



(10) **DE 10 2020 110 396 A1** 2021.10.21

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2020 110 396.4**

(22) Anmeldetag: **16.04.2020**

(43) Offenlegungstag: **21.10.2021**

(51) Int Cl.: **F02D 41/22 (2006.01)**

F02D 41/30 (2006.01)

F02M 65/00 (2006.01)

(71) Anmelder:

**Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft,
80809 München, DE**

(72) Erfinder:

Grasreiner, Sebastian, Dr., 81379 München, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:

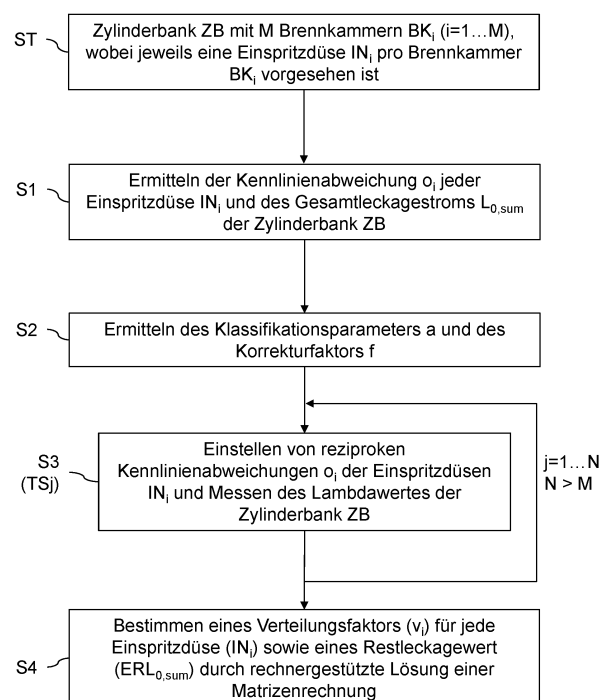
DE	10 2019 100 577	B3
DE	10 2014 218 430	A1
DE	10 2016 208 195	A1
DE	601 22 657	T2
US	2011 / 0 113 756	A1
EP	3 194 750	B1
EP	1 215 386	A2
WO	2014/ 020 393	A1

Rechercheantrag gemäß § 43 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Erkennung von defekten Einspritzdüsen eines Verbrennungsmotors**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Erkennung von defekten Einspritzdüsen (IN_i) zur Zuführung von Kraftstoff in die Brennkammern (BK_i) eines Fahrzeug-Verbrennungsmotors mit einer oder mehreren Zylinderbänken (ZB), wobei eine jeweilige Zylinderbank (ZB) mehrere Zylinder mit jeweils einer darin ausgebildeten Brennkammer (BK_i) und zumindest einer Einspritzdüse (IN_i) umfasst und wobei den Brennkammern (BK_i) einer jeweiligen Zylinderbank (ZB) ein gemeinsamer Luftmassenstrom zugeführt wird und von den Brennkammern (BK_i) einer jeweiligen Zylinderbank (ZB) ein gemeinsamer Abgasstrom zu einer Lambdasonde abgeführt wird. Im erfindungsgemäßen Verfahren werden ein Normabweichungswert (σ_i) für jede Einspritzdüse (IN_i) sowie ein Gesamtleckagestrom ($L_{0, \text{sum}}$) ermittelt. Für eine jeweilige Zylinderbank (ZB) wird im Leerlaufbetrieb des Verbrennungsmotors eine Anzahl von aufeinander folgenden Testschritten (TS_j) durchgeführt, wobei in einem jeweiligen Testschritt (TS_j) für die einzelnen Einspritzdüsen der Kehrwert des für die jeweilige Einspritzdüse (IN_i) ermittelten Normabweichungswerts (σ_i) eingestellt ist, mit Ausnahme für eine der Einspritzdüsen (IN_i), für die ein vorab bestimmter Klassifikationsparameter (a) gewählt wird. Während der Testschritte (TS_j) werden Messungen des Lambdawerts des Abgasstroms und Messungen des zugeführten Luftmassenstroms durchgeführt. Nach Durchführung der Anzahl von Testschritten (TS_j) wird ein Verteilungsschlüssel (σ_i) für ...



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Erkennung von defekten Einspritzdüsen zur Zuführung von Kraftstoff in die Brennkammern eines Verbrennungsmotors, insbesondere in einem Kraftfahrzeug, sowie eine entsprechende Motortesteinrichtung zur Erkennung von defekten Einspritzdüsen.

[0002] Verbrennungsmotoren umfassen Einspritzdüsen für die Kraftstoffversorgung der einzelnen Brennkammern in den Zylindern. Die Einspritzdüsen sorgen dafür, dass die gewünschte Gemischgüte (Luft-Kraftstoff-Verhältnis) entsprechend den Anforderungen aus dem Motorbetrieb geeignet eingestellt wird.

[0003] Einspritzdüsendefekte in Verbrennungsmotoren sind im eingebauten Zustand der Einspritzdüsen häufig schlecht zu identifizieren. Demzufolge werden bei Fehlfunktionen eines Verbrennungsmotors, welche ihre Ursache in defekten Einspritzdüsen haben könnten, diese Düsen oftmals auf Verdacht getauscht. Dies führt in vielen Fällen dazu, dass ein Fehltausch von Einspritzdüsen ohne Defekt vorgenommen wird. Als Konsequenz sind Wiederholreparaturen erforderlich. Ferner steigen die Gewährleistungskosten des Motorherstellers aufgrund unnötiger Reparaturen.

[0004] Aus der EP 3 194 750 B1 ist ein Verfahren zur Erkennung von defekten Einspritzdüsen eines Verbrennungsmotors bekannt, mit dem ein Normabweichungswert für jede Einspritzdüse sowie eine Gesamtleckagestrom ermittelt werden können, wobei der Normabweichungswert für eine jeweilige Einspritzdüse eine Abweichung des durch die jeweilige Einspritzdüse erzeugten Kraftstoffmassenstroms von einem Normbetriebswert der jeweiligen Einspritzdüse beschreibt und der Gesamtleckagestrom den Kraftstoffmassenstrom beschreibt, der durch Leckagen aller Einspritzdüsen der jeweiligen Zylinderbank verursacht ist. Im Falle, dass zumindest ein Normabweichungswert für eine jeweilige Einspritzdüse außerhalb eines vorbestimmten Wertebereichs liegt, wird ein erster Einspritzdüsendefekt in der jeweiligen Zylinderbank in der Form einer Einspritzmengenabweichung zumindest einer Einspritzdüse detektiert. Im Falle, dass der Gesamtleckagestrom größer als ein vorbestimmter Schwellenwert ist, wird ein zweiter Einspritzdüsendefekt in der jeweiligen Zylinderbank in der Form einer Leckage zumindest einer Einspritzdüse detektiert.

[0005] Mit Hilfe dieses Verfahrens ist es somit möglich, Einspritzdüsendefekte mit einer Aussage über die Art des Defekts zu erkennen, ohne dass die Einspritzdüsen aus dem Verbrennungsmotor ausgebaut werden müssen. Für den Fall einer Detektion einer Leckage bietet das in der EP 3 194 750 B1 beschrie-

bene Verfahren zudem die Möglichkeit zu ermitteln, welche der Einspritzdüsen ein Leck aufweisen. Hierzu macht sich das Verfahren die Erkenntnis zunutze, dass über einen Zusammenhang der Laufunruhe mit der Gemischeinspritzung zu fette Einspritzgemische und damit Leckagen detektiert werden können. Ein Nachteil dieses Vorgehens besteht in einer beschränkten Auswertegenauigkeit, da das zugrunde gelegte mathematische Modell die Realität nur unzureichend wiedergibt. Darüber hinaus bietet die Erkennung einer Leckage anhand der Laufunruhe nur eine indirekte Korrelation zwischen Defekt und Symptom.

[0006] Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren und eine entsprechende Motortesteinrichtung zu schaffen, mit denen eine verbesserte selektive Möglichkeit geschaffen wird zu ermitteln, welche der Einspritzdüsen ein Leck aufweisen und die Leckage zu quantifizieren.

[0007] Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren gemäß Patentanspruch 1 sowie eine Motortesteinrichtung gemäß den Merkmalen des Patentanspruchs 12 gelöst. Weiterbildungen der Erfindung sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

[0008] Das erfindungsgemäße Verfahren dient zur Erkennung von defekten Einspritzdüsen zur Zuführung von Kraftstoff in die Brennkammern eines Verbrennungsmotors, insbesondere in einem Kraftfahrzeug. Der Verbrennungsmotor weist eine oder mehrere Zylinderbänke auf, wobei eine jeweilige Zylinderbank mehrere Zylinder mit jeweils einer darin ausgebildeten Brennkammer und zumindest einer Einspritzdüse umfasst. In einer bevorzugten Ausführungsform ist in jeder Brennkammer genau eine Einspritzdüse vorgesehen. Den Brennkammern einer jeweiligen Zylinderbank wird ein gemeinsamer Luftmassenstrom zugeführt. Ebenso wird von den Brennkammern einer jeweiligen Zylinderbank ein gemeinsamer Abgasstrom abgeführt. Eine jeweilige Zylinderbank ist ferner mit jeweils mindestens einer Erfassungssensorik für die Gemischgüte der zusammengeführten Abgasströme versehen, wie z.B. einer Lambdasonde.

