

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 50656/2013 (51) Int. Cl.: **F02B 77/08** (2006.01)
 (22) Anmeldetag: 11.10.2013 *G01M 15/04* (2006.01)
 (43) Veröffentlicht am: 15.03.2015 *G01M 13/00* (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen: DE 19882804 B4 DE 10257793 A1 EP 2120214 A1 US 2013024179 A1	(71) Patentanmelder: AVL LIST GMBH 8020 GRAZ (AT) (72) Erfinder: Kaltenegger Bernhard Dipl.Ing. (FH) 8020 Graz (AT) Zieher Franz Dipl.Ing. 8045 Graz (AT) Wieser Karl Dipl.Ing. 8044 Graz (AT) (74) Vertreter: BABELUK MICHAEL DIPL.ING. MAG. WIEN
--	--

(54) **Verfahren zur Abschätzung der Schädigung zumindest eines technischen Bauteiles einer Brennkraftmaschine**

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Abschätzung der Schädigung zumindest eines technischen Bauteils einer Brennkraftmaschine mit folgenden Schritten:

- Bereitstellen zumindest eines virtuellen Temperatursensors (1) für den Bauteil;
- Bereitstellen zumindest eines virtuellen Spannungssensors (2) für den Bauteil;
- Ermitteln einer transienten Temperatur (T_{CH}) des Bauteiles der Brennkraftmaschine mittels des virtuellen Temperatursensors (2) auf Basis zumindest eines Motor-, Betriebs- oder Streckenparameters aus der Gruppe Motordrehmoment (M), Motordrehzahl (n), Motorleistung (P), Kühlmittelmassestrom, ($\dot{m}_c$), Kühlmitteltemperatur (T_c), Umgebungstemperatur (T_u) und Streckenprofil (H), wobei vorzugsweise zumindest ein Parameter in einer elektronischen Steuereinheit (ECU) abgelegt ist;
- Ermitteln der Spannungen des Bauteils der Brennkraftmaschine mittels des virtuellen Spannungssensors (2) auf Basis eines vorgegebenen Gesamtdehnungstensor ($\epsilon_{(Tref)}^{tot}$) und der mittels des virtuellen Temperatursensors (1) ermittelten Temperatur (T_{CH}) des Bauteils;
- Ermitteln der plastischen Dehnungen ϵ des Bauteils auf Basis des Werkstoffmodells;
- Aufsummieren der visko-plastischen Dehnungen ($\epsilon_{vcum(t)}$) des Bauteils. • Ermitteln der Schädigung des Bauteils auf Grund der kumulierten plastischen Dehnungen ($\epsilon_{vcum(t)}$).

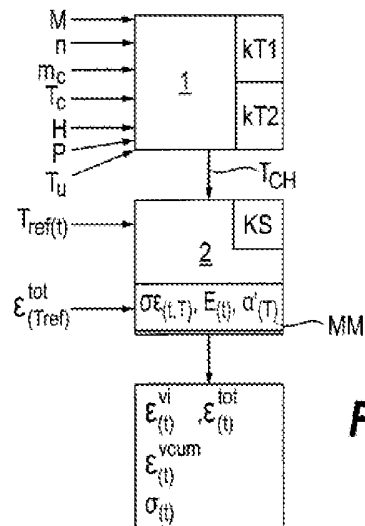


Fig. 1

Z U S A M M E N F A S S U N G

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Abschätzung der Schädigung zumindest eines technischen Bauteils einer Brennkraftmaschine mit folgenden Schritten:

- Bereitstellen zumindest eines virtuellen Temperatursensors (1) für den Bauteil;
- Bereitstellen zumindest eines virtuellen Spannungssensors (2) für den Bauteil;
- Ermitteln einer transienten Temperatur (T_{CH}) des Bauteiles der Brennkraftmaschine mittels des virtuellen Temperatursensors (2) auf der Basis zumindest eines Motor- oder Betriebs- oder Streckenparameters aus der Gruppe Motordrehmoment (M), Motordrehzahl (n), Motorleistung (P), Kühlmittelmassestrom, (m_C), Kühlmitteltemperatur (T_C), Umgebungstemperatur (T_U) und Streckenprofil (H), wobei vorzugsweise zumindest ein Parameter in einer elektronischen Steuereinheit (ECU) abgelegt ist;
- Ermitteln der Spannungen des Bauteils der Brennkraftmaschine mittels des virtuellen Spannungssensors (2) auf der Basis eines vorgegebenen Gesamtdehnungstensor ($\epsilon_{(T_{ref})}^{tot}$) und der mittels des virtuellen Temperatursensors (1) ermittelten Temperatur (T_{CH}) des Bauteils;
- Ermitteln der plastischen Dehnungen ϵ des Bauteiles auf der Basis des Werkstoffmodells;
- Aufsummieren der visko-plastischen Dehnung ($\epsilon_{(t)}^{vcum}$) des Bauteils.
- Ermitteln der Schädigung des Bauteils auf Grund der kumulierten plastischen Dehnungen ($\epsilon_{(t)}^{vcum}$).

