

(12) **Patentschrift**

(21) Anmeldenummer: A 126/2007 (51) Int. Cl.⁸: **G01M 15/00** (2006.01)
(22) Anmeldetag: 2007-01-25
(43) Veröffentlicht am: 2008-05-15

(56) Entgegenhaltungen:
RU 2175120C2 EP 1729243A1

(73) Patentanmelder:
AVL LIST GMBH
A-8020 GRAZ (AT)

(72) Erfinder:
KORSUNSKY EVGENY DR.
GRAZ (AT)
HÜLSER HOLGER DR.
GRAZ (AT)

(54) **VERFAHREN ZUR DIAGNOSE UND KLASSIFIKATION VON FEHLERN EINER
BRENNKRAFTMASCHINE**

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Diagnose und Klassifikation von Fehlern einer Brennkraftmaschine und/oder ihrer Teilsysteme, wobei die folgenden Schritte vorgesehen sind:

- Aufzeichnen von Messsignalen, die Informationen über die Brennkraftmaschine und/oder ihre Teilsysteme enthalten
- Berechnung von Symptomen aus der Abweichung zwischen den Messsignalen und Referenzwerten für die Messsignale
- Berechnung zumindest eines ersten Ausprägungsgrades von Fehlern aus der Kombination eines oder mehrerer Symptome
- Bestimmen und Klassifizieren des Gesamtzustandes der Brennkraftmaschine und/oder ihrer Teilsysteme aus den Fehlern und deren Ausprägungsgrad.

	S 1	S 2	S 3	...	S n
F 1	0	-	x		0
F 2	+	-	0		+
F 3	x	+	-		0
...					
F m	-	x	0		0

Fig. 1

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Diagnose und Klassifikation von Fehlern einer Brennkraftmaschine und/oder ihrer Teilsysteme, wobei zumindest ein Informationen über die Brennkraftmaschine und/oder ihrer Teilsysteme enthaltendes Messsignal aufgezeichnet wird und zumindest ein Symptom für einen Fehler aus der Abweichung zwischen einem aus dem Messsignal gewonnenen Merkmal und einem Referenzwert für dieses Merkmal ermittelt wird.

Die zunehmende Komplexität moderner Brennkraftmaschinen und gestiegene Anforderungen an die Diagnose verlangen nach zuverlässigen und robusten Diagnoseverfahren, sowohl im laufenden Motorbetrieb als auch bei nachträglicher Auswertung von im Betrieb gewonnenen Messdaten. Im Bereich der stationären und Schiffs-Großmotoren wird dieser Bedarf durch sehr hohe Reparatur- und Betriebskosten und zunehmenden Mangel an qualifiziertem Servicepersonal verstärkt. Derzeit werden bei Brennkraftmaschinen verschiedene Methoden zur Erkennung von Fehlerzuständen angewendet, angefangen von einfachen Grenzwertüberwachungen oder Plausibilitätsprüfungen bis hin zu fortgeschrittenen Verfahren wie Parameterschätzung, Paritätsraumverfahren oder Zustandsschätzung (siehe z.B. R. Isermann, "Modellgestützte Steuerung, Regelung und Diagnose von Verbrennungsmotoren", Springer Verlag, 2003). Diesen Verfahren gemeinsam ist das Problem, dass aus der Analyse einzelner Signale oder der Schätzung einzelner Parameter nicht einfach auf Fehlerzustände geschlossen werden kann. Solche bisher bekannten Diagnoseverfahren leiden unter dem Mangel, dass viele Fehler sich durch ähnliche Symptome äußern und dass einzelne fehlende oder unplausible Signale oft dazu führen, dass keinerlei Diagnose mehr möglich ist.

Die EP 0 398 481 B1 offenbart deshalb ein auf einem trainierbaren Mustererkennungssystem (etwa auf einem neuronalen Netzwerk) basierendes Diagnoseverfahren. Das Verfahren benötigt aber eine Reihe von Motorbetriebstests auf einem Testmotor, um Daten zu generieren, die für ein Training des Mustererkennungssystems benutzt werden. Insbesondere muss dieses Mustererkennungsverfahren auch an echten Fehlerzuständen eines Motors trainiert werden. Dieses Vorgehen ist insbesondere dann nicht möglich, wenn die Präparation eines Motors mit definierten Fehlerzuständen nur mit unverhältnismäßig hohen Kosten oder Risiken verbunden ist, wie zum Beispiel im Bereich der stationären und Schiffs-Großmotoren.

Aufgabe der Erfindung ist es, diese Nachteile zu vermeiden und ein Verfahren zu entwickeln, mit welchem mit möglichst geringem Aufwand Fehler bei einer Brennkraftmaschine diagnostiziert und klassifiziert werden können.

Erfindungsgemäß erfolgt dies dadurch, dass zumindest ein Ausprägungsgrad des Fehlers aus der Kombination mehrerer Symptome berechnet wird.

Das erfindungsgemäße Verfahren ist in der Lage, aus Messdaten:

- für einen oder mehrere Fehler einer Brennkraftmaschine oder eines Teilsystems einer Brennkraftmaschine das Vorliegen dieses Fehlers zu diagnostizieren
- für die oben genannten Fehler einen Schweregrad oder Ausprägungsgrad zu bestimmen
- aus mehreren möglichen Fehlern und gegebenenfalls deren Schweregrad einen Gesamtzustand der Brennkraftmaschine und/oder eines oder mehrerer seiner Teilsysteme (z.B. Zylinder, Aufladegruppe, etc.) zu bestimmen
- auch bei Fehlen und/oder Unplausibilität eines oder mehrerer Messsignale noch Aussagen über zumindest einige mögliche Fehler machen zu können.

Hierbei ist das erfindungsgemäße Verfahren so flexibel, dass:

- sowohl eine Erweiterung auf neue Fehler und/oder neue Messsignale als auch eine Verbindung zwischen empirischem Expertenwissen und funktionellen Kenntnissen möglich ist;
- trotz der gegenseitigen Beeinflussung der Fehler eine Isolation und Bewertung einzelner Fehler möglich ist.

Vorzugsweise ist dabei vorgesehen, dass der Gesamtzustand der Brennkraftmaschine und/oder ihrer Teilsysteme aus den Fehlern und deren Ausprägungsgraden bestimmt und klassifiziert wird.

