des Ventilelements vom Sitz verhältnismäßig steil ansteigt, um dann, in einem zweiten Hubbereich, abzuflachen. In diesem zweiten Bereich bringt eine Erhöhung des Hubs des Ventilelements praktisch keine Erhöhung des Kraftstoff-Massenstroms mehr. Der erste Bereich wird durch die sogenannte "Hubdrosselung" bestimmt, der zweite Bereich durch die sogenannte "Sitzdrosselung". Es wurde nun festgestellt, dass die Kennlinien von Kraftstoff-Einspritzvorrichtungen, welche unterschiedlichen Alterungs- und Verschleißbedingungen unterlagen und welche unterschiedliche Fertigungstoleranzen aufweisen, sich vor allem im Bereich der Hubdrosselung unterscheiden, wohingegen sie im Bereich der Sitzdrosselung nahe beieinander liegen.

**[0019]** Die Zuordnung der passenden Kennlinie zu dem bestimmten Wertepaar ist also im Bereich der Hubdrosselung mit größerer Genauigkeit möglich. Dem wird durch diese Weiterbildung Rechnung getragen. Darüber hinaus ist die Durchführung dieses Verfahrens auch im Normalbetrieb der Brennkraftmaschine möglich. Bereits ein Drehmomentabfall um ca. 5 %, welcher vom Benutzer der Brennkraftmaschine nicht spürbar ist, ermöglicht die Bestimmung eines Wertepaares, mit dem die Auswahl der passenden Kennlinie mit hoher Genauigkeit möglich ist. Der Zeitraum, während dem die Reduktion der Ansteuerung erfolgt, ist dabei sehr kurz, typischerweise dauert er weniger als eine Sekunde.

**[0020]** Alternativ hierzu ist es möglich, dass durch eine Veränderung der Ansteuerenergie eine Serie von Wertepaaren, welche aus Ansteuerenergie und Kraftstoff-Massenstrom bestehen, gebildet und aus dieser Wertepaar-Serie eine Kennlinie gebildet wird, welche einen Kraftstoff-Massenstrom, der von der Kraftstoff-Einspritzvorrichtung abgegeben werden soll, mit einer dem Piezoaktor zuzuführenden Ansteuerenergie verknüpft. Bei diesem Verfahren wird also keine Funktion ausgesucht, sondern die Funktion wird aus einer Mehrzahl von Wertepaaren, die möglichst den gesamten Bereich der Kennlinie abdecken, gebildet. Mit diesem Verfahren kann eine besonders präzise Abbildung der aktuellen Kennlinie der Kraftstoff-Einspritzvorrichtung geschaffen werden.

**[0021]** Nochmals eine andere Möglichkeit zur Durchführung des Verfahrens besteht darin, dass an verschiedenen Betriebspunkten der Brennkraftmaschine Wertepaare, welche aus Ansteuerenergie und Kraftstoff-Massenstrom bestehen, ermittelt werden, und dass eine

Standardfunktion, insbesondere eine Exponentialfunktion, welche einen Kraftstoff-Massenstrom, der von der Kraftstoff-Einspritzvorrichtung abgegeben werden soll, mit einer dem Piezoaktor zuzuführenden Ansteuerenergie verknüpft, an diese Mehrzahl von Wertepaaren angepasst wird. Bei dieser Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens wird für die Abbildung der Kennlinie nur wenig Speicherplatz benötigt.

**[0022]** Dabei wird besonders bevorzugt, wenn die Anpassung nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate erfolgt. Hierdurch werden die Abweichungen der angepassten Standardfunktion von den tatsächlichen Wertepaaren möglichst klein gehalten.

**[0023]** Bei einigen der oben genannten Verfahren werden die Wertepaare durch eine Veränderung der Ansteuerenergie gebildet. Dabei wird besonders bevorzugt, wenn die Ansteuerenergie jeweils schrittweise verändert wird. Somit können sich nach einer Änderung der Ansteuerenergie die Verhältnisse in der Brennkraftmaschine zunächst stabilisieren, was die Präzision bei der Bestimmung der Wertepaare erhöht.

**[0024]** Ferner wird vorgeschlagen, dass das Verfahren zyklisch in bestimmten vorgegebenen Zeitabständen durchgeführt wird. Alterung und Verschleiß an der Kraftstoff-Einspritzvorrichtung bzw. an dem Piezoaktor der Kraftstoff-Einspritzvorrichtung können somit zuverlässig über die gesamte Lebensdauer der Kraftstoff-Einspritzvorrichtung berücksichtigt werden. Durch eine entsprechende Definition der Zeitabstände wird auch sichergestellt, dass die Abweichung der aktuellen Kennlinie einer Kraftstoff-Einspritzvorrichtung von der zuletzt bestimmten Kennlinie ein bestimmtes Maß nie überschreitet. Unter dem Begriff "Zeitabstand" kann dabei eine echte Betriebszeit oder auch eine Anzahl von Betätigungen der Kraftstoff-Einspritzvorrichtung verstanden werden.

**[0025]** Besonders bevorzugt wird auch, wenn ein Eintrag in einen Fehlerspeicher erfolgt und/oder eine Meldung ausgegeben wird, wenn die zur Abgabe einer bestimmten Kraftstoffmenge erforderliche Ansteuerenergie des Piezoaktors eine Schwelle mindestens erreicht. Extreme Kennlinien, welche auf einen besonders hohen Verschleiß bzw. eine besonders starke Alterung der Kraftstoff-Einspritzvorrichtung bzw. des Piezoaktors schließen lassen, werden somit erkannt, und der Benutzer oder eine Person, welcher bzw. welche die Brennkraftmaschine wartet, werden entsprechend informiert.

**[0026]** Die Erfindung betrifft auch ein Computerprogramm, welches zur Durchführung des obigen Verfahrens geeignet ist, wenn es auf einem Computer ausgeführt wird. Dabei wird besonders bevorzugt, wenn das Computerprogramm auf einem Speicher, insbesondere auf einem Flash-Memory oder einem Ferrit-RAM, abgespeichert ist.

**[0027]** Weiterhin betrifft die Erfindung ein Steuer- und/oder Regelgerät zum Betreiben einer Brennkraftmaschine. Bei diesem wird besonders bevorzugt, wenn es einen Speicher umfasst, auf dem ein Computerprogramm der obigen Art ab gespeichert ist.

**[0028]** Die Erfindung betrifft auch eine Brennkraftmaschine, mit mindestens einem Brennraum, mit mindestens einer Kraftstoff-Einspritzvorrichtung, welche einen Piezo-Aktor umfasst und über welche der Kraftstoff direkt in den Brennraum gelangt, und mit einer Einrichtung, mit der das Drehmoment ermittelt werden kann, welches bei der Verbrennung der bei einer Einspritzung in den Brennraum eingespritzten Kraftstoffmenge erzeugt wird.

**[0029]** Um das Verbrauchs- und Emissionsverhalten der Brennkraftmaschine und deren Laufruhe über die gesamte Lebensdauer der Brennkraftmaschine optimal zu halten, wird vorgeschlagen, dass die Brennkraftmaschine ein Steuer- und/oder Regelgerät der obigen Art umfasst.