[0009] Im Rahmen des erfindungsgemäßen Verfahrens werden ein Normabweichungswert für jede Einspritzdüse sowie ein Gesamtleckagestrom ermittelt, wobei der Normabweichungswert für eine jeweilige Einspritzdüse eine Abweichung des durch die jeweilige Einspritzdüse erzeugten Kraftstoffmassenstroms von einem Normbetriebswert der jeweiligen Einspritzdüse beschreibt und der Gesamtleckagestrom den Kraftstoffmassenstrom beschreibt, der durch Leckagen aller Einspritzdüsen der jeweiligen Zylinderbank verursacht ist. Der Normabweichungswert für jede Einspritzdüse sowie der Gesamtleckagestrom werden beispielsweise mit dem in der EP 3 194 750 B1

beschriebenen Verfahren ermittelt und zur weiteren Verarbeitung bereitgestellt.

[0010] Im Rahmen des weiteren Verfahrens wird für eine jeweilige Zylinderbank im Leerlaufbetrieb des Verbrennungsmotors eine Anzahl von aufeinander folgenden Testschritten durchgeführt. Die Anzahl der Testschritte ist größer als die Anzahl der Zylinder der jeweiligen Zylinderbank. Dies ist erforderlich, da ansonsten das weiter unten beschriebene Gleichungssystem nicht eindeutig gelöst werden kann. In einem jeweiligen Testschritt ist für die einzelnen Einspritzdüsen der Kehrwert des für die jeweilige Einspritzdüse ermittelten Normabweichungswerts eingestellt, mit Ausnahme für eine der Einspritzdüsen, für die ein vorab bestimmter Klassifikationsparameter, der ein Gütemaß für den Verbrennungsmotor in Bezug auf den Gesamtleckagestrom repräsentiert, eingestellt ist. Während der Testschritte werden Messungen des Lambdawerts des von der Zylinderbank abgeführten Abgasstroms (z.B. mittels einer Lambdasonde) und Messungen oder Schätzungen des mit der Zylinderbank zugeführten Luftmassenstroms durchgeführt. Unter dem Einstellen des Kehrwerts des für die jeweilige Einspritzdüse ermittelten Normabweichungswerts ist eine willentliche Vertrimmung der Injektoreinspritzzeit (und damit der eingespritzten Kraftstoffmenge) zu verstehen. Wird ein Faktorwert eingestellt von 1, dann ist der Injektorbetrieb gegenüber der Vorgabe der Motorsteuerung unbeeinträchtigt. Wird ein Faktorwert von <1 eingestellt, dann läuft der Injektor magerer und lässt weniger Kraftstoffdurchfluss hindurch. Wird ein Faktorwert >1 eingestellt, dann läuft der Injektor fetter und lässt mehr Kraftstoffdurchfluss hindurch. Mit Hilfe der Messung von Luftmasse (einwärts) und Abgaslambda (auswärts) kann eine Bilanzierung der Massen erfolgen. Die Klassifikationsparameter werden insbesondere derart gewählt, dass das später beschriebene Gleichungssystem eine eindeutige Lösung besitzt. Der Begriff des Lambdawerts (auch als Verbrennungsluftverhältnis bezeichnet) ist an sich bekannt und beschreibt das Luft-Kraftstoff-Verhältnis in Bezug auf das kraftstoffspezifische stöchiometrische Luft-Kraftstoff-Verhältnis.

[0011] Nach Durchführung der Anzahl von Testschritten werden ein Verteilungsschlüssel für jede Einspritzdüse sowie ein Restleckagewert ermittelt. Der Verteilungsschlüssel für eine jeweilige Einspritzdüse beschreibt einen Anteil des durch die jeweilige Einspritzdüse verursachten Leckageanteils am Gesamtleckagestrom. Der Restleckagewert beschreibt eine Differenz zwischen dem Gesamtleckagestrom und der Summe der Leckageanteile der Einspritzdüsen.

[0012] Die Ermittlung von Verteilungsfaktoren für die jeweiligen Einspritzdüsen und des Restleckagewerts erfolgt derart, dass eine Matrizenrechnung rechner-

gestützt gelöst wird, welche für einen jeweiligen Testschritt eine Gleichung umfasst, welche die Verteilungsschlüssel und den Restleckagewert in Abhängigkeit von den im jeweiligen Testschritt eingestellten reziproken Normabweichungswerten und dem Klassifikationsparameter, und einem für den jeweiligen Testschritt gültigen und aus den Messungen des Lambdawerts abgeleiteten Lambdawert beschreibt.

[0013] Das erfindungsgemäße Verfahren weist den Vorteil auf, dass auf einfache Weise aus den bekannten Normabweichungswerten für jede Einspritzdüse sowie dem Gesamtleckagestrom detektiert werden kann, welche Einspritzdüse welchen Anteil am Gesamtleckagestrom aufweist. Die Bestimmung des Leckagestroms pro Einspritzdüse mittels der Durchführung einer Anzahl von aufeinander folgenden Testschritten und der Lösung eines Gleichungssystems mit großer Präzision kann mit einer Motortesteinrichtung durchgeführt werden.

[0014] Gemäß einer zweckmäßigen Ausgestaltung stellen die Verteilungsschlüssel jeweils einen prozentualen Faktor dar, der durch Multiplikation mit dem Gesamtleckagestrom den Leckage-Kraftstoffmassenstrom durch die jeweilige Einspritzdüse liefert.

[0015] Gemäß einer zweckmäßigen Ausgestaltung werden die Verteilungsfaktoren für die jeweiligen Einspritzdüsen oder die aus den Verteilungsfaktoren ermittelten absoluten Verteilungsleckagen über eine Schnittstelle ausgegeben. An der Schnittstelle kann dann, z.B. durch einen Servicetechniker, festgestellt werden, welche der Einspritzdüse oder -düsen tatsächlich einen Defekt aufweist bzw. aufweisen, der einen Austausch erfordert. Die Ausgabe von Verteilungsfaktoren oder die aus den Verteilungsfaktoren ermittelten absoluten Verteilungsleckagen für die jeweiligen Einspritzdüsen kann z.B. über eine Benutzerschnittstelle erfolgen. Unter einer Ausgabe kann jedoch auch eine Speicherung der entsprechenden Information in einem digitalen Speicher verstanden werden, der zu einem späteren Zeitpunkt ausgewertet werden kann.

[0016] In einer weiteren Ausgestaltung umfasst eine jeweilige Gleichung des Gleichungssystems den um einen vorab bestimmten reziproken Korrekturfaktor bereinigten Restleckagewert, wobei der Korrekturfaktor abhängig von dem Gütemaß für den Verbrennungsmotor in Bezug auf den Gesamtleckagestrom ist. Der Korrekturfaktor, ebenso wie der Klassifikationsparameter, kann durch ein dem Verfahren, vorzugsweise vorgeschaltetes, Klassifikationsprozedere aus dem Restleckagewert bestimmt werden.

[0017] Insbesondere werden der Klassifikationsparameter und der Korrekturfaktor durch einen Vergleich mit dem Leckagestrom bestimmt, wobei, wenn

der Gesamtleckagestrom kleiner als ein erster Grenzwert ist, der Klassifikationsparameter auf einen ersten Klassifikationsparameterwert und der Korrekturfaktor auf einen ersten Korrekturfaktor gesetzt werden, und wobei, wenn der Gesamtleckagestrom größer als ein zweiter Grenzwert ist, der Klassifikationsparameter auf einen zweiten Klassifikationsparameterwert und der Korrekturfaktor auf einem zweiten Korrekturfaktorwert gesetzt werden. Insbesondere ergibt sich der erste Grenzwert aus der Differenz eines Grenzwerts für eine zulässige Leckage eines Injektors und einer vorgegebenen Standardabweichung, die mit der Anzahl der Zylinder multipliziert wird. Der zweite Grenzwert ergibt sich insbesondere aus der Summe eines Grenzwerts für eine zulässige Leckage eines Injektors und einer vorgegebenen Standardabweichung, die mit der Anzahl der Zylinder multipliziert wird. Die für die jeweilige Klasse vorgegebenen Klassifikationsparameter und Korrekturfaktor können durch vorausgegangene Versuche (Best Practice Verfahren) bestimmt werden.

[0018] Gemäß einer weiteren zweckmäßigen Ausgestaltung wird der Klassifikationsparameter auf einen dritten Klassifikationsparameterwert, der durch Interpolation zwischen dem ersten und dem zweiten Klassifikationsparameterwert ermittelt wird, gesetzt. Vorzugsweise wird der Korrekturfaktor auf einen dritten Korrekturfaktorwert gesetzt, der durch Interpolation zwischen dem ersten und dem zweiten Korrekturfaktorwert ermittelt wird, wenn der Gesamtleckagestrom größer als der erste Grenzwert und kleiner als der zweite Grenzwert ist. Mit anderen Worten wird für den Fall, dass der Gesamtleckagestrom zwischen dem ersten und dem zweiten Grenzwert liegt, keine Vorgabe des Klassifikationsparameters und des Korrekturfaktors auf einen festen Wert vorgenommen, sondern eine Interpolation durchgeführt, wobei die dann verwendeten Werte für den Klassifikationsparameter und den Korrekturfaktor sich durch Interpolation zwischen dem ersten und dem zweiten Klassifikationsparameterwert bzw. Korrekturfaktorwert ermittelt. Um diese Interpolation vornehmen zu können, werden für einen Verbrennungsmotor, dessen „Gütemaß“ in Bezug auf den Gesamtleckagestrom weder in die erste Klasse (der Gesamtleckagestrom ist kleiner als der erste Grenzwert) noch in die zweite Klasse (d.h. der Gesamtleckagestrom ist größer als der zweite Grenzwert) fällt, messtechnisch der Klassifikationsparameter und der Korrekturfaktorwert für die erste Klasse und dann der Klassifikationsparameter und der Korrekturfaktorwert für die zweite Klasse bestimmt und dann die beschriebene Interpolation vorgenommen.