- 5 Eine einfache Fehlererkennung ist möglich, wenn jeder Fehler anhand einer Fehler-Symptom-Tabelle identifiziert wird, wobei die Fehler-Symptom-Tabelle für jedes aus den Abweichungen gewonnene Symptom und für jeden Fehler, auf den die Brennkraftmaschine und/oder ihrer Teilsysteme untersucht wird, den Zusammenhang zwischen Symptom und Fehler enthält.
- 10 In weiterer Ausführung der Erfindung ist vorgesehen, dass für jeden Fehler und für jedes für diesen Fehler relevante Symptom eine Fehlerteilwahrscheinlichkeitsfunktion FW definiert wird, mit welcher abhängig von der Größe des Symptoms eine Wahrscheinlichkeit berechnet wird, mit welcher das Symptom zum Fehler beiträgt, wobei vorzugsweise die Fehler anhand der Fehlerwahrscheinlichkeit W_i , berechnet als die Summe aller Fehlerteilwahrscheinlichkeiten W_{ik}
- 15 normiert auf die Summe aller Maxima A_{ik} der Fehlerteilwahrscheinlichkeitsfunktionen:

$$W_i = \frac{\sum_{k=1}^n W_{ik}}{\sum_{k=1}^n A_{ik}} \quad (1)$$

detektiert werden. Eine einfache Ausführung der Erfindung sieht vor, dass die Fehlerteilwahrscheinlichkeitsfunktion FW eine einfache Rampe ist, die vom Wert Null zu der Amplitude A_{ij} im bestimmten Bereich der Symptomgröße linear ansteigt.

Eine besonders detaillierte Fehlerdiagnose lässt sich erreichen, wenn zumindest zwei unterschiedliche Ausprägungsgrade zumindest eines Fehlers erkannt werden können.

- 30 Um eine Verfälschung des Messergebnisses zu vermeiden, ist vorgesehen, dass jene Symptome, die aufgrund von nicht vorhandenen und/oder unplausiblen Messwerten nicht berechnet werden können, bei der Erkennung von Fehlern verworfen werden, und dass ein Fehler als nicht erkennbar klassifiziert wird, wenn das Gewicht aller nicht berechenbarer Symptome größer als ein definierter Schwellenwert wird, wobei vorzugsweise das Gewicht P_i aller nicht berechneter Symptome als die Summe der Maxima A_{ik} aller entsprechenden Fehlerteilwahrscheinlichkeitsfunktionen FW normiert auf die Summe aller Maxima A_{ik} :

$$P_i = \frac{\sum_{k=1}^n A_{ik}}{\sum_{k=1}^n A_{ik}} \quad (3)$$

berechnet wird. Darüber hinaus ist es vorteilhaft, wenn eine Größe G_z , die den Gesamtzustand jedes einzelnen Teilsystems der Brennkraftmaschine abbildet durch die Formel

$$G_z = \min \left\{ 1; \frac{\sum_{i=1}^m K_i \cdot H(W_{iz})}{\max(K_i)} \right\} \quad (4)$$

berechnet wird, wobei K_i ein Wichtungsfaktor ist, der die Wichtigkeit des Fehlers "i" für Zustand des Teilsystems "z" widerspiegelt, die Größe W_{iz} die gesamte Wahrscheinlichkeit des ersten Ausprägungsgrades des Fehlers "i" im Teilsystem "z", und die Funktion $H(x)$ eine Filterfunktion

ist, die sicherstellt, dass der Fehler erst dann berücksichtigt wird wenn er als "wahrscheinlich" eingestuft wurde, und dass der Zustand des Teilsystems als "fehlerhaft" definiert wird, wenn die Größe G_z größer als ein definierter Schwellenwert G_s ist.

Der Gesamtzustand der Brennkraftmaschine lässt sich aus dem Zustand der Teilsysteme der Brennkraftmaschine ermitteln. Um die Aussagekraft des Verfahrens weiter zu steigern, ist es besonders vorteilhaft, wenn ein Gesamtzustand der Brennkraftmaschine und/oder ihrer Teilsysteme als nicht bewertbar klassifiziert wird, wenn das Gewicht der nicht erkennbaren Fehler größer als ein Schwellenwert ist.

Die Erfindung wird im Folgenden anhand der Figuren näher erläutert.

Es zeigen:

Fig. 1 ein Beispiel für eine Fehler-Symptom-Tabelle

Fig. 2 ein Beispiel für eine Fehlerteilwahrscheinlichkeitsfunktion FW;

Fig. 3 einen Ablaufplan für die Klassifikation eines einzelnen Fehlers für den zwei Ausprägungsgraden berechnet werden;

Fig. 4 ein Beispiel für einen Ablaufplan für die Klassifikation des Gesamtzustandes der Brennkraftmaschine oder eines Teilsystems

Fig. 5 ein Beispiel für Filterfunktion, die bei Berechnung des Gesamtzustandes der einzelnen Teilsysteme des Motors benutzt wird;

Fig. 6 einen Ablaufplan für die Klassifikation des Gesamtzustandes des Motors.

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren werden zunächst, basierend auf Expertenwissen, experimentellen und theoretischen Untersuchungen und Simulationen mathematischer Modelle, die Merkmale (z.B. Messsignale) identifiziert, die besonders stark auf die festzustellenden Fehler reagieren. Die Symptome $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$, d.h. die fehlerbedingten Abweichungen dieser Merkmale von zugehörigen Referenzwerten, bilden die Grundlage für die nachfolgende Fehlerdiagnose. Dabei sind die Referenzwerte entweder Nominalwerte, welche an einem nicht fehlerhaften Motor gemessen wurden, oder Modellwerte aus mathematischen Simulationen des normalen Prozesses, oder - für Brennkraftmaschinen mit mehreren Zylindern - die Mittelwerte oder Medianwerte der Messsignale über alle Zylinder.

In einer ersten, besonders einfachen Ausführungsform des Verfahrens werden die Fehler $F_1, F_2, F_3, \dots, F_m$ anhand einer Fehler-Symptom-Tabelle identifiziert, für die in Fig. 1 ein Beispiel gezeigt ist. Diese Tabelle enthält für jedes aus den Merkmalen gewonnene Symptom $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$ und alle Fehler $F_1, F_2, F_3, \dots, F_m$, auf die die Brennkraftmaschine und/oder ihre Teilsysteme untersucht werden, den Zusammenhang zwischen Symptom und Fehler. Dabei bedeuten:

x kein Zusammenhang zwischen Fehler und Symptom, d.h. ob ein Fehler vorliegt ist unabhängig von der Abweichung zwischen dem aktuellen Wert des Merkmals und dem Referenzwert

+ die Differenz zwischen dem aktuellen Wert des Merkmals M und dem Referenzwert R ist größer als ein erster Schwellenwert Q_1 für positive Abweichungen ($M - R > Q_1$);

- die Differenz zwischen dem Referenzwert R und dem aktuellen Wert des Merkmals M ist größer als ein zweiter Schwellenwert Q_2 für negative Abweichungen ($R - M > Q_2$);

0 die Differenz zwischen dem aktuellen Wert des Merkmals M und dem Referenzwert R ist kleiner oder gleich dem ersten Schwellenwert Q_1 für positive Abweichungen und die Differenz zwischen dem Referenzwert R und dem aktuellen Wert des Merkmals M ist kleiner oder gleich dem zweiten Schwellenwert Q_2 für negative Abweichungen ($R - Q_2 \leq M \leq R + Q_1$).