Zeichnung

**[0030]** Nachfolgend werden besonders bevorzugte Ausführungsbeispiele der Erfindung unter Bezugnahme auf die beiliegende Zeichnung im Detail erläutert. In der Zeichnung zeigen:

Fig. 1: eine Prinzipdarstellung eines Bereichs einer Brennkraftmaschine mit einer KraftstoffEinspritzvorrichtung;

Fig. 2: ein Diagramm, in dem der Kraftstoff-Massenstrom über dem Hub eines Ventilelements der KraftstoffEinspritzvorrichtung von Fig. 1 aufgetragen ist;

Fig. 3: eine Kennlinie, in der der Kraftstoff-Massenstrom und das Drehmoment über der Anspannung eines Piezoaktors der KraftstoffEinspritzvorrichtung von Fig. 1 dargestellt sind;

Fig. 4: ein Flussdiagramm, welches ein erstes Ausführungsbeispiel eines Verfahrens zum Betreiben der Brennkraftmaschine von Fig. 1 darstellt;

Fig. 5: ein Diagramm ähnlich Fig. 3 zur Erläuterung des Verfahrens von Fig. 4;

Fig. 6: ein Flussdiagramm, in dem ein zweites Ausführungsbeispiel eines Verfahrens zum Betreiben der Brennkraftmaschine von Fig. 1 dargestellt ist;

Fig. 7: ein Diagramm ähnlich Fig. 3 zur Erläuterung des Verfahrens von Fig. 6;

Fig. 8: ein Flussdiagramm, in dem ein drittes Ausführungsbeispiel eines Verfahrens zum Betreiben der Brennkraftmaschine von Fig. 1 dargestellt ist; und

Fig. 9: ein Diagramm ähnlich Fig. 3 zur Erläuterung

des Verfahrens von Fig. 8.

#### Beschreibung der Ausführungsbeispiele

**[0031]** Eine Brennkraftmaschine trägt in Fig. 1 insgesamt das Bezugszeichen 10. Sie umfasst mehrere Brennräume, von denen in Fig. 1 nur einer mit dem Bezugszeichen 12 dargestellt ist. Ihm wird Verbrennungsluft aus einem Saugrohr 14 über ein Einlassventil 16 zugeführt. Die Verbrennungsabgase gelangen über ein Auslassventil 18 in ein Abgasrohr 20.

**[0032]** Kraftstoff wird in den Brennraum 12 direkt über eine Kraftstoff-Einspritzvorrichtung 22 eingespritzt. Bei dieser handelt es sich um einen Injektor, dessen Ventilelement (nicht dargestellt) von einem Piezoaktor (nicht dargestellt) bewegt wird. Der Injektor 22 ist an ein Kraftstoffsystem 24 angeschlossen. Dieses stellt dem Injektor 22 den Kraftstoff unter sehr hohem Druck zur Verfügung. Das im Brennraum 12 befindliche Kraftstoff-Luft-Gemisch wird von einer Zündkerze 26 gezündet, die an ein Zündsystem 28 angeschlossen ist.

**[0033]** Die Drehzahl einer Kurbelwelle 30 sowie deren Winkelstellung und Winkelbeschleunigungen werden von einem Sensor 32 abgegriffen. Die entsprechenden Signale werden einem Steuer- und Regelgerät 34 zugeführt. Das Steuer- und Regelgerät 34 steuert u.a. den Injektor 22 an.

**[0034]** Eine Hubdrosselkurve des Injektors 22 ist in Fig. 2 dargestellt: Aus dieser ist ersichtlich, dass der Kraftstoff-Massenstrom  $Q_{stat}$  in einem ersten Bereich des Hubes  $h$  steil ansteigt (Hubdrosselbereich 36), wohingegen er sich im weiteren Verlauf des Hubes  $h$  des Ventilelements des Injektors 22 praktisch nicht mehr erhöht (Sitzdrosselbereich 38). Der Hubdrosselbereich 36 ist besonders wichtig, da heutzutage auch große Kraftstoffmengen durch eine Mehrzahl von Kleinstinspritzungen eingebracht werden. Bei diesen öffnet der Injektor 22 nur wenig. Er verbleibt also im Wesentlichen im Hubdrosselbereich 36.

**[0035]** Aufgrund der Alterung des Piezoaktors der Kraftstoff-Einspritzvorrichtung 22, aufgrund von Verschleiß und aufgrund von Fertigungstoleranzen führt eine bestimmte Ansteuerspannung  $U$  (vgl. Fig. 3) des Piezoaktors nicht bei jedem Injektor 22 und bei demselben Injektor 22 nicht über seine gesamte Lebensdauer zum gleichen Kraftstoffmassenstrom  $Q_{stat}$ . Wie aus Fig. 3 ersichtlich ist, kann also ein identischer Injektor 22 im Laufe seines Lebens unterschiedliche Kennlinien  $a$ ,  $b$ ,  $c$  usw.  $Q_{stat} = f(U)$  aufweisen. Außerdem können unterschiedliche Injektoren 22 aufgrund der besagten Fertigungstoleranzen entsprechend unterschiedliche Kennlinien zeigen.

**[0036]** Da im Schichtbetrieb das Drehmoment  $M$  der Brennkraftmaschine 10 im wesentlichen ausschließlich durch die eingespritzte Kraftstoffmenge bestimmt wird, wird, wie ebenfalls aus Fig. 3 ersichtlich ist, durch die Kennlinie nicht nur ein Zusammenhang zwischen der Ansteuerspannung  $U$  des Piezoaktors des Injektors 22 mit

dem Kraftstoff-Massestrom  $Q_{stat}$  sondern auch zwischen der Ansteuerspannung  $U$  und dem Drehmoment  $M$  hergestellt.

**[0037]** Um bei der mehrzylindrigen Brennkraftmaschine 10 zu vermeiden, dass bei gleicher Ansteuerspannung  $U$  aufgrund von Fertigungstoleranzen von den Injektoren 22 der einzelnen Brennräume 12 unterschiedliche Kraftstoff-Massenströme  $Q_{stat}$  abgegeben werden, und um Alterungserscheinungen der Injektoren 22 über die Laufzeit zu kompensieren, wird die Brennkraftmaschine 10 von Fig. 1 nach dem in Fig. 4 dargestellten Verfahren betrieben (dieses Verfahren ist als Computerprogramm im Steuer- und Regelgerät 34 abgespeichert):

**[0038]** Nach einem Startblock 40 wird in einem Block 42 abgefragt, ob die Brennkraftmaschine 10 gerade im Schichtbetrieb arbeitet. Diese Abfrage ist erforderlich, da nur im Schichtbetrieb ein direkter Zusammenhang zwischen dem Drehmoment  $M$  und dem Kraftstoff-Massenstrom  $Q_{stat}$  gegeben ist. Nur dieser direkte Zusammenhang ermöglicht, wie nachfolgend erläutert ist, die Bestimmung der für die Kompensation der besagten Abweichungen erforderlichen Größen.

**[0039]** In einem Block 44 wird abgefragt, ob eine Überprüfung der Kennlinien der Injektoren 22 fällig ist. Eine solche Überprüfung ist nicht ständig erforderlich, sondern nur in bestimmten zyklischen Zeitabständen. Ist die Antwort im Block 44 "ja", wird im Block 46 abgefragt, ob die Ansteuerspannung  $U$  größer als ein Grenzwert  $G1$  ist. Hierdurch wird sichergestellt, dass die Brennkraftmaschine 10 sich in einem Betriebspunkt befindet, in dem das dem Piezoaktor zugeordnete Ventilelement des Injektors 22 in einer Stellung ist, in der der Kraftstoff-Massenstrom  $Q_{stat}$  überwiegend durch Sitzdrosselung bestimmt wird. Der Grenzwert  $G1$  ist auch in Fig. 5 dargestellt, der Bereich der Sitzdrosselung befindet sich rechts von der entsprechenden gestrichelten Linie. Im Block 48 wird nun die Ansteuerspannung  $U$  schrittweise reduziert.