[0019] Anhand des Gesamtleckagestroms erfolgt somit eine Klassifizierung des Verbrennungsmotors hinsichtlich seiner Güte. Die Klassifizierung ermöglicht die Bestimmung des Klassifikationsparameters und des Korrekturfaktors anhand des Grenzwerts für

eine zulässige Leckage eines Injektors und einer vorgegebenen Standardabweichung. Der Grenzwert für die zulässige Leckage und die zugehörige zulässige Standardabweichung können im Entwicklungsprozess für die Einspritzdüsen spezifiziert und gewonnen werden. Es ist hierbei zweckmäßig von der Prämisse einer Gaussverteilung der vorliegenden Leckageströme bei unterschiedlichen Einspritzdüsen auszugehen. Zweckmäßigerweise erfolgt eine Begrenzung der Verteilung auf den Grenzwert $\pm 5 \cdot \sigma$ (Standardabweichung), woraus sich eine Abdeckungsbreite ergibt, die die Grundlage für die Bestimmung des Korrekturfaktors und des Klassifikationsparameters bildet.

[0020] Gemäß einer weiteren zweckmäßigen Ausgestaltung sind die reziproken Normabweichungswerte für die jeweiligen Testschritte derart eingestellt, dass auf einem Testschritt, in dem zumindest eine Einspritzdüse einen Kraftstoffmassenstrom mit reziprokem Normabweichungswert erzeugt, ein Testschritt folgt, indem diese Einspritzdüse einen Kraftstoffmassenstrom gemäß dem vorab bestimmten Klassifikationsparameter erzeugt.

[0021] In einer besonders bevorzugten Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens lautet eine jeweilige Bestimmungsgleichung des Gleichungssystems wie folgt:

$$\sum_i (g v_i \cdot c b_i \cdot o_i) + \frac{L_{st} \cdot \lambda_{soll} \cdot M}{MSHFM} \cdot L_{0,sum} = \frac{M}{\lambda_{real,k}}$$

wobei $i = 1, \dots, M$ die Einspritzdüsen aus der Anzahl von M Einspritzdüsen der jeweiligen Zylinderbank indiziert;

wobei $g v_i$ die im entsprechenden Testschritt eingestellten Gemischfaktoren in der Form einer Gemischvertrimmung repräsentieren, welche ein prozentualer Faktor ist, der durch Multiplikation mit dem von der jeweiligen Einspritzdüse im Normalbetrieb des Verbrennungsmotors erzeugten Kraftstoffmassenstrom den tatsächlichen Kraftstoffmassenstrom der jeweiligen Einspritzdüse liefert;

wobei alle $c b_i$ auf den Wert 1 gesetzt sind oder wobei ein jeweiliges $c b_i$ ein Gemischanpassungsparameter für eine jeweilige Einspritzdüse ist, der den durch die jeweilige Einspritzdüse bei deren Ansteuerung generierten Kraftstoffmassenstrom zur Erreichung von Laufruhe des Verbrennungsmotors anpasst und von einer Motorsteuerung eingestellt wird;

wobei o_i der Normabweichungswert für eine jeweilige Einspritzdüse ist, der einen prozentualen Faktor darstellt, der durch Multiplikation mit dem Normbetriebswert der jeweiligen Einspritzdüse den durch die jeweilige Einspritzdüse erzeugten Kraftstoffmassenstrom liefert;

wobei $L_{st} \cdot \lambda_{soll}$ ein gewünschtes und für alle Brennkammern identisches Luft-Kraftstoff-Verhältnis bei ei-

ner Kraftstoffverbrennung in der Brennkammer ist und dabei L_{st} das stöchiometrische Luft-Kraftstoff-Verhältnis und λ_{soll} einen gewünschten Lambdawert der Kraftstoffverbrennung in der Brennkammer repräsentiert;

wobei **MSHFM** der für den jeweiligen Testschritt gültige Luftmassenstrom der gesamten Zylinderbank ist; wobei $L_{0,sum}$ der Gesamtleckagestrom aller Einspritzdüsen dieser Zylinderbank ist;

wobei $\lambda_{real,k}$ der für den jeweiligen Testschritt gültige Lambdawert ist.

[0022] In einer weiteren bevorzugten Variante wird das im Verfahren verarbeitete Gleichungssystem über eine Matrizenrechnung gelöst. Hierdurch wird eine robuste Lösung der Gleichungen sichergestellt. Um eine genaue und eindeutige Lösung des Gleichungssystems zu erhalten, sind die Gemischfaktoren für die jeweiligen Testschritte vorzugsweise derart eingestellt, dass nach Durchlaufen der Testschritte jede Einspritzdüse zumindest einmal keinen Kraftstoffmassenstrom erzeugt (d.h. ausgeschaltet ist), zumindest einmal einen Kraftstoffmassenstrom erzeugt, der größer als ein von der jeweiligen Einspritzdüse im Normalbetrieb des Verbrennungsmotors erzeugter Kraftstoffstrom ist (d.h. die Düse spritzt zu fett ein), und zumindest einmal einen Kraftstoffmassenstrom erzeugt, der kleiner als ein von der jeweiligen Einspritzdüse im Normalbetrieb des Verbrennungsmotors erzeugter Kraftstoffmassenstrom ist (d.h. die Düse spritzt zu mager ein). Zusätzlich oder alternativ sind die Gemischfaktoren für die jeweiligen Testschritte vorzugsweise derart eingestellt, dass zumindest ein Testschritt existiert, in dem alle Einspritzdüsen einen Kraftstoffmassenstrom erzeugen, der einem von der jeweiligen Einspritzdüse im Normalbetrieb des Verbrennungsmotors erzeugten Kraftstoffmassenstrom entspricht (d.h. die Düsen spritzen unvertrimmt ein, $gv_i = 1$) und/oder dass auf einen Testschritt, in dem zumindest eine Einspritzdüse keinen Kraftstoffmassenstrom erzeugt, ein Testschritt folgt, indem jede Einspritzdüse einen Kraftstoffmassenstrom erzeugt. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die einzelnen Einspritzdüsen alle Abschnitte ihrer Einspritzmengenkennlinie durchlaufen, so dass eine zuverlässige Detektion von Einspritzdüsendefekten gewährleistet ist.

[0023] Gemäß einer weiteren zweckmäßigen Ausgestaltung ist vorgesehen, dass in einem Fall, in dem durch die numerische Lösung negative Verteilungsfaktoren für die jeweiligen Einspritzdüsen resultieren, für die richtige Bilanzierung der Leckageströme der betreffende Verteilungsfaktor zu 0 („Null“) gesetzt wird. Alternativ kann vorgesehen sein, das hierin beschriebene Verfahren für geänderte Werte des Klassifikationsparameters und des Korrekturfaktors durchzuführen, um negative Verteilungsfaktoren zu vermeiden.

[0024] Neben dem oben beschriebenen Verfahren betrifft die Erfindung ferner eine Motortesteinrichtung zur Erkennung von defekten Einspritzdüsen zur Zuführung von Kraftstoff in die Brennkammern eines Verbrennungsmotors. Die Motortesteinrichtung ist zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens bzw. einer oder mehrerer bevorzugter Varianten des erfindungsgemäßen Verfahrens eingerichtet. Die Motortesteinrichtung kann z.B. ein externes Motortestgerät sein bzw. ggf. auch im Kraftfahrzeug integriert sein.

[0025] Die Erfindung betrifft ferner ein Kraftfahrzeug mit Verbrennungsmotor und Einspritzdüsen zur Zuführung von Kraftstoff in die Brennkammern des Verbrennungsmotors, wobei das Kraftfahrzeug die oben beschriebene Motortesteinrichtung umfasst.

[0026] Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung wird nachfolgend anhand der beigefügten Zeichnung detailliert beschrieben.

[0027] Es zeigen:

Fig. 1 ein Ablaufdiagramm, welches eine Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens verdeutlicht.

[0028] Das nachfolgend beschriebene Verfahren beruht auf einer einfachen physikalischen Modellierung einzelner Einspritzdüsen (im Folgenden auch als Injektoren bezeichnet) in einer Zylinderbank eines Verbrennungsmotors eines Kraftfahrzeugs. Das Verfahren beruht auf dem in der EP 3 194 750 B1 beschriebenen Vorgehen. Mit dieser Modellierung werden mathematische Gleichungen aufgestellt, bei denen die Fehlerbilder der Injektoren als unbekannte Variablen agieren. Die Gleichungen werden basierend auf einer Anzahl von Testschritten mit Messdaten befüllt, mit denen dann nach den unbekannten Variablen aufgelöst werden kann. Ergebnis dieses Vorgehens sind das Vorliegen eines Normabweichungswerts für jeden einzelnen Injektor sowie ein gemeinsamer Gesamtleckagestrom für alle Zylinder der Zylinderbank des Verbrennungsmotors, die die Voraussetzung für die rechnergestützte Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Bestimmung der Leckagen einer jeweiligen Brennkammer des Verbrennungsmotors bilden.

[0029] Bevor Einzelheiten des erfindungsgemäßen Messablaufs erläutert werden, wird zunächst die der Erfindung zugrunde liegende physikalische Modellierung gemäß der EP 3 194 750 B1 beschrieben.

[0030] Im Rahmen der Modellierung wird ein Verbrennungsmotor betrachtet, der zumindest eine Zylinderbank mit M Zylindern und darin ausgebildeten Brennkammern aufweist. Eine Zylinderbank zeichnet sich durch einen gemeinsamen, allen Zylindern der Bank zugeführten Luftmassenstrom aus, der über ei-

nen Luftmassenmesser (z.B. einen Heißfilmluftmassenmesser) erfasst wird, sowie durch einen gemeinsamen Abgasstrom aller Zylinder der Bank, dessen Lambdawert über eine gemeinsame Lambdasonde für alle Zylinder bestimmt wird. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit wird im Folgenden ein Verbrennungsmotor mit einem einzelnen Injektor pro Zylinder der Zylinderbank betrachtet.