Für jeden vom erfindungsgemäßen Verfahren erkennbaren Fehler $F_1, F_2, F_3, \dots, F_m$ wird nun berechnet, ob die Symptome $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$ den Bedingungen der Fehler-Symptom-Tabelle

entsprechen. Entsprechen alle oder zumindest ein großer Teil der Symptome diesen Bedingungen, erkennt das Verfahren den Fehler als vorhanden. Für das Beispiel aus Fig. 1 bedeutet dies anschaulich: Wenn der Betrag von Symptom S1 und Symptom Sn klein ist und Symptom S2 deutlich negativ ist, wird der Fehler F1 erkannt, unabhängig vom Wert von Symptom S3.

Eine vorteilhafte Weiterbildung dieses Verfahrens bestimmt zumindest für einige Fehler mehr als einen Ausprägungsgrad. So kann zum Beispiel ein erster Ausprägungsgrad eines Fehlers als Zustand "fehlerhaft" oder "gelb" und ein zweiter Ausprägungsgrad des gleichen Fehlers als Zustand "kritisch" oder "rot" bestimmt werden. In dieser Weiterbildung wird für jeden Ausprägungsgrad der Fehler eine eigene Fehler-Symptom-Tabelle - ähnlich der Fig. 1 - mit eigenen Schwellwerten benötigt. Besonders vorteilhaft ist es dabei, wenn für den zweiten Ausprägungsgrad der Fehler die Schwellwerte größer sind als für den ersten Ausprägungsgrad der Fehler. So wird der zweite Ausprägungsgrad eines Fehlers bei größeren Abweichungen zwischen Merkmal und Referenzwert erreicht als der erste Ausprägungsgrad.

In einer zweiten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens wird statt der einfachen aber starren Fehler-Symptom-Tabelle aus den Symptomen eine Wahrscheinlichkeit für einen Fehler berechnet. Hierzu wird für jeden Fehler, dessen Nummer mit dem Index i bezeichnet sei und für jedes für diesen Fehler relevante Symptom, dessen Index mit j bezeichnet sei, eine Fehlerteilwahrscheinlichkeitsfunktion FW definiert. Mit dieser Fehlerteilwahrscheinlichkeitsfunktion FW, für die ein Beispiel in Fig. 2 gezeigt ist, wird für jeden Fehler i abhängig von der Größe des Symptoms S_j eine Wahrscheinlichkeit W_{ij} berechnet, mit welcher das Symptom S_j zum Fehler i beiträgt. Hierdurch wird dem Umstand Rechnung getragen, dass ein Fehler auch dann auftreten kann, wenn mehrere Merkmale jeweils eine mittelgroße Abweichung von ihren jeweiligen Referenzwerten haben. Mit dieser Maßnahme wird die Empfindlichkeit der Diagnoseergebnisse gegenüber Messungenauigkeiten und Rauschen reduziert.

Der Wert der Fehlerteilwahrscheinlichkeitsfunktion FW ist dabei stets größer oder gleich Null, das Maximum dieser Funktion sei mit A_{ij} benannt. Die Amplitude A_{ij} entspricht der Wichtigkeit des Symptoms S_j für die Erkennung des Fehlers "i". Je eindeutiger der Zusammenhang zwischen dem Fehler "i" und dem Symptom "j" ist, desto größer ist die Amplitude A_{ij} in Vergleich zu anderen Amplituden A_{ik}, (k=1..n). Die Größe A_{ij} wird auf Basis des Expertenwissens und/oder Simulation des Prozessmodells festgelegt.

In einer besonders vorteilhaften Ausführung, welche in Fig. 2 dargestellt ist, ist die Fehlerteilwahrscheinlichkeitsfunktion FW eine einfache Rampe, die vom Wert Null zu der Amplitude A_{ij} im Bereich der Symptomgröße von V_j bis U_j linear ansteigt.

In einem zweiten Schritt wird dann die gesamte Wahrscheinlichkeit W_i des Fehlers "i" berechnet, indem die Fehlerteilwahrscheinlichkeiten für alle Symptome W_{ik} (k=1..n), normiert auf die Summe aller Amplituden A_{ik}, summiert werden:

$$W_i = \frac{\sum_{k=1}^n W_{ik}}{\sum_{k=1}^n A_{ik}} \quad (1)$$

Wenn einige der erforderlichen Messdaten nicht vorhanden oder nicht plausibel sind, so dass es nicht möglich ist, ein Symptom S_k zu ermitteln, werden für alle Fehler "i" die Wahrscheinlichkeiten W_{ik} in Summe (1) auf Null gesetzt.

Auch in dieser zweiten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens besteht eine vorteilhafte Weiterbildung darin, unterschiedliche Ausprägungsgrade der Fehler zu berücksichtigen. Hierbei werden dann für jeden Ausprägungsgrad der Fehler, z.B. einen ersten Ausprä-

gungsgrad "gelb" und einen zweiten Ausprägungsgrad "rot", getrennte Fehlerteilwahrscheinlichkeitsfunktionen definiert. Entsprechend dem oben eingeführten Wert W_{ij} sei dabei der Wert der zweiten Fehlerteilwahrscheinlichkeitsfunktion für den zweiten Ausprägungsgrad der Fehler mit E_{ij} bezeichnet. Das Maximum der zweiten Fehlerteilwahrscheinlichkeitsfunktion E_{ij} sei mit B_{ij} bezeichnet. Besonders vorteilhaft ist es dabei, wenn bei gleicher Größe des Symptoms S_j der Wert der zweiten Fehlerteilwahrscheinlichkeitsfunktion E_{ij} stets kleiner oder gleich dem Wert der ersten Fehlerteilwahrscheinlichkeitsfunktion W_{ij} ist. Somit wird der zweite Ausprägungsgrad des Fehlers bei größeren Abweichungen zwischen Merkmal und Referenzwert erkannt als der erste Ausprägungsgrad.