**[0040]** Sobald der Kraftstoff-Massenstrom  $Q_{stat}$  überwiegend durch Hubdrosselung bestimmt wird, fällt bei einer Reduktion der Ansteuerspannung  $U$  auch das entsprechende Drehmoment  $M$  ab. Im Block 50 wird festgestellt, wenn dieser Drehmomentabfall  $dM$  einen Grenzwert  $G2$  überschreitet. Dieses Drehmoment ist in Fig. 5 mit  $MG2$  bezeichnet. Aus diesem Drehmoment  $MG2$  wird nun der entsprechende Kraftstoff-Massenstrom  $Q_{statG2}$  bestimmt. Aus der Ansteuerspannung  $UG2$ , mit der die Einspritzung bewirkt wurde, welche zu dem Drehmoment  $MG2$  führte, und aus dem Kraftstoff-Massenstrom  $Q_{statG2}$  wird nun ein Wertepaar gebildet.

**[0041]** Im Block 52 wird aus einer in einem Speicher abgelegten Mehrzahl von Kennlinien  $f_a$ ,  $f_b$ ,  $f_c$ ,  $f_d$  und  $f_e$  jene ausgewählt, welche dem Wertepaar  $UG2$ ,  $Q_{statG2}$  am nächsten kommt. Wie aus Fig. 5 ersichtlich ist, handelt es sich beim vorliegenden Ausführungsbeispiel hierbei um die Kennlinie  $f_c$ . Diese wird nun in einem Speicher 54 abgelegt. Das Verfahren endet im Endblock 56. Die möglichen Hubdrosselkurven  $f_a$ ,  $f_b$ ,  $f_c$ ,  $f_d$  und  $f_e$  wurden zuvor in Versuchen ermittelt und sind im Steuer- und

Regelgerät 34 abgespeichert.

[0042] Würde jedoch das Wertepaar  $UG_2$ ,  $Q_{stat}G_2$  so liegen, dass die Ventilkennlinie  $f_e$  die nächstkommende wäre, würde zusätzlich ein Eintrag in einen Fehlerspeicher erfolgen und eine Meldung an den Benutzer ausgegeben werden. Diese kann beispielsweise darin bestehen, dass am Armaturenbrett eines Kraftfahrzeugs, in welches die Brennkraftmaschine 10 eingebaut ist, eine Warnlampe aufleuchtet.

[0043] Die Ventilkennlinie  $f_e$  bedeutet nämlich, dass die Kraftstoff-Einspritzvorrichtung 22 so weit gealtert ist, dass zur Abgabe eines bestimmten Kraftstoff-Massenstromes eine Ansteuerenergie erforderlich ist, welche oberhalb einer Schwelle liegt (diese Schwelle ist in Fig. 5 nicht dargestellt). Der Benutzer und eine Person, welche die Wartung der Brennkraftmaschine durchführt, werden so auf den Zustand der entsprechenden Kraftstoff-Einspritzvorrichtung hingewiesen. Gleichzeitig bleibt jedoch sichergestellt, dass der Kraftstoff-Massenstrom in der gewünschten Weise gesteuert bzw. geregelt werden kann.

[0044] In Fig. 6 ist ein zweites Ausführungsbeispiel eines Verfahrens dargestellt, mit dem die Brennkraftmaschine von Fig. 1 betrieben werden kann. In dieser Figur und auch in den nachfolgenden Figuren tragen solche Blöcke, welche äquivalente Funktionen zu Blöcken von Fig. 4 aufweisen, die gleichen Bezugszeichen. Sie sind nicht nochmals im Detail erläutert.

[0045] Bei dem in Fig. 6 dargestellten Verfahren wird die im aktuellen Zustand der Kraftstoff-Einspritzvorrichtung 22 entsprechende Kennlinie nicht aus einer zuvor erstellten Mehrzahl von Kennlinien ausgewählt, sondern sie wird speziell für die in Frage stehende Kraftstoff-Einspritzvorrichtung 22 erstellt. Dies geschieht dadurch, dass bei laufender Brennkraftmaschine 10 die Ansteuerungsspannung  $U$  der Kraftstoff-Einspritzvorrichtung 22 schrittweise erhöht wird. Über das entsprechende Drehmoment  $M_i$  werden die dazu gehörigen Kraftstoff-Massenströme  $Q_{stati}$  ermittelt.

[0046] Auf diese Weise wird eine Wertepaarserie  $U_i$ ,  $Q_{stati}$  erstellt. Aus dieser Wertepaarserie wird schließlich (Block 60) eine Funktion  $f(U, Q_{stat})$  gebildet, die einen Kraftstoff-Massenstrom  $Q_{stat}$ , der von der Kraftstoff-Einspritzvorrichtung 22 abgegeben werden soll, mit einer dem Piezoaktor zuzuführenden Ansteuerenergie  $U$  verknüpft. Die Verknüpfung kann durch eine lineare Interpolation erfolgen. Es versteht sich, dass das in den Fig. 6 und 7 dargestellte Verfahren nicht während des normalen Betriebs der Brennkraftmaschine 10 durchgeführt werden kann, sondern beispielsweise während eines Wartungsaufenthalts durchgeführt werden muss.

[0047] Bei dem in Fig. 8 dargestellten Ausführungsbeispiel eines Verfahrens zum Betreiben der Brennkraftmaschine 10 werden in einem Block 62 während des normalen Betriebs der Brennkraftmaschine 10 (im Schichtbetrieb) Datenpaare  $U_i$  (Ansteuerungsspannung) und  $Q_{stati}$  (Kraftstoff-Massenstrom) gespeichert. Wenn eine

ausreichende Anzahl von Datenpaaren  $U_i$ ,  $Q_{stati}$  vorliegt, wird im Block 64 eine Kurvenanpassung einer Exponentialfunktion  $U = a \cdot e^{b \cdot Q_{stat}}$  mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate durchgeführt. Bei dieser Kurvenanpassung werden also die Faktoren  $a$  und  $b$  so ermittelt, dass die aufgenommenen Wertepaare  $U_i$ ,  $Q_{stati}$  möglichst wenig von der entsprechenden Kurve  $U = a \cdot e^{b \cdot Q_{stat}}$  abweichen (Fig. 9).

[0048] Es sei an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass bei einer mehrzylindrigen Brennkraftmaschine jedes der oben beschriebenen Verfahren für jeden einzelnen Zylinder bzw. jede einzelne Kraftstoff-Einspritzvorrichtung 22 durchgeführt wird. Die Zuordnung des durch eine Einspritzung in einem Brennraum 12 erzeugten Drehmoments zu dem entsprechenden Brennraum 12 erfolgt über die Winkelstellung der Kurbelwelle 30, welche vom Sensor 32 abgegriffen wird. Die Erfassung des Drehmoments, welches durch die Verbrennung des in dem besagten Brennraum 12 eingespritzten Kraftstoff erzeugt wird, erfolgt durch eine Messung der Beschleunigung der Kurbelwelle 30, welche durch diese Verbrennung hervorgerufen wird. Die Beschleunigung der Kurbelwelle 30 wird ebenfalls aus dem Signal des Sensors 32 ermittelt.