[0031] Der theoretische Kraftstoffmassenstrom $\dot{m}_{K,th}$ in kg/h, der von einem jeweiligen Injektor der Zylinderbank bei seiner Ansteuerung erzeugt wird, lässt sich wie folgt beschreiben:

$$\dot{m}_{K,th} = \frac{MSHFM}{M} \cdot \frac{1}{L_{st} \cdot \lambda_{soll}} \quad (1)$$

[0032] Dabei bezeichnet **MSHFM** den der Zylinderbank zugeführten Luftmassenstrom, M entspricht der Anzahl an Zylindern bzw. Injektoren (z.B. $M = 4$), L_{st} ist das stöchiometrische Luft-Kraftstoff-Verhältnis bei der Verbrennung in der entsprechenden Brennkammer und λ_{soll} ist der gewünschte Soll-Lambdawert (auch als Verbrennungsluftverhältnis bezeichnet) der Verbrennung.

[0033] Im Folgenden wird äquivalent zum Begriff des Kraftstoffmassenstroms auch der Begriff Kraftstoffstrom verwendet. Der reale Kraftstoffstrom eines Injektors ergibt sich aus dem theoretischen Kraftstoffstrom wie folgt:

$$\dot{m}_{K,real} = o \cdot \dot{m}_{K,th}$$

[0034] Dabei bezeichnet o die Kennlinienabweichung des Injektors bei einem entsprechenden Defekt. o ist ein prozentualer Faktor, der die Abweichung des realen Kraftstoffstroms gegenüber dem theoretischen Kraftstoffstrom repräsentiert. Für $o = 1$ entspricht der reale Kraftstoffstrom dem theoretischen Kraftstoffstrom, so dass der entsprechende Injektor keinen Kennlinien-Defekt aufweist. Bei $o < 1$ erzeugt der entsprechende Injektor ein zu mageres Gemisch mit zu geringem Kraftstoffanteil gegenüber der Vorsteuerung. Entsprechend erzeugt der Injektor bei $o > 1$ ein zu fettes Gemisch mit zu großem Kraftstoffanteil.

[0035] Der soeben beschriebene reale Kraftstoffstrom tritt im Normalbetrieb des Verbrennungsmotors auf, d.h. in einem Betrieb, in dem kein Testeingriff an dem Motor erfolgt. Im Rahmen des weiter unten näher beschriebenen Testablaufs kann dieser reale Kraftstoffstrom vertrimmt werden, was durch eine ge-

eignete Einstellung eines prozentualen Faktors gv erreicht wird, der im Folgenden auch als Gemischvertrimmung bezeichnet wird. Dabei lautet der vertrimmte, reale Kraftstoffstrom des Injektors wie folgt:

$$gv \cdot o \cdot \dot{m}_{K,th}$$

$gv = 1$ bedeutet, dass der Injektor unvertrimmt einspritzt, $gv < 1$ bedeutet, dass der Injektor mager einspritzt, und $gv > 1$ bedeutet, dass der Injektor fett einspritzt. In der hier beschriebenen Ausführungsform wird ein Verbrennungsmotor betrachtet, bei dem der Kraftstoffstrom ferner über einen prozentualen Anpassungsfaktor in der Form eines sog. Cylinder-Balancing-Faktors adaptiert wird. Dieser Faktor wird durch die Motorsteuerung bestimmt und dient mittels Zylindergleichstellung dazu, eine hohe Laufruhe des Verbrennungsmotors zu erreichen.

[0036] Unter Berücksichtigung des Cylinder-Balancing-Faktors, der im Folgenden als cb bezeichnet wird, ergibt sich der reale vertrimmte Kraftstoffstrom eines Injektors wie folgt:

$$gv \cdot cb \cdot o \cdot \dot{m}_{K,th}$$

$cb = 1$ bedeutet, dass keine Adaption des Kraftstoffstroms des Injektors stattfindet, $cb < 1$ bedeutet, dass der Kraftstoffstrom abgemagert wird, und $cb > 1$ bedeutet, dass der Kraftstoffstrom angefettet wird. Im Rahmen der Modellierung des Injektors wird ferner eine reale Injektorleckage betrachtet, welche einen Leckagestrom L_0 von über eine Leckage austretendem Kraftstoffstrom darstellt. Der Leckagestrom ist in kg/h angegeben.

[0037] Insgesamt kann somit der reale Kraftstoffstrom eines Injektors wie folgt modelliert werden:

$$gv \cdot cb \cdot o \cdot \dot{m}_{K,th} + L_0 = gv \cdot cb \cdot o \cdot \left(\frac{MSHFM}{M} \cdot \frac{1}{L_{st} \cdot \lambda_{soll}} \right) + L_0$$

[0038] Dabei wurde der Kraftstoffstrom $\dot{m}_{K,th}$ durch den Ausdruck der obigen Gleichung (1) ersetzt.

[0039] Ohne Beschränkung der Allgemeinheit wird angenommen, dass der Verbrennungsmotor stöchiometrisch verbrennen soll, d.h. es gilt $\lambda_{soll} = 1$. Hieraus ergibt sich insgesamt der reale Kraftstoffstrom unter Berücksichtigung der Vertrimmung und des Cylinder-Balancing-Faktors wie folgt:

$$\dot{m}_{K,real} = g_v \cdot c_b \cdot o \cdot \frac{MSHFM}{M \cdot L_{st}} + L_0 \quad (2)$$

[0040] Im Folgenden werden nun die Massenströme der einzelnen Injektoren der entsprechenden Zylinderbank betrachtet, so dass der Index i eingeführt wird, der einen entsprechenden Injektor bzw. den zugeordneten Zylinder bzw. die zugeordnete Brennkammer in der Zylinderbank bezeichnet.

[0041] Für eine Zylinderbank wird für alle Massenströme der Zylinder, die in einem Abgasstrang zusammengeführt werden, ein Lambda-Istwert λ_{real} über eine Lambdasonde ermittelt. Aufgrund der Massenerhaltung ergeben sich die an der Lambdasonde vorhandenen realen Massenströme wie folgt:

$$\sum_i \dot{m}_{K,real,i} + \sum_i \dot{m}_{L,i}$$

[0042] Dabei bezeichnet $\dot{m}_{K,real,i}$ den Kraftstoffstrom eines jeweiligen Injektors und $\dot{m}_{L,i}$ den einem jeweiligen Zylinder zugeführten Luftmassenstrom. Hier und im Folgenden bezeichnen die Summen über den Index i eine Summation über die Zylinder der Zylinderbank.

[0043] Aus den obigen, an der Lambdasonde vorhandenen Massenströmen ergibt sich der Lambda-wert λ_{real} wie folgt:

$$\lambda_{real} = \frac{\sum_i \dot{m}_{L,i}}{L_{st} \cdot \sum_i \dot{m}_{K,real,i}} \quad (3)$$

[0044] Indem der Kraftstoffstrom aus obiger Gleichung (2) in die Gleichung (3) eingesetzt wird, ergibt sich folgender Lambda-wert an der Lambdasonde:

$$\lambda_{real} = \frac{MSHFM}{L_{st} \cdot \left(\frac{MSHFM}{M \cdot L_{st}} \cdot \sum_i (g_v \cdot c_b \cdot o_i) + \sum_i L_{0,i} \right)}$$

[0045] In dieser Gleichung wurde ferner berücksichtigt, dass

$$MSHFM = \sum_i \dot{m}_{L,i}$$

gilt.

[0046] Über eine Umformung sowie die Verwendung des Ausdrucks $L_{0,sum} = \sum L_{0,i}$ kann λ_{real} wie folgt geschrieben werden:

$$\lambda_{real} = \frac{M}{\left(\sum_i (g_v \cdot c_b \cdot o_i) + \frac{L_{st} \cdot M}{MSHFM} \cdot L_{0,sum} \right)} \quad (4)$$

[0047] Durch eine Umstellung der Gleichung (4) ergibt sich die nachfolgende Basisgleichung, welche im Rahmen der hier beschriebenen Ausführungsform zur Detektion von defekten Einspritzdüsen verwendet wird:

$$\sum_i (g_v \cdot c_b \cdot o_i) + \frac{L_{st} \cdot M}{MSHFM} \cdot L_{0,sum} = \frac{M}{\lambda_{real}} \quad (5)$$

[0048] Wie nachfolgend näher beschrieben, wird die obige Gleichung (5) für mehrere Testschritte mit unterschiedlich eingestellten Gemischvertrimmungen g_v aufgestellt, aus denen unterschiedliche Lambda-werte folgen. Dabei werden N Testschritte betrachtet, wobei N größer als die Anzahl M der Zylinder ist. Auf diese Weise enthält man ein Gleichungssystem mit N Gleichungen der Art (5), aus dem die Unbekannten in der Form der M Kennlinienabweichungen o_i sowie des Gesamtleckagestroms $L_{0,sum}$ bestimmbar sind. Der Luftmassenstrom $MSHFM$ ist in diesem Gleichungssystem der über den gesamten Testverlauf der einzelnen Testschritte gemessene und gemittelte Luftmassenstrom, der näherungsweise als konstant angenommen wird. Der nachfolgend verwendete Lambda-wert $\lambda_{real,k}$ ist der für den jeweiligen Testschritt k ($k = 1, \dots, N$) bestimmte Lambda-wert Areal und stellt den Mittelwert der im Zeitraum des jeweiligen Testschritts gemessenen einzelnen Lambda-werte dar. Die einzelnen Cylinder-Balancing-Faktoren c_b können aus dem Motorsteuergerät ausgelesen werden.