Analog wird wieder die gesamte Wahrscheinlichkeit E_i des zweiten Ausprägungsgrades des Fehlers "i" als Summe von allen E_{ik} ($k=1..n$), normiert auf die Summe aller Amplituden B_{ik} der zweiten Fehlerteilwahrscheinlichkeitsfunktionen, berechnet:

$$E_i = \frac{\sum_{k=1}^n E_{ik}}{\sum_{k=1}^n B_{ik}} \quad (2)$$

Genau wie bei den ersten Fehlerwahrscheinlichkeiten werden die Größen E_{ik} in Summe (2) auf Null gesetzt wenn einige Symptome S_k wegen nicht vorhanden oder nicht plausiblen Messdaten nicht zu bestimmen sind.

Für den Fachmann ist es leicht zu erkennen, dass mit dem oben beschriebenen Schema noch weitere Ausprägungsgrade der Fehler berechnet werden können.

Eine weitere vorteilhafte Weiterentwicklung des erfindungsgemäßen Verfahrens klassifiziert die einzelnen erkennbaren Fehler nun nach einer oder mehreren Fehlerklassen. Besonders einfach kann hier vorgegangen werden, wenn ein Fehler i dann als vorhanden klassifiziert wird, wenn seine Wahrscheinlichkeit W_i größer als ein Schwellwert W_s ist.

Noch vorteilhafter ist es jedoch, bei mehreren Ausprägungsgraden die Fehler nach mehreren Klassen zu klassifizieren. Fig. 3 stellt beispielhaft dar, wie ein Fehler, der in zwei Ausprägungsgraden vorhanden sein kann, in 4 Klassen A1, A2, A3, A4 eingeordnet wird. Diese 4 Klassen können z.B. sein: A1-"gefährlich" bzw. "rot", A2-"wahrscheinlich" bzw. "gelb", A3-"nicht erkennbar" bzw. "grau" und A4-"unwahrscheinlich" bzw. "grün".

Der Klassifikationsprozess beginnt (Beginn bei "0") mit der Berechnung der Wahrscheinlichkeit W_i für den ersten Ausprägungsgrad des Fehlers (Schritt 21) und der Berechnung der Wahrscheinlichkeit E_i für den zweiten Ausprägungsgrad des Fehlers, (Schritt 22). Danach wird in Schritt 23 die Wahrscheinlichkeit E_i für den zweiten Ausprägungsgrad des Fehlers, mit einem zweiten Schwellenwert E_s (beispielsweise $E_s = 0,9$) verglichen. Liegt E_i höher als E_s , so wird der Fehler "i" als "gefährlich" eingestuft (A1). Wenn das nicht der Fall ist, dann wird in Schritt 24 geprüft, ob die Wahrscheinlichkeit W_i für den ersten Ausprägungsgrad des Fehlers größer ist als ein erster Schwellenwert W_s (zum Beispiel $W_s = 0,7$). Wenn $W_i > W_s$ ist, dann wird der Fehler "i" als "wahrscheinlich" klassifiziert (A2). Andernfalls, wird beurteilt, ob der Wert von W_i möglicherweise aufgrund von fehlenden oder nicht plausiblen Messdaten (bezeichnet als „np“-Daten) klein ist. Dafür wird in Schritt 25 das Gewicht P_i aller nicht berechneter Symptome als die normierte Summe aller entsprechenden Amplituden A_{ik} bestimmt:

$$P_i = \frac{\sum_{k=alle(np)\text{-Daten}} A_{ik}}{\sum_{k=1}^n A_{ik}} \quad (3)$$

Wenn der Wert von P_i größer ist als ein vordefinierter Schwellenwert P_s (zum Beispiel $P_s = 0,6$), bedeutet das, dass der Fehler "i" anhand von vorhandenen Messdaten weder erkannt noch ausgeschlossen werden kann. In diesem Fall wird der Fehler "i" als "nicht erkennbar" (A3) klassifiziert (Schritt 26 in Fig. 3). Wenn keine der vorherigen Überprüfungen in den Schritten 23 bis 26 ein positives Ergebnis hat, wird der Fehler als "unwahrscheinlich" (A4) klassifiziert. Mit "1" ist das Ende des ersten Prozesses bezeichnet.

Für den Fachmann ist leicht erkennbar, wie das oben beschriebene Verfahren auf noch weitere Ausprägungsgrade von Fehlern und/oder weitere Klassen ausgedehnt werden kann.

Der letzte Schritt des erfindungsgemäßen Verfahrens berechnet aus einzelnen Fehlern, die in einer oder mehreren Ausprägungsgraden und/oder Klassen auftreten können, einen Gesamtzustand der Brennkraftmaschine und/oder eines oder mehrerer ihrer Teilsysteme. Für den besonders relevanten Fall, dass die einzelnen Fehler nach den Klassen "gefährlich" (A1), "wahrscheinlich" (A2), "nicht erkennbar" (A3) und "unwahrscheinlich" (A4) klassifiziert wurden, stellt Fig. 4 den Ablaufplan für die Klassifikation eines Teilsystems oder der gesamten Brennkraftmaschine dar. Solch ein Teilsystem kann z.B. ein Zylinder einer Brennkraftmaschine sein. In der folgenden Erklärung wird nur auf ein Teilsystem "z" des Motors Bezug genommen, wobei das Teilsystem aber auch der gesamte Motor sein kann.

In einem ersten Schritt (31) wird in Abfrage V1 überprüft, ob zumindest einer der Fehler des Teilsystems als "gefährlich" (A1) klassifiziert wurde. In diesem Fall (Y) wird das gesamte Teilsystem als "kritisch" (B1) klassifiziert. Ist das Ergebnis dieser Prüfung negativ (N), wird in einem zweiten Schritt (32) eine Größe G_z berechnet, die den Gesamtzustand des Teilsystems "z" abbildet:

$$G_z = \min \left\{ 1; \frac{\sum_{i=1}^m K_i \cdot H(W_{iz})}{\max(K_i)} \right\} \quad (4)$$

Dabei ist K_i ein Wichtungsfaktor, der die Wichtigkeit des Fehlers "i" für den Zustand des Teilsystems "z" widerspiegelt. Die Größe von K_i wird anhand von Expertenwissen und/oder Simulation des Prozessmodells festgelegt. Die Größe W_{iz} ist die gesamte Wahrscheinlichkeit W_i des ersten Ausprägungsgrades des Fehlers "i" im Teilsystem "z". Die Funktion $H(x)$ ist eine Filterfunktion, die sicherstellt, dass der Fehler erst dann berücksichtigt wird, wenn er als "wahrscheinlich" eingestuft wurde (d.h. erst wenn $W_i > W_s$), und dass der Fehler erst dann voll berücksichtigt wird wenn die Fehlerwahrscheinlichkeit groß genug ist (z.B. $W_i > 0,9$). Ein Beispiel für eine Filterfunktion H ist in Fig. 5 gezeigt. Wenn der Fehler "1" als "nicht erkennbar" bewertet wurde, dann wird er nicht in G_z einberechnet: $H(W_{iz}) = 0$.