## Patentansprüche

1. Verfahren zum Betreiben einer Brennkraftmaschine (10), bei dem der Kraftstoff über mindestens eine Kraftstoff-Einspritzvorrichtung (22), deren Ventilelement von einem Piezoaktor bewegt wird, direkt in mindestens einen Brennraum (12) eingespritzt wird, und bei dem das Drehmoment ( $M$ ) bestimmt wird, welches bei der Verbrennung der bei einer Einspritzung in den Brennraum (12) eingespritzten Kraftstoffmenge erzeugt wird, **dadurch gekennzeichnet, dass** aus dem Drehmoment ( $M$ ) eine aktuelle Ventilkennlinie ( $f$ ) der in die Brennkraftmaschine (10) eingebauten Kraftstoff-Einspritzvorrichtung (22) wenigstens näherungsweise bestimmt wird (52; 60; 64), wobei die Ventilkennlinie ( $f$ ) einen Kraftstoff-Massenstrom ( $Q_{stat}$ ), der von der Kraftstoff-Einspritzvorrichtung (22) abgegeben werden soll, mit einer dem Piezoaktor zuzuführenden Ansteuerenergie ( $U$ ) verknüpft.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Verfahren folgende Schritte umfasst:

Aus dem Drehmoment ( $MG_2$ ) wird jene Kraftstoffmenge bestimmt, welche diesem Drehmoment ( $MG_2$ ) wenigstens theoretisch zugrunde liegt, und aus dieser Kraftstoffmenge und der zugehörigen Öffnungsdauer der Kraftstoff-Einspritzvorrichtung (22) wird der entsprechende Kraftstoff-Massenstrom ( $Q_{stat}G_2$ ) ermittelt;

- aus dem Kraftstoff-Massenstrom (QstatG2) und jener Ansteuerenergie (UG2) des Piezoaktors, mit der die Einspritzung bewirkt wurde, welche zu dem Drehmoment (MG2) führte, wird ein Wertepaar (UG2, QstatG2) gebildet;
- anhand des aus dieser Ansteuerenergie (UG2) und diesem Kraftstoff-Massenstrom (QstatG2) bestehenden Wertepaars (UG2, QstatG2) wird für diesen Piezoaktor aus einer vorhandenen Mehrzahl von Ventilkennlinien (fa, fb, fc, fd, fe) jene Ventilkennlinie (fc) ausgewählt (52), die am nächsten zu diesem Wertepaar (UG2, QstatG2) liegt.
3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Ansteuerspannung (U) des Piezoaktors von einem Wert oberhalb einer Spannung (G1), bei der das dem Piezoaktor zugeordnete Ventilelement in einer Stellung ist, in der der Kraftstoff-Massenstrom (Qstat) überwiegend durch Sitzdrosselung bestimmt wird, reduziert wird (48), und dass gleichzeitig das Drehmoment (M), welches auf den Einspritzungen basiert, die während der Reduktion der Ansteuerspannung (U) erfolgen, überwacht wird (50), und dass dann, wenn das Drehmoment (M) um mindestens einen bestimmten Wert (G2) abfällt, das aus Kraftstoff-Massenstrom (QstatG2) und Ansteuerenergie (UG2) bestehende Wertepaar (QstatG2, UG2) gebildet wird (52).
  4. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** durch eine Veränderung (58) der Ansteuerenergie (U) eine Serie von Wertepaaren (Ui, Qstati), welche aus Ansteuerenergie (Ui) und Kraftstoff-Massenstrom (Qstati) bestehen, gebildet und aus dieser Wertepaar-Serie (Ui, Qstati) eine Ventilkennlinie (f) gebildet wird (60), welche einen Kraftstoff-Massenstrom (Qstat), der von der Kraftstoff-Einspritzvorrichtung (22) abgegeben werden soll, mit einer dem Piezoaktor zuzuführenden Ansteuerenergie (U) verknüpft.
  5. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** an verschiedenen Betriebspunkten der Brennkraftmaschine (10) Wertepaare (Ui, Qstati), welche aus Ansteuerenergie (Ui) und Kraftstoff-Massenstrom (Qstati) bestehen, ermittelt werden (62), und dass eine Standardfunktion (f), insbesondere eine Exponentialfunktion, welche einen Kraftstoff-Massenstrom (Qstat), der von der Kraftstoff-Einspritzvorrichtung (22) abgegeben werden soll, mit einer dem Piezoaktor zuzuführenden Ansteuerenergie (U) verknüpft, an diese Mehrzahl von Wertepaaren (Ui, Qstati) angepasst (64) und so die Ventilkennlinie (f) gebildet wird.
  6. Verfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Anpassung (64) nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate erfolgt.
  7. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Ansteuerenergie (U) jeweils schrittweise verändert wird (48, 58).
  8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Verfahren zyklisch in bestimmten vorgegebenen Zeitabständen durchgeführt wird.
  9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein Eintrag in einen Fehlerspeicher erfolgt und/oder eine Meldung ausgegeben wird, wenn die zur Abgabe eines bestimmten Kraftstoff-Massenstroms erforderliche Ansteuerenergie des Piezoaktors eine Schwelle mindestens erreicht.
  10. Computerprogramm, **dadurch gekennzeichnet, dass** es zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche geeignet ist, wenn es auf einem Computer ausgeführt wird.
  11. Computerprogramm nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** es auf einem Speicher, insbesondere auf einem Flash-Memory oder einem Ferrit-RAM, abgespeichert ist.
  12. Steuer- und/oder Regelgerät (34) zum Betreiben einer Brennkraftmaschine (10), **dadurch gekennzeichnet, dass** es einen Speicher umfasst, auf dem ein Computerprogramm nach einem der Ansprüche 10 oder 11 abgespeichert ist.
  13. Brennkraftmaschine (10), mit mindestens einem Brennraum (12), mit mindestens einer Kraftstoff-Einspritzvorrichtung (22), welche einen Piezo-Aktor umfasst und über welche der Kraftstoff direkt in den Brennraum (12) gelangt, und mit einer Einrichtung (32), mit der das Drehmoment (M) ermittelt werden kann, welches bei der Verbrennung der bei einer Einspritzung in den Brennraum (12) eingespritzten Kraftstoffmenge erzeugt wird, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie ein Steuer- und/oder Regelgerät (34) nach Anspruch 12 umfasst.

#### Claims

1. Method for operating an internal combustion engine (10), in which method the fuel is injected directly into at least one combustion chamber (12) by means of at least one fuel injection device (22) whose valve element is moved by a piezoelectric actuator, and in which method the torque (M) which is generated during the combustion of the fuel quantity which is injected into the combustion chamber (12) during an

injection is determined, **characterized in that** a current valve characteristic curve (f) of the fuel injection device (22) which is installed in the internal combustion engine (10) is determined at least approximately (52; 60; 64) from the torque (M), wherein the valve characteristic curve (f) links a fuel mass flow rate (Qstat), which is to be output by the fuel injection device (22), with an actuating power (U) which is to be supplied to the piezoelectric actuator.