[0049] Entsprechend den obigen Ausführungen ergibt sich somit aus den obigen Gleichungen ein lineares Gleichungssystem aus N Gleichungen, das in Matrixschreibweise wie folgt lautet:

$$M_{g_v} \cdot V_o = V_\lambda \quad (6)$$

[0050] Dabei bezeichnet M_{g_v} die vorgegebene Testmatrix, welche den Aufbau des Tests definiert und die Dimension $N \times (M+1)$ hat.

[0051] Nachfolgend wird ohne Beschränkung der Allgemeinheit eine Zylinderbank mit $M=4$ Zylindern

betrachtet. Die Testmatrix ist dann eine $N \times 5$ Matrix, die wie folgt lautet:

$$M_{gv} = \begin{pmatrix} gv_{1,1} & gv_{1,2} & gv_{1,3} & gv_{1,4} & 1 \\ gv_{2,1} & gv_{2,2} & gv_{2,3} & gv_{2,4} & 1 \\ gv_{3,1} & gv_{3,2} & gv_{3,3} & gv_{3,4} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 1 \\ gv_{N,1} & gv_{N,2} & gv_{N,3} & gv_{N,4} & 1 \end{pmatrix}$$

[0052] Eine entsprechende Zeile k bezieht sich dabei auf den k -ten Testschritt und eine entsprechende Spalte i auf den Zylinder i . Somit werden durch die Werte $gv_{k,i}$ die entsprechend eingestellten Vertrimmungen der einzelnen Zylinder i in den jeweiligen Testschritten k bezeichnet. Die Vertrimmung wird dabei durch entsprechende Anpassung der Einspritzzeit der jeweiligen Einspritzdüse erreicht. $gv_{k,i} = 0$ bedeutet, dass der entsprechende Injektor keinen Kraftstoff einspritzt und somit ausgeschaltet ist. Demgegenüber bedeutet $gv_{k,i} < 1$, dass der entsprechende Injektor magerer einspritzt, während $gv_{k,i} > 1$ bedeutet, dass der entsprechende Injektor fetter einspritzt, $gv_{k,i} = 1$ stellt den unvertrimmten Zustand des Injektors ohne äußeren Vertrimmeingriff dar. Die Begriffe magerer, fetter und unvertrimmt beziehen sich jeweils auf den Zustand der Einspritzung wie er ohne Testeingriff aus der Vorsteuerung des Motorsteuergeräts bereitgestellt würde.

[0053] Wie sich aus den Ausführungen weiter unten ergibt, wird durch die letzte Spalte der obigen Matrix M_{gv} der Gesamtleckagestrom in das lineare Gleichungssystem einbezogen. In einem konkreten Beispiel bedeutet in der obigen Matrix M_{gv} eine zweite Matrixzeile (1,3 0 1,3 1,3 1), dass im zweiten Testschritt die Zylinder 1, 3 und 4 30% fetter eingestellt sind und der Zylinder 2 ausgeschaltet ist.

[0054] In der obigen Matrixgleichung (6) stellt der Vektor V_0 den Defektvektor der Injektoren der betrachteten Zylinderbank dar, nach welchem aufgelöst werden soll. Dieser Vektor lautet wie folgt:

$$V_0 = \begin{pmatrix} E_{o1} \\ E_{o2} \\ E_{o3} \\ E_{o4} \\ E_{L_{0,sum}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} cb_1 \cdot o_1 \\ cb_2 \cdot o_2 \\ cb_3 \cdot o_3 \\ cb_4 \cdot o_4 \\ L_{st} \cdot 4 / MSHFM \cdot L_{0,sum} \end{pmatrix} \quad (7)$$

[0055] Hierin bezeichnen E_{oi} Fehlerwerte der jeweiligen Injektoren i und $E_{L_{0,sum}}$ die Summe des Fehlerwerts des Gesamtleckagestroms. Wie bereits oben erwähnt, bezeichnen o_1 bis o_4 die entsprechenden Kennlinienabweichungen des jeweiligen Injektors, wobei ein Wert der Kennlinienabweichung von

größer 1 bedeutet, dass der Injektor zu fett einspritzt, ein Wert von 1 bedeutet, dass der Injektor ordnungsgemäß einspritzt, und ein Wert von kleiner 1 bedeutet, dass der Injektor zu mager einspritzt. Wie ebenfalls oben erwähnt, bezeichnet $L_{0,sum}$ die Summe der Leckagen aller Injektoren auf einer Bank in kg/h. Ferner sind die Faktoren cb_1 bis cb_4 die entsprechenden Cylinder-Balancing-Faktoren, die aus dem Motorsteuergerät ausgelesen werden können. L_{st} ist das bereits oben definierte stöchiometrische Luft-Kraftstoff-Verhältnis, das je nach chemischer Kraftstoffzusammensetzung z.B. zwischen 14 und 16 kg/kg liegt. **MSHFM** ist der über den gesamten Testverlauf gemessene und ermittelte Luftmassenstrom über den Heißfilmluftmassenmesser.

[0056] In der obigen Matrixgleichung (6) bezeichnet V_λ den Vektor aus den zu den Testschritten gehörigen Lambdawerten $\lambda_{real,k}$. Dieser Vektor lautet wie folgt:

$$V_\lambda = \begin{pmatrix} 4 / \lambda_{real,1} \\ 4 / \lambda_{real,2} \\ 4 / \lambda_{real,3} \\ \dots \\ 4 / \lambda_{real,N} \end{pmatrix}$$

[0057] Im Rahmen der hier beschriebenen Ausführungsform wird über eine Matrixoperation mit Hilfe

der transponierten Matrix M_{gv}^T die obige Gleichung (6) wie folgt umgeformt:

$$M_{gv}^T \cdot M_{gv} \cdot V_0 = M_{gv}^T \cdot V_\lambda$$

[0058] Hieraus wird über eine Matrixoperation mit einer inversen Matrix der Vektor V_0 wie folgt bestimmt:

$$V_0 = (M_{gv}^T \cdot M_{gv})^{-1} \cdot (M_{gv}^T \cdot V_\lambda)$$

[0059] Aus diesem Vektor können nun die einzelnen Kennlinienabweichungen sowie der Gesamtleckagestrom unter Berücksichtigung der obigen Gleichung (7) wie folgt bestimmt werden:

$$o_1 = E_{o1} / cb_1$$

...

$$o_i = E_{oi} / cb_i$$

...

$$L_{0,sum} = E_{L_{0,sum}} / (L_{st} \cdot 4 / MSHFM)$$

Die einzelnen Kennlinien der Injektoren und der Gesamtleckagestrom bilden die Ausgangsinformationen zur Bestimmung eines Verteilungsschlüssels θ_i für jeden Injektor IN_i sowie eines Restleckagewerts $ERL_{0,sum}$. Mit Hilfe der einzelnen Kennlinienabweichungen σ_i wird eine Konzentrationsmatrix M_L gebildet, wobei diese analog der Testmatrix M_{gv} aufgebaut wird. Die Konzentrationsmatrix M_L für Leckagen ist eine Matrix der Dimension $N \times (M+1)$, wobei nachfolgend ohne Beschränkung der Allgemeinheit eine Zylinderbank mit $M = 4$ Zylindern betrachtet wird. Die Konzentrationsmatrix M_L ist dann eine $N \times 5$ Matrix, die wie folgt lautet:

$$M_L = \begin{pmatrix} a & 1/\sigma_2 & 1/\sigma_3 & 1/\sigma_4 & 1 \\ 1/\sigma_1 & a & 1/\sigma_3 & 1/\sigma_4 & 1 \\ 1/\sigma_1 & 1/\sigma_2 & a & 1/\sigma_4 & 1 \\ 1/\sigma_1 & 1/\sigma_2 & 1/\sigma_3 & a & 1 \\ 1/\sigma_1 & 1/\sigma_2 & 1/\sigma_3 & 1/\sigma_4 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

[0060] Eine entsprechende Zeile k bezieht sich auf den k -ten Testschritt und eine entsprechende Spalte i auf den Zylinder i . Somit werden durch die Werte $1/\sigma_i$ und einen Klassifikationsparameter a die entsprechend reziproken Kennlinienabweichungen der einzelnen Zylinder i in den jeweiligen Testschritten k bezeichnet. Der Klassifikationsparameter a stellt ein Gütemaß des Verbrennungsmotors in Bezug auf den Gesamtleckagestrom $L_{0,sum}$ dar und wird durch eine Klassifikation ermittelt.