In Schritt 33 in Fig. 4 wird die Größe G_z mit einem vordefiniertem Schwellenwert G_s (beispielsweise $G_s = 0,7$) verglichen. Liegt G_z höher als G_s , so wird der Zustand des Teilsystems "z" als "fehlerhaft" (B2) definiert. Wenn das nicht der Fall ist, dann wird beurteilt, ob der Wert von G_z aufgrund von eventuell vorhandenen nicht erkennbaren Fehlern klein ist. Dafür wird das Gewicht X_i von nicht erkennbaren (ne') Fehlern in Schritt 34 als die normierte Summe aller entsprechenden Gewichte K_i berechnet:

$$X_z = \frac{\sum_{i=alle(ne)\text{-Fehler}} K_i}{\sum_{i=1}^m K_i} \quad (5)$$

Wenn der Wert von X_z größer als der vordefinierte Schwellenwert X_s (zum Beispiel $X_s = 0,3$) ist, wird der Gesamtzustand des Teilsystems "z" als "nicht bewertbar" (B3) klassifiziert (Schritt 35 in Fig. 3). Sonst wird der Gesamtzustand des Teilsystems "z" als "gesund" (B4) klassifiziert. Mit "2" ist das Ende der Routine bezeichnet.

Der Fachmann wird hier leicht erkennen, wie das Verfahren der Klassifikation eines Teilsystems auch auf Fälle mit weiteren Ausprägungsgraden der Fehler und/oder weiteren Fehlerklassen ausgedehnt werden kann.

In einer letzten vorteilhaften Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird aus dem Zustand der Teilsysteme der Brennkraftmaschine der Zustand der gesamten Brennkraftmaschine berechnet. Ein Beispiel für einen Ablaufplan dieser Berechnung ist in Fig. 6 gezeigt.

Wenn zumindest eines der Teilsysteme als "kritisch" (B1) klassifiziert wurde, wird der Gesamtzustand der Brennkraftmaschine in der Abfrage V2 auch als "kritisch" (C1) klassifiziert (Schritt 41 in Fig. 6). Sonst wird in Schritt 42 das Gewicht N_f der fehlerhaften Teilsysteme (f -Teilsysteme) mit Hilfe der Wichtungsfaktoren D_k berechnet, welche die Wichtigkeit des Zustandes jedes einzelnen Teilsystems "k" auf den Gesamtzustand der Brennkraftmaschine darstellen:

$$N_f = \frac{\sum_{k=\text{alle } (f)\text{-Teilsysteme}} D_k}{\sum_{k=\text{alle Teilsysteme}} D_k} \quad (6)$$

In Schritt 43 wird geprüft ob das Gewicht der Teilsysteme mit Bewertung "fehlerhaft" N_f größer als der vordefinierte Schwellenwert N_{fs} (zum Beispiel $N_{fs} = 0,3$) ist. In diesem Fall wird auch der Gesamtzustand des Motors als "fehlerhaft" (A10) festgesetzt. Andernfalls, wird in Schritt 44 das Gewicht $N_{(nb)}$ der nicht-bewertbaren Teilsysteme berechnet:

$$N_{(nb)} = \frac{\sum_{k=\text{alle } (nb)\text{-Teilsysteme}} D_k}{\sum_{k=\text{alle Teilsysteme}} D_k} \quad (7)$$

In Schritt 45 wird überprüft, ob das Gewicht der Teilsysteme mit Bewertung "nicht bewertbar" $N_{(nb)}$ größer als ein Schwellenwert $N_{(nb)s}$ (zum Beispiel $N_{(nb)s} = 0,3$) ist. Ist dies der Fall, wird auch der Gesamtzustand der Brennkraftmaschine als "nicht bewertbar" (C3) bewertet. Sonst wird der Gesamtzustand der Brennkraftmaschine als "gesund" (C4) klassifiziert. Mit "3" ist das Ende des Verfahrensprozesses bezeichnet.

Für den Fachmann ist hier leicht erkennbar, wie das Verfahren der Klassifikation des Zustandes des gesamten Motors auch auf Fälle mit weiteren Fehlerklassen ausgedehnt werden kann.

Patentansprüche:

- Verfahren zur Diagnose und Klassifikation von Fehlern einer Brennkraftmaschine und/oder ihrer Teilsysteme, wobei zumindest ein Informationen über die Brennkraftmaschine und/oder ihrer Teilsysteme enthaltendes Messsignal aufgezeichnet wird und zumindest ein Symptom für einen Fehler aus der Abweichung zwischen einem aus dem Messsignal gewonnenen Merkmal und einem Referenzwert für dieses Merkmal ermittelt wird, *dadurch*

gekennzeichnet, dass zumindest ein Ausprägungsgrad des Fehlers aus der Kombination mehrerer Symptome berechnet wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, *dadurch gekennzeichnet*, dass der Gesamtzustand der Brennkraftmaschine und/oder ihrer Teilsysteme aus den Fehlern und deren Ausprägungsgraden bestimmt und klassifiziert wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1, *dadurch gekennzeichnet*, dass jeder Fehler anhand einer Fehler-Symptom-Tabelle identifiziert wird, wobei die Fehler-Symptom-Tabelle für jedes aus den Abweichungen gewonnene Symptom und für jeden Fehler, auf den die Brennkraftmaschine und/oder ihre Teilsysteme untersucht wird, den Zusammenhang zwischen Symptom und Fehler enthält.
4. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, *dadurch gekennzeichnet*, dass für jeden Fehler und für jedes für diesen Fehler relevante Symptom eine Fehlerteilwahrscheinlichkeitsfunktion FW definiert wird, mit welcher abhängig von der Größe des Symptoms eine Wahrscheinlichkeit berechnet wird, mit welcher das Symptom zum Fehler beiträgt.
5. Verfahren nach Anspruch 4, *dadurch gekennzeichnet*, dass die Fehler anhand der Fehlerwahrscheinlichkeit W_i , berechnet als die Summe aller Fehlerteilwahrscheinlichkeiten W_{ik} normiert auf die Summe aller Maxima A_{ik} der Fehlerteilwahrscheinlichkeitsfunktionen:

$$W_i = \frac{\sum_{k=1}^n W_{ik}}{\sum_{k=1}^n A_{ik}} \quad (1)$$

detektiert werden.