2. Method according to Claim 1, **characterized in that** the method comprises the following steps:

that fuel quantity on which the torque (MG2) is at least theoretically based is determined from said torque (MG2), and the corresponding fuel mass flow rate (QstatG2) is determined from said fuel quantity and the associated opening duration of the fuel injection device (22); a value pair (UG2, QstatG2) is formed from the fuel mass flow rate (QstatG2) and that actuating power (UG2) of the piezoelectric actuator with which the injection, which led to the torque (MG2), was carried out; that valve characteristic curve (fc) which lies closest to the value pair (UG2, QstatG2) is selected (52) for said piezoelectric actuator from an available plurality of valve characteristic curves (fa, fb, fc, fd, fe) on the basis of said value pair (UG2, QstatG2) which is formed from said actuating power (UG2) and said fuel mass flow rate (QstatG2).

3. Method according to Claim 2, **characterized in that** the actuating voltage (U) of the piezoelectric actuator is reduced (48) from a value above a voltage (G1), at which the valve element which is associated with the piezoelectric actuator is in a position in which the fuel mass flow rate (Qstat) is determined predominantly by seat throttling, and **in that**, at the same time, the torque (M) which is based on the injections which take place during the reduction in actuating voltage (U) is monitored (50), and **in that** the value pair (QstatG2, UG2) which comprises the fuel mass flow rate (QstatG2) and the actuating power (UG2) is formed (52) when the torque (M) falls by at least a certain value (G2).

4. Method according to Claim 1, **characterized in that** a series of value pairs (Ui, Qstati), which comprise the actuating power (Ui) and the fuel mass flow rate (Qstati), is formed by means of a change (58) in the actuating power (U), and a valve characteristic curve (f), which links a fuel mass flow rate (Qstat), which is to be output by the fuel injection device (22), with an actuating power (U) which is to be supplied to the piezoelectric actuator, is formed (60) from said value pair series (Ui, Qstati).

5. Method according to Claim 1, **characterized in that** value pairs (Ui, Qstati) which comprise the actuating power (Ui) and the fuel mass flow rate (Qstati) are determined (62) at various operating points of the internal combustion engine (10), and **in that** a standard function (f), in particular an exponential function, which links a fuel mass flow rate (Qstat), which is to be output by the fuel injection device (22), with an actuating power (U) which is to be supplied to the piezoelectric actuator, is adapted (64) to said plurality of value pairs (Ui, Qstati), thus forming the valve characteristic curve (f).

6. Method according to Claim 5, **characterized in that** the adaptation (64) is carried out on the basis of the least square errors method.

7. Method according to one of Claims 3 to 6, **characterized in that** the actuating power (U) is in each case varied (48, 58) in steps.

8. Method according to one of the preceding claims, **characterized in that** the method is carried out cyclically at certain predefined time intervals.

9. Method according to one of the preceding claims, **characterized in that** an entry is written into a fault memory and/or a message is output if the piezoelectric actuator actuating power required for the output of a certain fuel mass flow rate at least reaches a threshold.

10. Computer program, **characterized in that** it is suitable, if executed on a computer, for carrying out the method according to one of the preceding claims.

11. Computer program according to Claim 10, **characterized in that** it is stored in a memory, in particular in a flash memory or a ferrite RAM.

12. Open-loop and/or closed-loop control unit (34) for operating an internal combustion engine (10), **characterized in that** it comprises a memory on which a computer program according to one of Claims 10 or 11 is stored.

13. Internal combustion engine (10), having at least one combustion chamber (12), having at least one fuel injection device (22) which comprises a piezoelectric actuator and by means of which the fuel passes directly into the combustion chamber (12), and having a device (32) with which the torque (M) which is generated during the combustion of the fuel quantity which is injected into the combustion chamber (12) during an injection can be determined, **characterized in that** said internal combustion engine (10) comprises an open-loop and/or closed-loop control unit (34) according to Claim 12.

## Revendications

1. Procédé de gestion d'un moteur à combustion interne (10) selon lequel le carburant est injecté directement dans au moins une chambre de combustion (12) par au moins un dispositif d'injection de carburant (22) dont l'élément de soupape est actionné par un actionneur piézoélectrique, et on détermine le couple de rotation (M) généré lors de la combustion de la quantité de carburant injectée dans la chambre de combustion (12) lors d'une injection, **caractérisé en ce qu'** à partir du couple de rotation (M) on détermine (52 ; 60 ; 64) au moins approximativement une courbe caractéristique de soupape (f) actuelle du dispositif d'injection de carburant (22) installé dans le moteur à combustion interne (10), la courbe caractéristique de soupape (f) combinant un débit massique de carburant (Qstat), qui doit être fourni par le dispositif d'injection de carburant (22), avec une énergie de commande (U) à fournir à l'actionneur piézoélectrique.
2. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** le procédé comprend les étapes suivantes :
  - à partir du couple de rotation (MG2), on détermine la quantité de carburant sur laquelle est basé, au moins théoriquement, ce couple de rotation (MG2), et à partir de cette quantité de carburant et de la durée d'ouverture associée du dispositif d'injection de carburant (22), on détermine le débit massique de carburant (QstatG2) correspondant;
  - à partir du débit massique de carburant (QstatG2) et de l'énergie de commande (UG2) de l'actionneur piézoélectrique avec laquelle l'injection a été déclenchée, laquelle avait généré le couple de rotation (MG2) on forme une paire de valeurs (UG2, QstatG2) ; et
  - à l'aide de cette paire de valeurs (UG2, QstatG2) composée de cette énergie de commande (UG2) et de ce débit massique de carburant (QstatG2), on choisit pour cet actionneur piézoélectrique celle des courbes caractéristiques de soupape (fc) parmi une multitude de courbes caractéristiques de soupape (fa, fb, fc, fd, fe) qui se situe au plus près de cette paire de valeurs (UG2, QstatG2).
3. Procédé selon la revendication 2, **caractérisé en ce qu'** on réduit (48) la tension de commande (U) de l'actionneur piézoélectrique à partir d'une valeur au-dessus d'une tension (G1) à laquelle l'élément de soupape associé à l'actionneur piézoélectrique est dans une position dans laquelle le débit massique de carburant (Qstat) est déterminé principalement par un étranglement de siège, et simultanément on surveille (50) le couple de rotation (M), basé sur les injections effectuées pendant la réduction de la tension de commande (U), et lorsque le couple de rotation (M) diminue au moins d'une valeur (G2) déterminée, on forme (52) la paire de valeurs (QstatG2, UG2) composée du débit massique de carburant (QstatG2) et de l'énergie de commande (UG2).
4. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** par une variation (58) de l'énergie de commande (U), on forme une série de paires de valeurs (Ui, Qstati) composées d'énergie de commande (Ui) et de débit massique de carburant (Qstati), et à partir de cette série de paires de valeurs (Ui, Qstati), on forme (60) une courbe caractéristique de soupape (f) qui combine un débit massique de carburant (Qstati), à fournir par le dispositif d'injection de carburant (22), avec une énergie de commande (U) à fournir à l'actionneur piézoélectrique.
5. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce qu'** à différents points de fonctionnement du moteur à combustion interne (10), on détermine (62) des paires de valeurs (Ui, Qstati) composées d'énergie de commande (Ui) et de débit massique de carburant (Qstati), et on adapte (64) à cette multitude de paires de valeurs (Ui, Qstati) une fonction standard (f), en particulier une fonction exponentielle, qui combine un débit massique de carburant (Qstat), à fournir par le dispositif d'injection de carburant (22), avec une énergie de commande (U) à fournir à l'actionneur piézoélectrique, pour ainsi former la courbe caractéristique de soupape (f).
6. Procédé selon la revendication 5, **caractérisé en ce que** l'adaptation (64) s'effectue suivant la méthode des plus petits carrés d'erreurs.
7. Procédé selon l'une quelconque des revendications 3 à 6, **caractérisé en ce que** l'énergie de commande (U) est variée (48, 58) respectivement pas à pas.
8. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le procédé est réalisé cycliquement dans des intervalles de temps prédéterminés.
9. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'**

on fait un enregistrement dans une mémoire d'erreurs et/ou on émet un message si l'énergie de commande de l'actionneur piézoélectrique nécessaire pour fournir un débit massique de carburant déterminé atteint un seuil minimum.