[0061] Die Klassifikation erfolgt durch einen Vergleich des Gesamtleckagestroms $L_{0,sum}$ mit einem ersten Grenzwert $GW1'$ und einem zweiten Grenzwert $GW2'$. Der erste Grenzwert $GW1'$ ergibt sich aus der Differenz eines Grenzwerts GW für eine zulässige Leckage eines Injektors IN_i und einer vorgegebenen Standardabweichung σ , die mit der Anzahl der Zylinder multipliziert wird, d.h. $GW1' = \text{Anzahl der Zylinder} \cdot (GW - 5 \cdot \sigma)$. Der Multiplikator 5 wurde als bevorzugt ermittelt, er kann jedoch auch anders gewählt werden. Liegt der Gesamtleckagestrom $L_{0,sum}$ unterhalb des ersten Grenzwerts $GW1'$, so liegt ein Verbrennungsmotor einer ersten Klasse A1 vor. Liegt der Gesamtleckagestrom $L_{0,sum}$ oberhalb des zweiten Grenzwerts $GW2'$, der sich aus der Summe des Grenzwerts GW für die zulässige Leckage eines Injektors IN_i und der vorgegebenen Standardabweichung σ die mit der Anzahl der Zylinder multipliziert wird (d.h. $GW2' = \text{Anzahl der Zylinder} \cdot (GW + 5 \cdot \sigma)$), so liegt der Verbrennungsmotor in einer zweiten Klasse A3. Für die Klassen A1 und A3 ist der Klassifikationsparameter a mit Hilfe eines Best Practice-Verfahrens festgelegt worden. Für die erste Klasse A1 ist z.B. $a = 1$, für die zweite Klasse A3 ist z.B. $a = p_{L0}$. Hierbei ist p_{L0} eine sog. Abdeckungsbandbreite, die sich durch eine Begrenzung der Verteilung auf den Grenzwert $GW \pm 5 \cdot \sigma$ ergibt und zwar zu $p_{L0} = 10^{-6}$.

[0062] Durch dieses Klassifikationsverfahren wird darüber hinaus ein im weiteren erforderlicher Korrekturfaktor f bestimmt, wobei der Korrekturfaktor f ebenfalls durch ein Best Practice-Verfahren festgelegt wird. Fällt der Verbrennungsmotor in die erste Klasse A1, so wird f festgelegt zu $f = p_{L0}^2$. Fällt der Verbrennungsmotor in die zweite Klasse A3, so wird der Korrekturfaktor f festgesetzt auf $f = p_{L0}$.

[0063] Für den Fall, dass der Gesamtleckagestrom $L_{0,sum}$ zwischen dem ersten und dem zweiten Grenzwert $GW1'$ bzw. $GW2'$ liegt (dritte Klasse A2), so folgt eine Interpolation des Klassifikationsparameters a und des Korrekturfaktors f anhand der für die Klassen A1 und A3 festgelegten Werte für a und f . Die Führungsvariable für die Interpolation ist in diesem Fall der Gesamtleckagestrom $L_{0,sum}$.

[0064] Ist der Klassifikationsparameter a bekannt, kann die Konzentrationsmatrix M_L gemäß der obigen Form vollständig belegt werden. Durch die Konzentrationsmatrix M_L erfolgt in den k Testschritten die Ansteuerung der Injektoren IN_i entsprechend dem oben beschriebenen Vorgehen. In jedem Testschritt k werden die Kennlinienabweichungen, d.h. die Bauteildefekte der Injektoren IN_i durch die reziproke Kennlinienabweichung σ_i kompensiert.

[0065] Wie sich aus den Ausführungen ergibt, wird durch die letzte Spalte der Konzentrationsmatrix M_L ein Fehlerterm in das Gleichungssystem einbezogen. Ferner ist durch die diagonale Anordnung der Klassifikationsfaktoren a in den Zeilen k der Konzentrationsmatrix M_L sichergestellt, dass die Zeilen linear unabhängig voneinander sind, wodurch die Lösbarkeit des Gleichungssystems verbessert ist.

[0066] In der folgenden Gleichung

$$V_L = \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ f^{-1} \cdot ERL_{0,sum} \end{pmatrix} \quad (9)$$

ist ein Leckverteilungsvektor V_L dargestellt, wobei θ_i die Verteilungsschlüssel für den Gesamtleckagestrom $L_{0,sum}$ und damit der gesuchte Lösungsraum sind. $ERL_{0,sum}$ stellt einen Fehlerterm dar, damit die Gleichung numerisch stabil ist. Der Korrekturfaktor f wird als Reziprokwert mit dem Fehlerterm $ERL_{0,sum}$ multipliziert. $ERL_{0,sum}$ stellt einen numerischen Fehlereinfluss der Restleckage dar. Er dient dazu, zusammen mit dem Korrekturfaktor f die Modellgenauigkeit zu skalieren. Der Korrekturfaktor f bestimmt sich aus der oben beschriebenen Klassifikation.

[0067] Die Lambdawerte $\lambda_{real,k}$ für den Messwertvektor werden innerhalb jedes Messschritts k mit der zugehörigen Lambdasonde gemessen, wie dies vorstehend beschrieben wurde.

$$V_{\lambda} = \begin{pmatrix} 4 / \lambda_{real,1} \\ \dots \\ 4 / \lambda_{real,4} \\ 4 / \lambda_{real,5} \end{pmatrix} \quad (10)$$

[0068] Entsprechend den obigen Ausführungen ergibt sich somit ein lineares Gleichungssystem mit N Gleichungen, das der Matrixschreibweise wie folgt lautet:

$$M_L \cdot V_L = V_{\lambda} \quad (11)$$

[0069] Darin sind M_L die Konzentrationsmatrix, V_L der Verteilungsvektor und V_{λ} der aus den zu den Testschritten ermittelte Vektor mit den Lambdawerten $\lambda_{real,k}$. Gleichung (11) kann nach dem Leckverteilsvektor V_L aufgelöst werden zu

$$V_L = \left(M_L^T \cdot M_L \right)^{-1} \cdot \left(M_L^T \cdot V_{\lambda} \right) \quad (12)$$

[0070] Die Verteilungsfaktoren v_i ergeben sich durch die Bestimmung der Verteilungsschlüssel θ_i aus dem aufgelösten Leckverteilsvektor V_L zu:

$$v_i = \frac{\theta_i}{\sum_i |\theta_i|} \quad (13)$$

[0071] In dieser Gleichung (13) gibt der Verteilungsfaktor v_i die anteilige Leckage pro Injektor bzw. Zylinder wieder.

[0072] Sollten sich durch die oben beschriebene numerische Lösung negative Verteilungsfaktoren v_i ergeben, so wird für die richtige Bilanzierung der Leckageströme ein jeweiliger Verteilungsfaktor v_i zu „0“ gesetzt. Alternativ könnte das oben beschriebene Vorgehen mit leicht veränderten Werten für den Klassifikationsfaktor a und den Korrekturfaktor f durchgeführt werden, bis keine negativen Verteilungsfaktoren v_i resultieren.

[0073] Durch die nachfolgende Gleichung

$$L_{0,i} = v_i \cdot L_{0,sum} \quad (14)$$

kann dann der zylinderindividuelle Leckagestrom $L_{0,i}$ ermittelt werden, wobei sich dieser aus dem Pro-

dukt des jeweiligen Verteilungsfaktors v_i und dem Gesamtleckagestrom $L_{0,sum}$ ergibt.

[0074] Fig. 1 fasst in einem Ablaufdiagramm nochmals die wesentlichen Schritte des beschriebenen Verfahrens zusammen. Ausgangspunkt ist eine Zylinderbank **ZB** mit M Betriebskammern **BK**, wobei jeweils eine Einspritzdüse **IN_i** pro Brennkammer **BK_i** vorgesehen ist. Dieser Ausgangspunkt ist in Fig. 1 mit ST bezeichnet. In einem ersten Schritt erfolgt die Ermittlung der Kennlinienabweichung o_i jeder Einspritzdüse **IN_i** und des Gesamtleckagestroms $L_{0,sum}$ der Zylinderbank (Schritt S1). Die Ermittlung der einzelnen Kennlinienabweichungen sowie des Gesamtleckagestroms kann mit dem in der EP 3 194 750 B1 beschriebenen Verfahren erfolgen.

[0075] In einem zweiten Schritt S2 erfolgt die Ermittlung des Klassifikationsparameters a und des Korrekturfaktors f anhand eines Vergleichs des Gesamtleckagestroms $L_{0,sum}$ mit zwei verschiedenen gewählten Grenzwerten $GW1'$ und $GW2'$. Abhängig davon, ob der Gesamtleckagestrom $L_{0,sum}$ kleiner als der erste Grenzwert, größer als der zweite Grenzwert oder zwischen dem ersten und dem zweiten Grenzwert liegt, werden durch Best Practice-Verfahren vorgegebene Werte für die Klassifikationsparameter a und den Korrekturfaktor f gewählt.

[0076] Im Rahmen des Testablaufs werden in einem Schritt S3 in jeweiligen Testschritten TS_j ($j = 1, \dots, N$, wobei $N > M$) die reziproken Kennlinienabweichungen o_i der Einspritzdüsen **IN_i** eingestellt und der Lambdawert der Zylinderbank **ZB** ermittelt. Gleichzeitig wird der Klassifikationsparameter a in der hierzu verwendeten Konzentrationsmatrix verwendet.

[0077] Gemäß Schritt S4 erfolgt die Bestimmung eines Verteilungsfaktors v_i für jede Einspritzdüse **IN_i** sowie eines Restleckagewerts $ERL_{0,sum}$ durch rechnergestützte Lösung einer Matrizenrechnung. Durch Multiplikation mit dem Gesamtleckagestrom $L_{0,sum}$ ergibt sich der zylinderindividuelle Leckagestrom $L_{0,i}$.