6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, *dadurch gekennzeichnet*, dass die Fehlerteilwahrscheinlichkeitsfunktion FW eine einfache Rampe ist, die vom Wert Null zu der Amplitude A_{ij} im bestimmten Bereich der Symptomgröße linear ansteigt.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 5, *dadurch gekennzeichnet*, dass zumindest zwei unterschiedliche Ausprägungsgrade zumindest eines Fehlers erkannt werden können.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, *dadurch gekennzeichnet*, dass jene Symptome, die aufgrund von nicht vorhandenen und/oder unplausiblen Messwerten nicht berechnet werden können, bei der Erkennung von Fehlern verworfen werden, und dass ein Fehler als nicht erkennbar klassifiziert wird, wenn das Gewicht aller nicht berechenbarer Symptome größer als ein definierter Schwellenwert wird.
9. Verfahren nach Anspruch 8, *dadurch gekennzeichnet*, dass das Gewicht P_i aller nicht berechneter Symptome als die Summe der Maxima A_{ik} aller entsprechenden Fehlerteilwahrscheinlichkeitsfunktionen FW normiert auf die Summe aller Maxima A_{ik} :

$$P_i = \frac{\sum_{k=alle(np)-Daten} A_{ik}}{\sum_{k=1}^n A_{ik}} \quad (3)$$

berechnet wird.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, *dadurch gekennzeichnet*, dass eine Größe G_z , die den Gesamtzustand jedes einzelnen Teilsystems der Brennkraftmaschine abbildet durch die Formel

$$G_z = \min \left\{ 1; \frac{\sum_{i=1}^m K_i \cdot H(W_{iz})}{\max(K_i)} \right\} \quad (4)$$

berechnet wird, wobei K_i ein Wichtungsfaktor ist, der die Wichtigkeit des Fehlers "i" für einen Zustand des Teilsystems "z" widerspiegelt, die Größe W_{iz} die gesamte Wahrscheinlichkeit des ersten Ausprägungsgrades des Fehlers "i" im Teilsystem "z", und die Funktion $H(x)$ eine Filterfunktion ist, die sicherstellt, dass der Fehler erst dann berücksichtigt wird, wenn er als "wahrscheinlich" eingestuft wurde, und dass der Zustand des Teilsystems als "fehlerhaft" definiert wird, wenn die Größe G_z größer als ein definierter Schwellenwert G_s ist.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, *dadurch gekennzeichnet*, dass ein Gesamtzustand der Brennkraftmaschine und/oder ihrer Teilsysteme als nicht bewertbar klassifiziert wird, wenn das Gewicht der nicht erkennbaren Fehler größer als ein Schwellenwert ist.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, *dadurch gekennzeichnet*, dass der Gesamtzustand der Brennkraftmaschine aus dem Zustand der Teilsysteme des Motors berechnet wird.