5

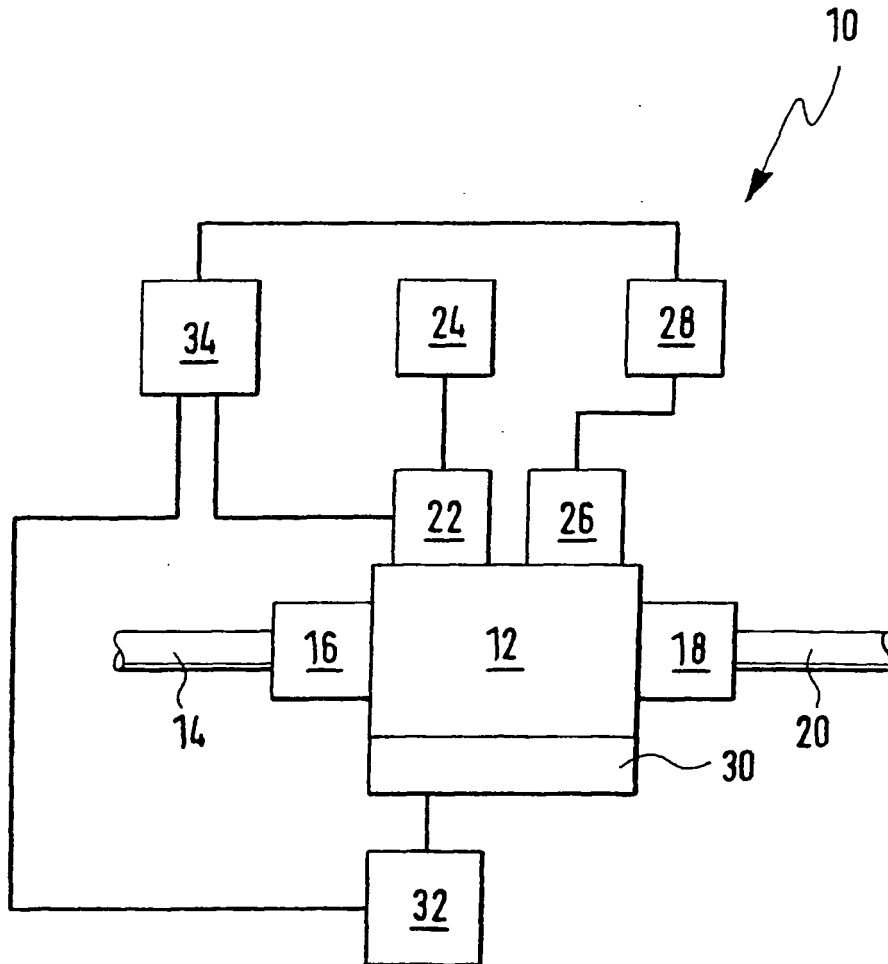
10. Programme informatique, **caractérisé en ce qu'**  
il est exécuté pour la mise en oeuvre du procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes lorsqu'il est réalisé sur un ordinateur. 10
11. Programme informatique selon la revendication 10, **caractérisé en ce qu'**  
il est stocké dans une mémoire, en particulier une mémoire flash ou un RAM de ferrite. 15
12. Appareil de commande et/ou de régulation (34) pour faire fonctionner un moteur à combustion interne (10), 20  
**caractérisé en ce qu'**  
il comprend une mémoire contenant un programme informatique selon l'une quelconque des revendications 10 ou 11. 25
13. Moteur à combustion interne (10) comprenant au moins une chambre de combustion (12), avec au moins un dispositif d'injection de carburant (22) muni d'un actionneur piézoélectrique et par lequel le carburant arrive directement dans la chambre de combustion (12), et avec un dispositif (32) permettant de déterminer le couple de rotation (M) généré lors de la combustion de la quantité de carburant injectée dans la chambre de combustion (12) lors d'une injection, 30  
**caractérisé en ce qu'**  
il comprend un appareil de commande et/ou de régulation (34) selon la revendication 12. 35