Bezugszeichenliste

ZB	Zylinderbank
BK_i	Brennkammer
M	Anzahl der Einspritzdüsen
IN_i	Einspritzdüse
gv_i	Gemischvertrimmungen
k	Index des Testschritts
N	Anzahl der Testschritte
o_i	Kennlinienabweichung
L_{0,sum}	Gesamtleckagestrom
MSHFM	Luftmassenstrom

$\lambda_{\text{real},k}$	im jeweiligen Testschritt gültiger Lambdawert
WB	Wertebereich
TH	Schwellwert
F	Funktion
LUR	Laufunruhe
Ä	Zylinder-Verbrennungsluftverhältnis
v_i	Verteilungsfaktor
Θ_i	Verteilungsschlüssel

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- EP 3194750 B1 [0004, 0005, 0009, 0028, 0029, 0074]

Patentansprüche

1. Verfahren zur Erkennung von defekten Einspritzdüsen (IN_i) zur Zuführung von Kraftstoff in die Brennkammern (BK_i) eines Verbrennungsmotors, insbesondere in einem Kraftfahrzeug, wobei der Verbrennungsmotor eine oder mehrere Zylinderbänke (ZB) aufweist, wobei eine jeweilige Zylinderbank (ZB) mehrere Zylinder mit jeweils einer darin ausgebildeten Brennkammer (BK_i) und zumindest einer Einspritzdüse (IN_i) umfasst und wobei den Brennkammern (BK_i) einer jeweiligen Zylinderbank (ZB) ein gemeinsamer Luftmassenstrom zugeführt wird und von den Brennkammern (BK_i) einer jeweiligen Zylinderbank (ZB) ein gemeinsamer Abgasstrom abgeführt wird, wobei

- ein Normabweichungswert (α_i) für jede Einspritzdüse (IN_i) sowie ein Gesamtleckagestrom ($L_{0, \text{sum}}$) ermittelt werden, wobei der Normabweichungswert (α_i) für eine jeweilige Einspritzdüse (IN_i) eine Abweichung des durch die jeweilige Einspritzdüse (IN_i) erzeugten Kraftstoffmassenstroms von einem Normbetriebswert der jeweiligen Einspritzdüse (IN_i) beschreibt und der Gesamtleckagestrom ($L_{0, \text{sum}}$) den Kraftstoffmassenstrom beschreibt, der durch Leckagen aller Einspritzdüsen (IN_i) der jeweiligen Zylinderbank (ZB) verursacht ist;

- für eine jeweilige Zylinderbank (ZB) im Leerlaufbetrieb des Verbrennungsmotors eine Anzahl von aufeinander folgenden Testschritten (TSj) durchgeführt wird, welche größer als die Anzahl der Zylinder der jeweiligen Zylinderbank (ZB) ist, wobei in einem jeweiligen Testschritt (TSj) für die einzelnen Einspritzdüsen der Kehrwert des für die jeweilige Einspritzdüse (IN_i) ermittelten Normabweichungswerts (α_i) eingestellt ist, mit Ausnahme für eine der Einspritzdüsen (IN_i), für die ein vorab bestimmter Klassifikationsparameter (a), der ein Gütemaß für den Verbrennungsmotor in Bezug auf den Gesamtleckagestrom ($L_{0, \text{sum}}$) repräsentiert, eingestellt ist, und wobei während der Testschritte (TSj) Messungen des Lambdawerts des von der Zylinderbank (ZB) abgeführten Abgasstroms und Messungen des der Zylinderbank (ZB) zugeführten Luftmassenstroms durchgeführt werden;

- nach Durchführung der Anzahl von Testschritten (TSj) ein Verteilungsschlüssel (α_i) für jede Einspritzdüse (IN_i) sowie ein Restleckagewert ($ERL_{0, \text{sum}}$) ermittelt werden, wobei der Verteilungsschlüssel (α_i) für eine jeweilige Einspritzdüse (IN_i) einen Anteil des durch die jeweilige Einspritzdüse (IN_i) verursachten Leckageanteils am Gesamtleckagestrom ($L_{0, \text{sum}}$) beschreibt und der Restleckagewert ($ERL_{0, \text{sum}}$) eine Differenz zwischen dem Gesamtleckagestrom ($L_{0, \text{sum}}$) und der Summe der Leckageanteile der Einspritzdüsen (IN_i) beschreibt;

- die Ermittlung von Verteilungsfaktoren (v_i) für die jeweiligen Einspritzdüsen (IN_i) und des Restleckagewert ($ERL_{0, \text{sum}}$) derart erfolgt, dass eine Matrizenrechnung rechnergestützt gelöst wird, welche für einen jeweiligen Testschritt (TSj) eine Gleichung um-

fasst, welche die Verteilungsschlüssel (α_i) und den Restleckagewert ($ERL_{0, \text{sum}}$) in Abhängigkeit von den im jeweiligen Testschritt (TSj) eingestellten reziproken Normabweichungswerten (α_i) und dem Klassifikationsparameter (a), und einem für den jeweiligen Testschritt (TSj) gültigen und aus den Messungen des Lambdawerts abgeleiteten Lambdawert ($\lambda_{\text{real}, k}$) beschreibt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Verteilungsschlüssel (α_i) jeweils einen prozentualen Faktor darstellen, der durch Multiplikation mit dem Gesamtleckagestrom ($L_{0, \text{sum}}$) den Leckage-Kraftstoffmassenstrom durch die jeweilige Einspritzdüse (IN_i) liefert.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Verteilungsfaktoren (v_i) für die jeweiligen Einspritzdüsen (IN_i) oder die aus den Verteilungsfaktoren (v_i) ermittelten absoluten Verteilungsleckagen über eine Schnittstelle ausgegeben werden.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine jeweilige Gleichung des Gleichungssystems den um einen vorab bestimmten reziproken Korrekturfaktor (f) bereinigten Restleckagewert ($ERL_{0, \text{sum}}$) umfasst, wobei der Korrekturfaktor (f) abhängig von dem Gütemaß für den Verbrennungsmotor in Bezug auf den Gesamtleckagestrom ($L_{0, \text{sum}}$) ist.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Klassifikationsparameter (a) und der Korrekturfaktor (f) durch einen Vergleich mit dem Gesamtleckagestrom ($L_{0, \text{sum}}$) bestimmt werden, wobei

- wenn der Gesamtleckagestrom ($L_{0, \text{sum}}$) kleiner als ein erster Grenzwert (GW1') ist, der Klassifikationsparameter (a) auf einen ersten Klassifikationsparameterwert und der Korrekturfaktor (f) auf einen ersten Korrekturfaktorwert gesetzt werden;

- wenn der Gesamtleckagestrom ($L_{0, \text{sum}}$) größer als ein zweiter Grenzwert (GW2') ist, der Klassifikationsparameter (a) auf einen zweiten Klassifikationsparameterwert und der Korrekturfaktor (f) auf einen zweiten Korrekturfaktorwert gesetzt werden.

6. Verfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass der erste Grenzwert (GW1') sich aus der Differenz eines Grenzwerts (GW) für eine zulässige Leckage eines Injektors (IN_i) und einer vorgegebenen Standardabweichung (σ), die mit der Anzahl der Zylinder multipliziert wird, ergibt.

7. Verfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass der zweite Grenzwert (GW2') sich aus der Summe eines Grenzwerts (GW) für eine zulässige Leckage eines Injektors (IN_i) und einer vorgege-

benen Standardabweichung (σ), die mit der Anzahl der Zylinder multipliziert wird, ergibt.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Klassifikationsparameter (a) auf einen dritten Klassifikationsparameterwert, der durch Interpolation zwischen dem ersten und dem zweiten Klassifikationsparameterwert ermittelt wird, gesetzt wird, und der Korrekturfaktor (f) auf einen dritten Korrekturfaktorwert gesetzt wird, der durch Interpolation zwischen dem ersten und dem zweiten Korrekturfaktorwert ermittelt wird, wenn der Gesamtleckagestrom ($L_{0,sum}$) größer als der erste Grenzwert (GW1') und kleiner als der zweite Grenzwert (GW2') ist.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die reziproken Normabweichungswerte (o_i) für die jeweiligen Testschritte (TSj) derart eingestellt sind, dass auf einen Testschritt (TSj), in dem zumindest eine Einspritzdüse (IN_i) einen Kraftstoffmassenstrom mit reziprokem Normabweichungswert (o_i) erzeugt, ein Testschritt (TSj) folgt, in dem jede Einspritzdüse (IN_i) einen Kraftstoffmassenstrom gemäß dem vorab bestimmten Klassifikationsparameter (a) erzeugt.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine jeweilige Gleichung zur Ermittlung der Normabweichungswerte (o_i) des Gesamtleckagestroms ($L_{0,sum}$) und des Gleichungssystems wie folgt lautet:

$$\sum_i (gv_i \cdot cb_i \cdot o_i) + \frac{L_{st} \cdot \lambda_{soll} \cdot M}{MSHFM} \cdot L_{0,sum} = \frac{M}{\lambda_{real,k}}$$

wobei $i = 1, \dots, M$ die Einspritzdüsen (IN_i) aus der Anzahl von M Einspritzdüsen (IN_i) der jeweiligen Zylinderbank (ZB) indiziert;

wobei gv_i die im entsprechenden Testschritt (TSj) eingestellten Gemischfaktoren (gv_i) in der Form einer Gemischvertrimmung repräsentieren, welche ein prozentualer Faktor ist, der durch Multiplikation mit dem von der jeweiligen Einspritzdüse (IN_i) im Normalbetrieb des Verbrennungsmotors erzeugten Kraftstoffmassenstrom den tatsächlichen Kraftstoffmassenstrom der jeweiligen Einspritzdüse (IN_i) liefert;

wobei alle cb_i auf den Wert 1 gesetzt sind oder wobei ein jeweiliges cb_i ein Gemischanpassungsparameter für eine jeweilige Einspritzdüse (IN_i) ist, der den durch die jeweilige Einspritzdüse (IN_i) bei deren Ansteuerung generierten Kraftstoffmassenstrom zur Erreichung von Laufruhe des Verbrennungsmotors anpasst;

wobei o_i der Normabweichungswert (o_i) für eine jeweilige Einspritzdüse (IN_i) ist, der einen prozentualen Faktor darstellt, der durch Multiplikation mit dem Normbetriebswert der jeweiligen Einspritzdüse (IN_i)

den durch die jeweilige Einspritzdüse (IN_i) erzeugten Kraftstoffmassenstrom liefert;

wobei $L_{st} \cdot \lambda_{soll}$ ein gewünschtes und für alle Brennkammern (BK_i) identisches Luft-Kraftstoff-Verhältnis bei einer Kraftstoffverbrennung in der Brennkammer (BK_i) ist und dabei L_{st} das stöchiometrische Luft-Kraftstoff-Verhältnis und λ_{soll} einen gewünschten Lambdawert der Kraftstoffverbrennung in der Brennkammer repräsentiert;

wobei MSHFM der für den jeweiligen Testschritt (TSj) gültige Luftmassenstrom (MSHFM) ist;

wobei $L_{0,sum}$ der Gesamtleckagestrom ($L_{0,sum}$) ist;

wobei $\lambda_{real,k}$ der für den jeweiligen Testschritt (TSj) gültige Lambdawert ($\lambda_{real,k}$) ist.