Hiezu 6 Blatt Zeichnungen



	S 1	S 2	S 3	...	S n
F 1	0	-	x		0
F 2	+	-	0		+
F 3	x	+	-		0
...					
F m	-	x	0		0

Fig. 1

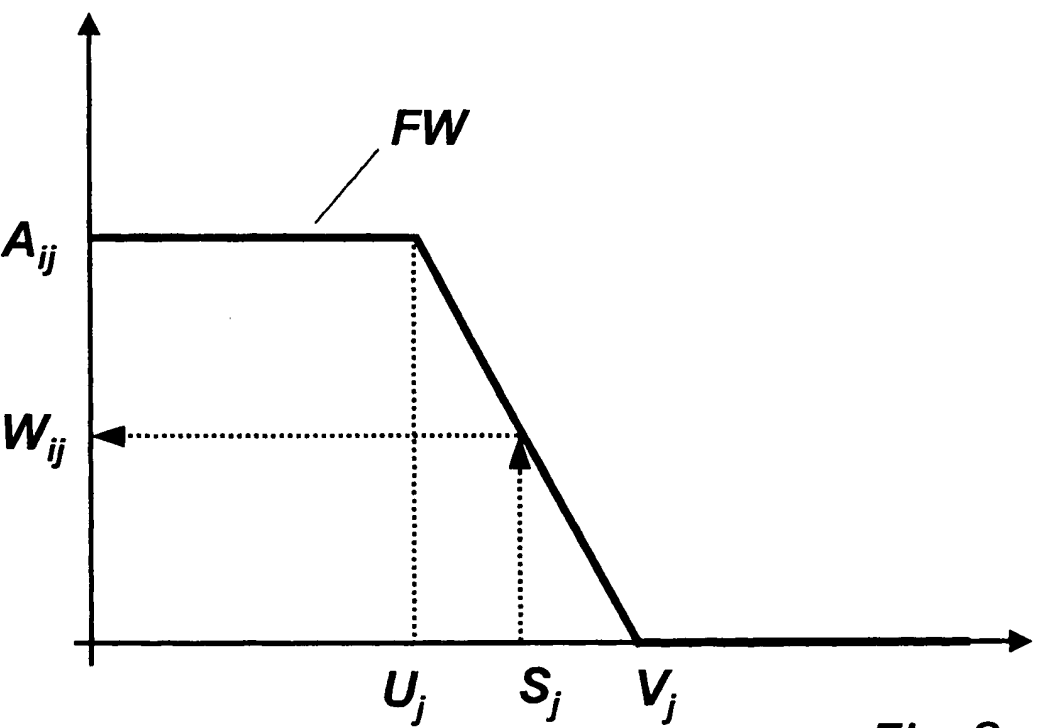


Fig. 2