40

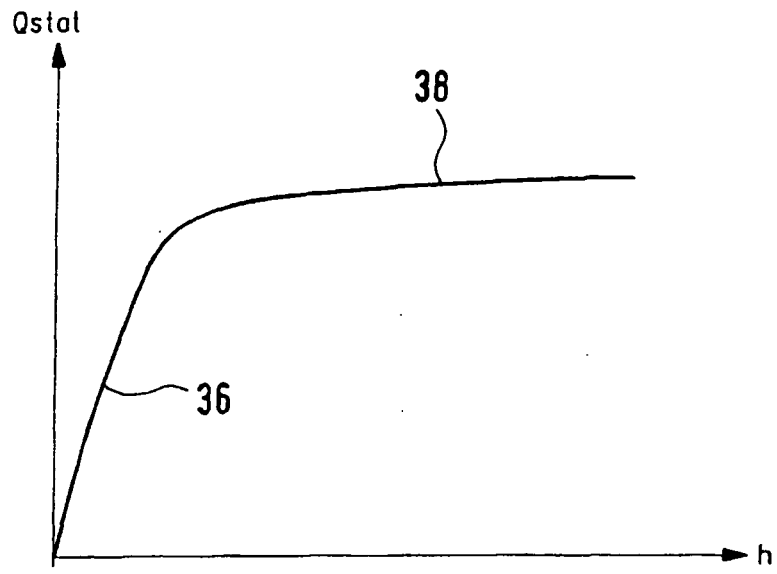
45

50

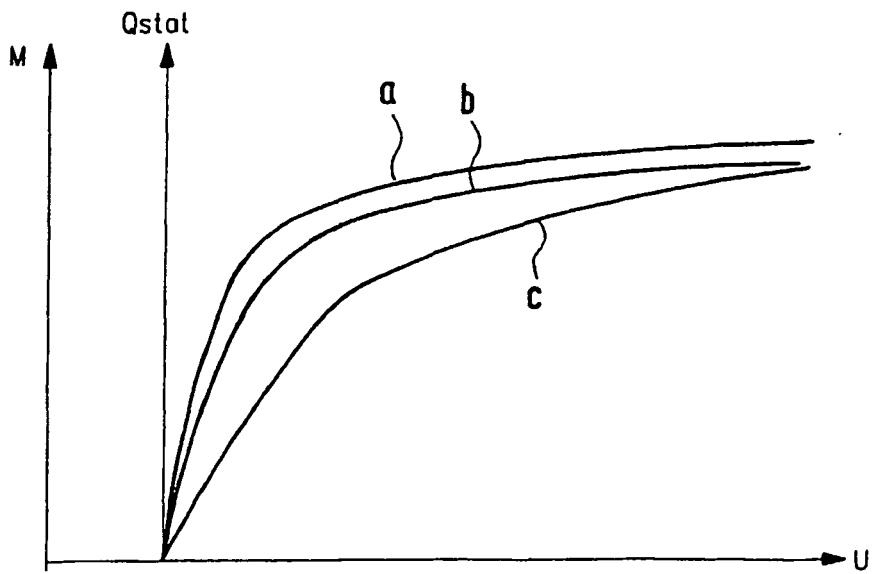
55



*Fig. 1*



*Fig. 2*



*Fig. 3*

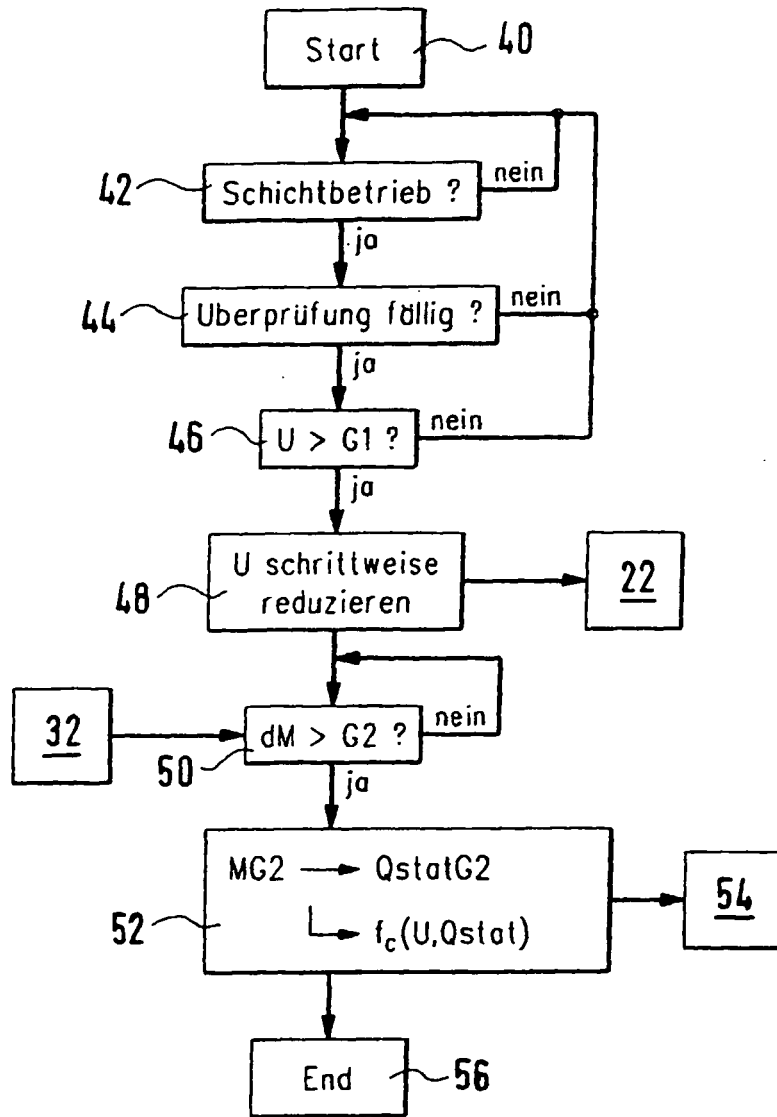


Fig. 4

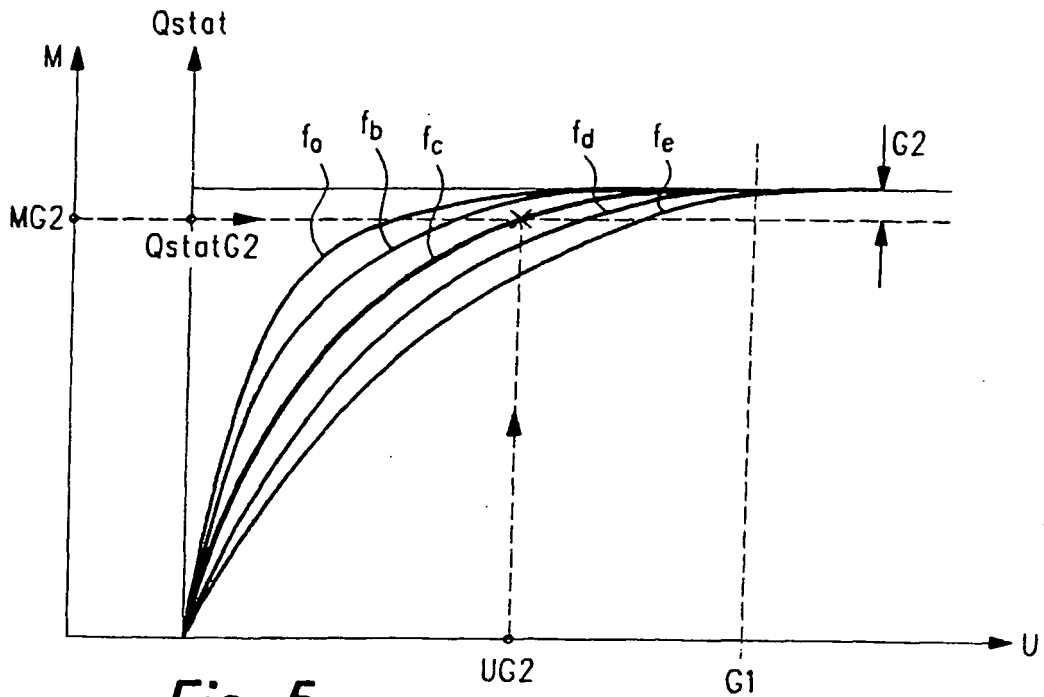