11. Verfahren nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Gleichungssystem über eine Matrizenrechnung gelöst wird.

12. Motortesteinrichtung zur Erkennung von defekten Einspritzdüsen (IN_i) zur Zuführung von Kraftstoff in die Brennkammern (BK_i) eines Verbrennungsmotors, insbesondere in einem Kraftfahrzeug, wobei der Verbrennungsmotor eine oder mehrere Zylinderbänke (ZB) aufweist, wobei eine jeweilige Zylinderbank (ZB) mehrere Zylinder mit jeweils einer darin ausgebildeten Brennkammer (BK_i) und zumindest einer Einspritzdüse (IN_i) umfasst und wobei den Brennkammern (BK_i) einer jeweiligen Zylinderbank (ZB) ein gemeinsamer Luftmassenstrom zugeführt wird und von den Brennkammern (BK_i) einer jeweiligen Zylinderbank (ZB) ein gemeinsamer Abgasstrom abgeführt wird, wobei die Motortesteinrichtung zur Durchführung eines Verfahrens eingerichtet ist, bei dem:

- ein Normabweichungswert (o_i) für jede Einspritzdüse (IN_i) sowie ein Gesamtleckagestrom ($L_{0,sum}$) ermittelt werden, wobei der Normabweichungswert (o_i) für eine jeweilige Einspritzdüse (IN_i) eine Abweichung des durch die jeweilige Einspritzdüse (IN_i) erzeugten Kraftstoffmassenstroms von einem Normbetriebswert der jeweiligen Einspritzdüse (IN_i) beschreibt und der Gesamtleckagestrom ($L_{0,sum}$) den Kraftstoffmassenstrom beschreibt, der durch Leckagen aller Einspritzdüsen (IN_i) der jeweiligen Zylinderbank (ZB) verursacht ist;

- für eine jeweilige Zylinderbank (ZB) im Leerlaufbetrieb des Verbrennungsmotors eine Anzahl von aufeinander folgenden Testschritten (TSj) durchgeführt wird, welche größer als die Anzahl der Zylinder der jeweiligen Zylinderbank (ZB) ist, wobei in einem jeweiligen Testschritt (TSj) für die einzelnen Einspritzdüsen der Kehrwert des für die jeweilige Einspritzdüse (IN_i) ermittelten Normabweichungswerts (o_i) eingestellt ist, mit Ausnahme für eine der Einspritzdüsen (IN_i), für die ein vorab bestimmter Klassifikationsparameter (a), der ein Gütemaß für den Verbrennungsmotor in Bezug auf den Gesamtleckagestrom ($L_{0,sum}$) repräsentiert, eingestellt ist, und wobei während der Testschritte (TSj) Messungen des Lambdawerts des von der Zylinderbank (ZB) abgeführten Abgasstroms

und Messungen des der Zylinderbank (ZB) zugeführten Luftmassenstroms durchgeführt werden;

- nach Durchführung der Anzahl von Testschritten (TSj) ein Verteilungsschlüssel (α_i) für jede Einspritzdüse (IN_i) sowie ein Restleckagewert ($ERL_{0,sum}$) ermittelt werden, wobei der Verteilungsschlüssel (α_i) für eine jeweilige Einspritzdüse (IN_i) einen Anteil des durch die jeweilige Einspritzdüse (IN_i) verursachten Leckageanteils am Gesamtleckagestrom ($L_{0,sum}$) beschreibt und der Restleckagewert ($ERL_{0,sum}$) eine Differenz zwischen dem Gesamtleckagestrom ($L_{0,sum}$) und der Summe der Leckageanteile der Einspritzdüsen (IN_i) beschreibt;
- die Ermittlung der Verteilungsfaktoren (v_i) für die jeweiligen Einspritzdüsen (IN_i) und des Restleckagewerts ($ERL_{0,sum}$) derart erfolgt, dass eine Matrizenrechnung rechnergestützt gelöst wird, welche für einen jeweiligen Testschritt (TSj) eine Gleichung umfasst, welche die Verteilungsschlüssel (α_i) und den Restleckagewert ($ERL_{0,sum}$) in Abhängigkeit von den im jeweiligen Testschritt (TSj) eingestellten reziproken Normabweichungswerten (α_i) und dem Klassifikationsparameter (a), und einem für den jeweiligen Testschritt (TSj) gültigen und aus den Messungen des Lambdawerts abgeleiteten Lambdawert ($\lambda_{real,k}$) beschreibt.

13. Motortesteinrichtung nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Motortesteinrichtung zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 2 bis 11 eingerichtet ist.

14. Kraftfahrzeug mit Verbrennungsmotor und Einspritzdüsen (IN_i) zur Zuführung von Kraftstoff in die Brennkammern (BK_i) des Verbrennungsmotors, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Kraftfahrzeug eine Motortesteinrichtung nach Anspruch 12 oder 13 umfasst.

Es folgt eine Seite Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

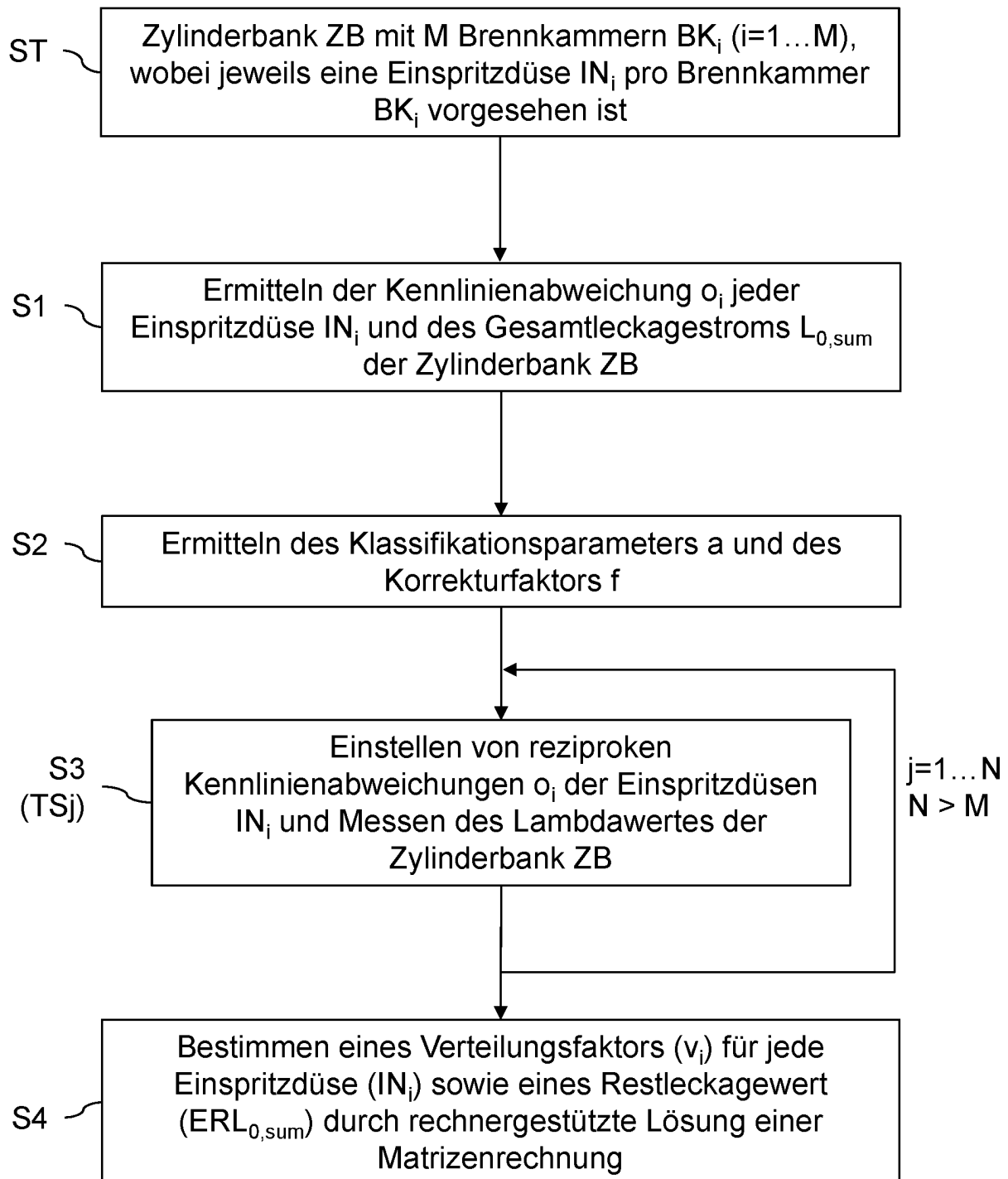


Fig. 1