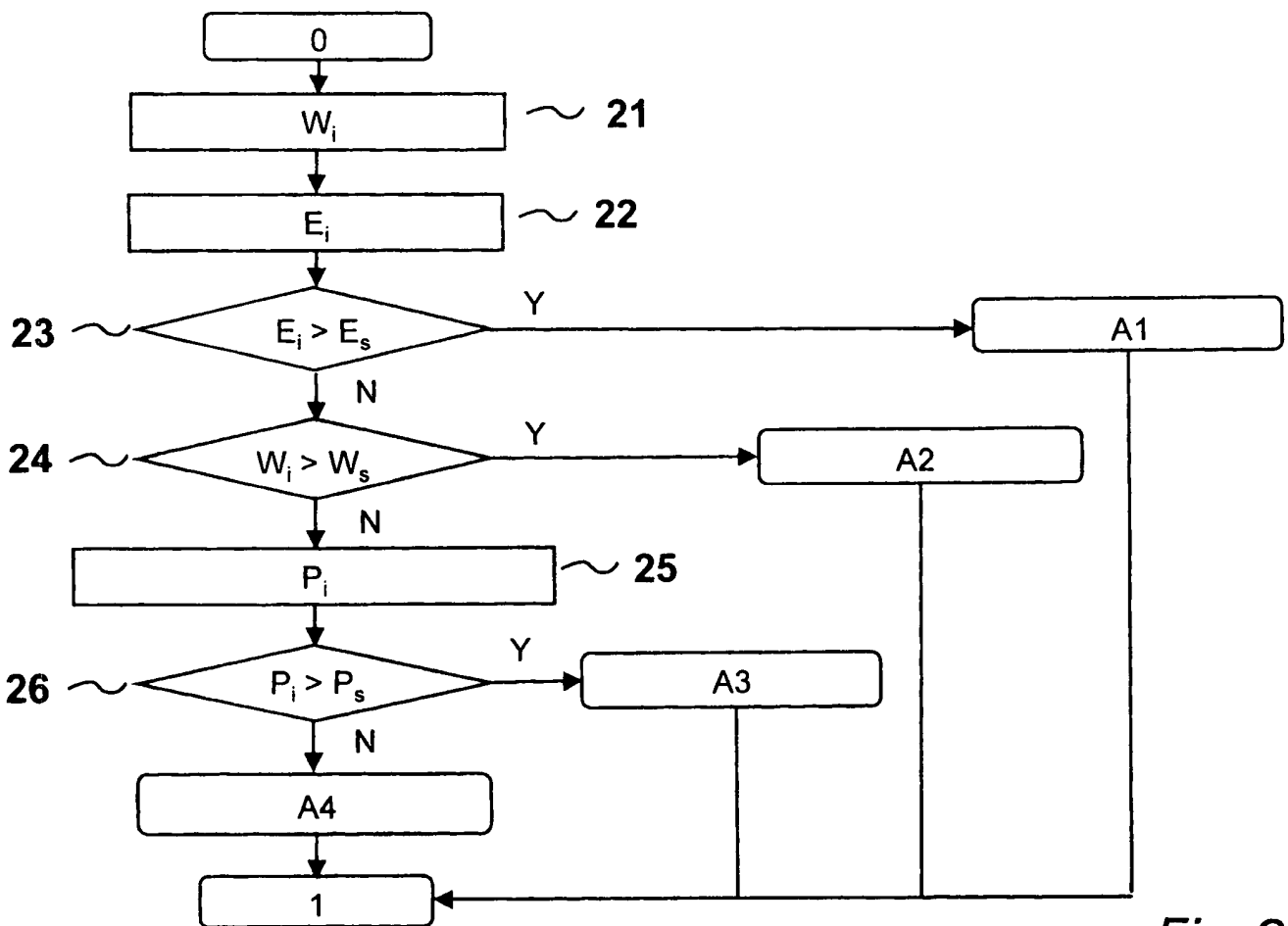


Fig. 3

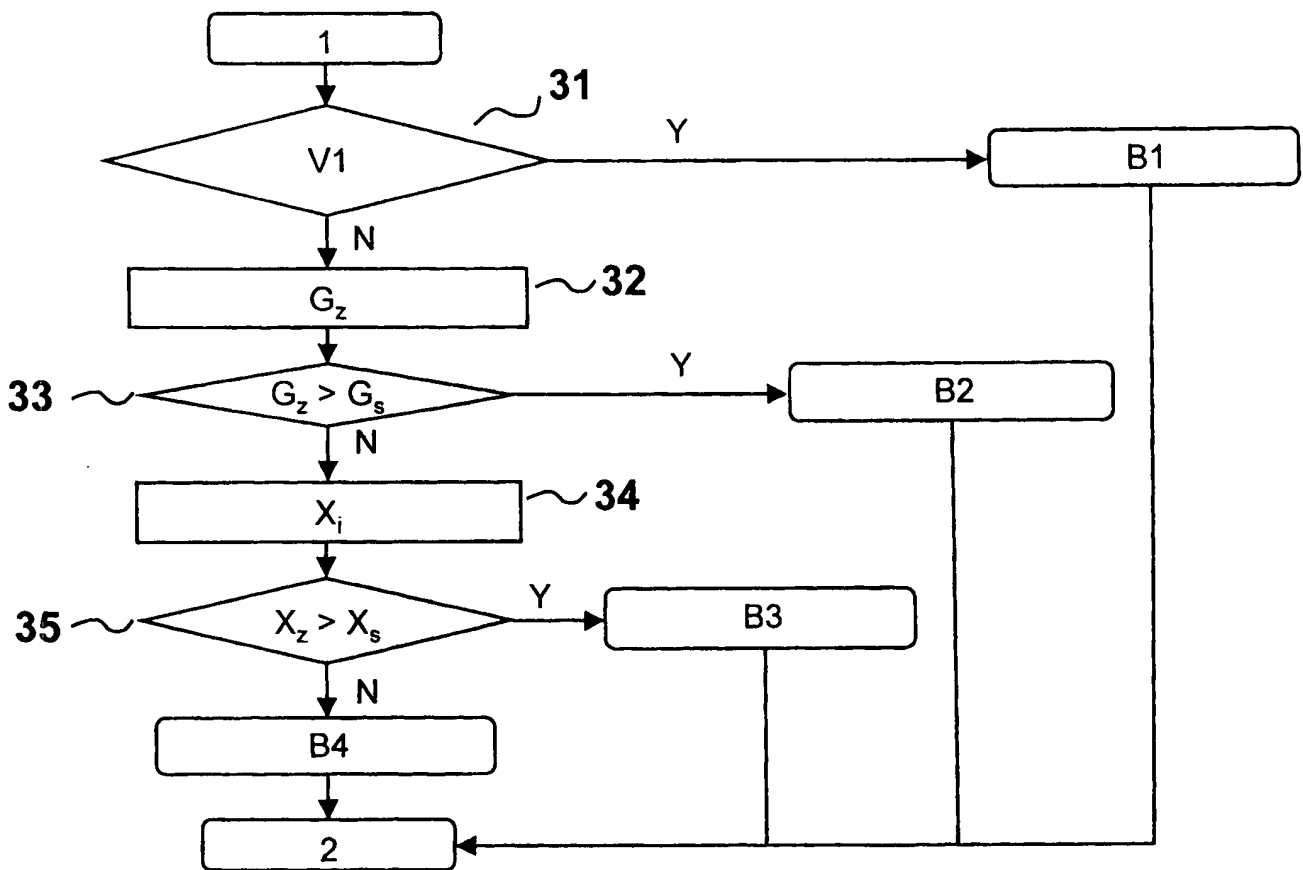


Fig. 4

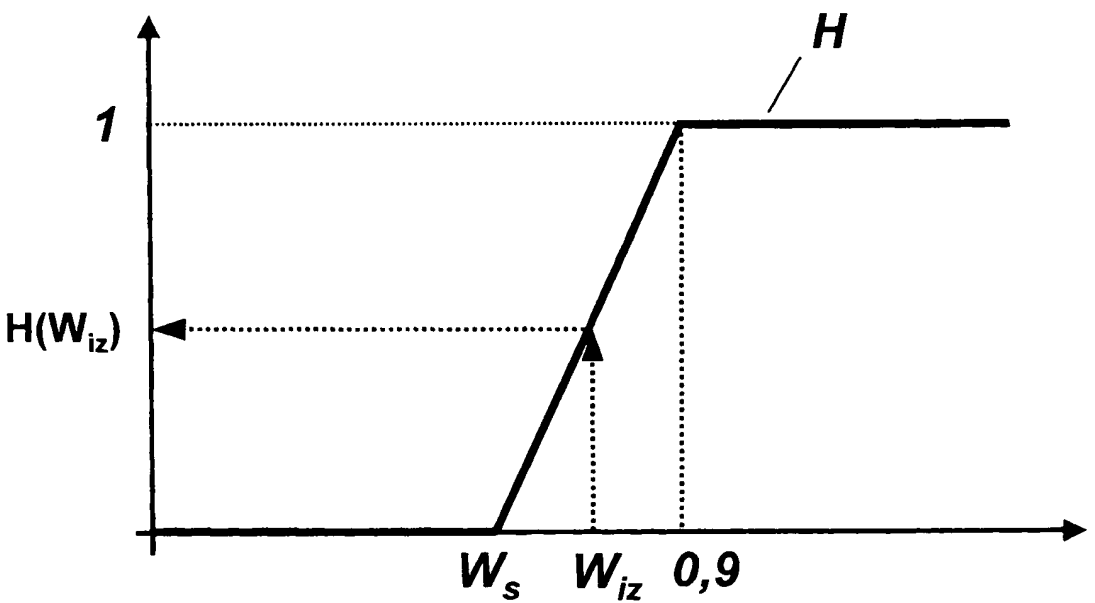


Fig. 5

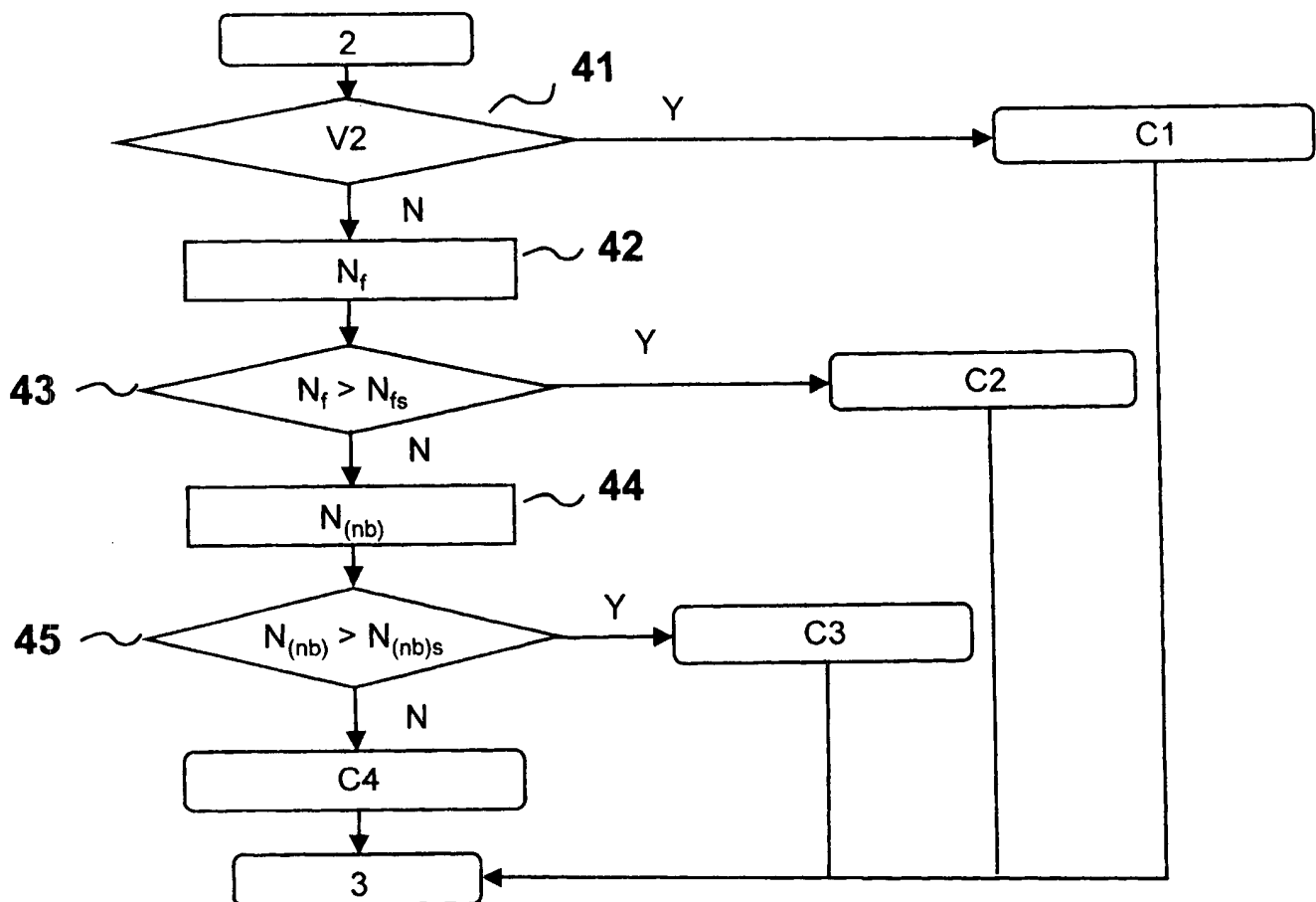


Fig. 6