Fig. 5

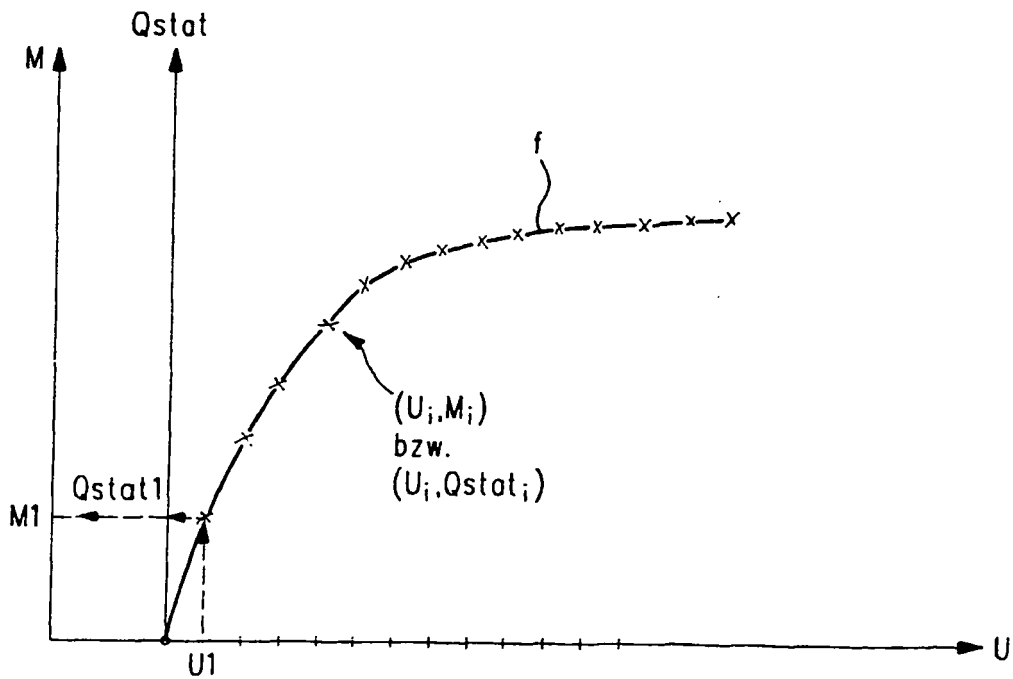


Fig. 7

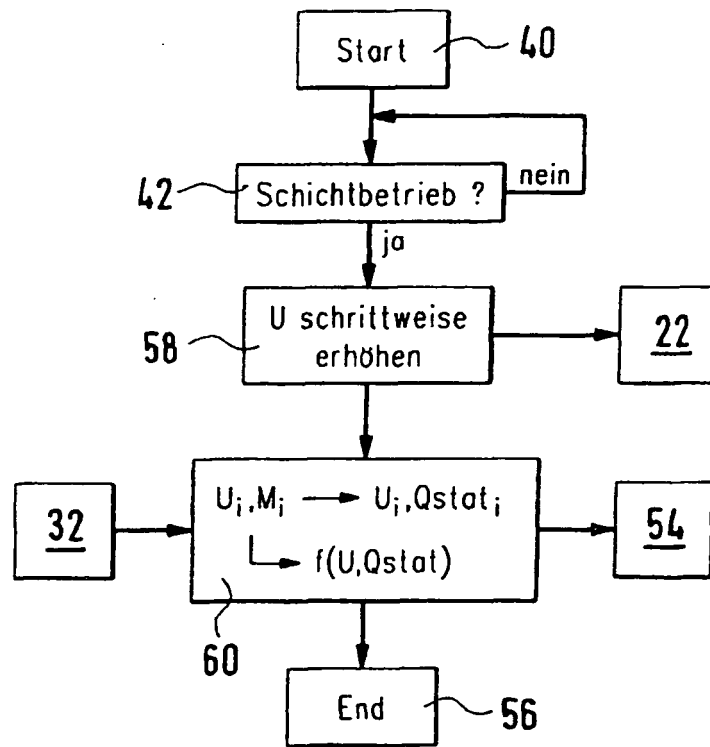
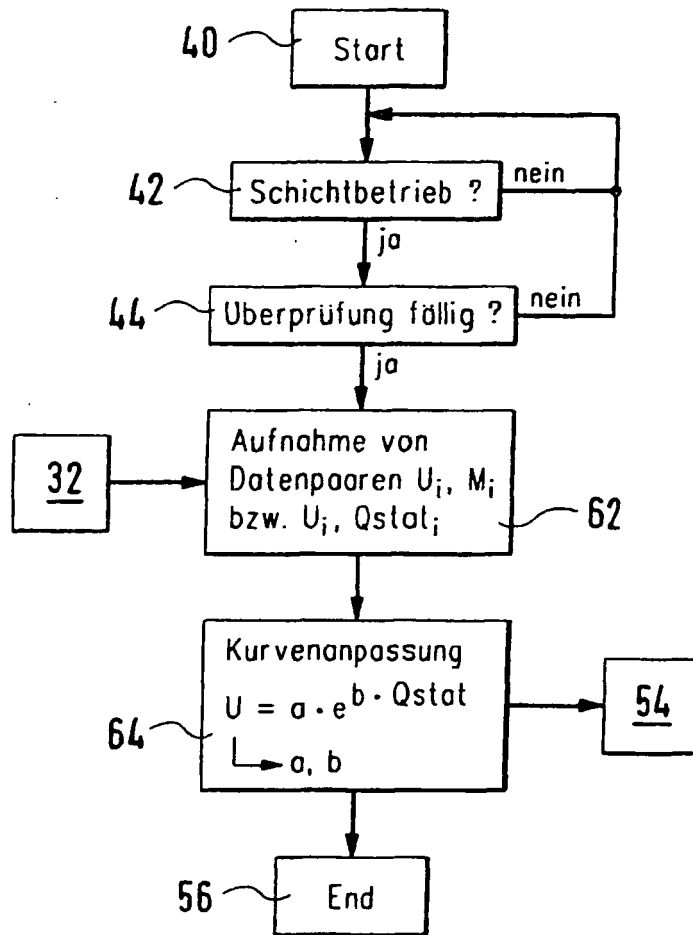
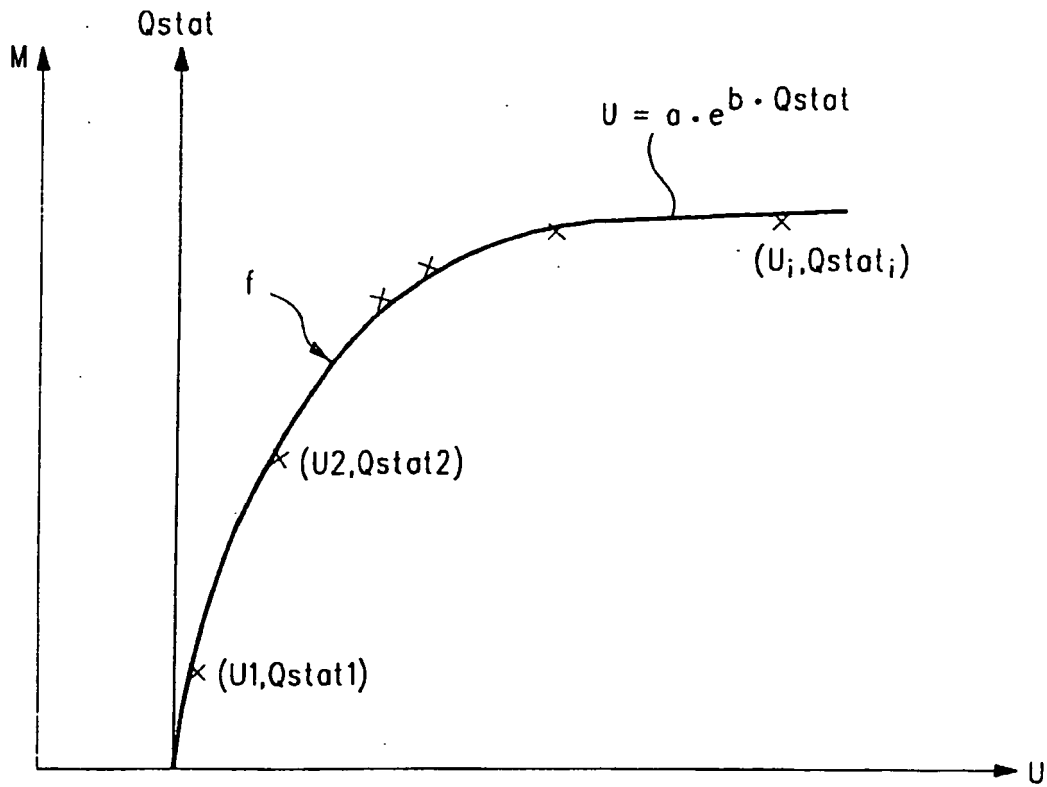


Fig. 6



*Fig. 8*

*Fig. 9*