Fig. 1

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Abschätzung der Schädigung zumindest eines technischen Bauteiles einer Brennkraftmaschine. Weiters betrifft die Erfindung eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens.

Die DE 102 57 793 A1 zeigt einen modellbasierten Lebensdauerbeobachter, wobei Systembelastungen aus der vorhandenen Fahrzeugsensorik ermittelt und gespeichert werden, lokale Bauteil-Beanspruchungen aus dem Systemmodell und den Belastungszeitverläufen ermittelt und die Restlebensdauer der im Systemmodell enthaltenen Bauteile aus den akkumulierten Bauteilschädigungen durch eine Betriebsfestigkeitsanalyse berechnet werden.

Aus der DE 101 61 998 A1 ist ein Verfahren zur Betriebsüberwachung von sicherheitskritischen Modulen in Kraftfahrzeugen bekannt, wobei ein Alterungsfaktor durch Kumulation von Alterungsgraden einzelner Bauteile bestimmt wird. Die Alterungsgrade einzelner Bauteile werden durch Auswertung von für eine Alterung repräsentativen Parameterwerten ermittelt.

Ein Verfahren zur Verschleißdiagnose wird in der DE 10 2008 049 754 A1 vorgeschlagen, wobei während des Fahrbetriebes auftretenden Fahrereignissen und Fahrbedingungen jeweils ein Verschleißindex zugeordnet wird. Die einzelnen Verschleißindexwerte werden zu einem Verschleißindexsummenwert aufaddiert, und mit einem Referenzverschleißindexsummenwert verglichen.

Die DE 10 2010 012 564 A1 beschreibt ein Verfahren zur Ermittlung einer Materialantwort bei einem Bauteil, wobei eine mechanische Belastung des Bauteils durch eine Berechnungseinheit mittels sich wiederholender Belastungszyklen simuliert wird.

Aus der US 4,336,595 A1 ist ein Strukturlebenszeitrechner bekannt, welcher auf Grund der durch einen Dehnmessstreifen ermittelten Signale die Ermüdung und Rissausbreitung ermittelt und die kumulierten Schäden abspeichert und anzeigt.

Die DE 10 2005 023 252 A1 beschreibt ein Verfahren zur Bestimmung des Schädigungsgrades und der Restlebensdauer von sicherheitsrelevanten Anlagenteilen bei Großanlagen, wobei die mechanischen Spannungen von sicherheitsrelevanten Anlagenteilen nicht direkt gemessen, sondern über

Messergebnisse geräteüblicher und standardmäßig vorhandener Sensoren abgeschätzt. Mittels mechanischer Statikberechnungsprogramme werden Spannungstüzt Tabellen erzeugt, die die mechanischen Spannungen an kritischen Stellen der Anlagenteilen darstellen. Die tatsächlichen Spannungen werden auf Basis dieser Stüzt Tabellen sowie der gemessenen Positionen, Gewichte und Lasten und unter Berücksichtigung von Beschleunigungen und Bremsungen einzelner Antriebe ermittelt. Die mechanischen Spannungen werden nach der "Rainflow-Methode" analysiert und führen zu einem verwertbaren Ergebnis in Form eines Schädigungsgrades und/oder einer ermittelten Restlebensdauer.

Bekannte Verfahren benötigen eine mehr oder weniger große Anzahl an Sensoren, um die Schädigung und Restlebensdauer von Bauteilen zu ermitteln.

Aufgabe der Erfindung ist es, den sensorischen Aufwand für die Schädigungsüberwachung und Restlebensdauervorhersage auf ein Mindestmaß zu verringern.

Erfindungsgemäß erfolgt dies dadurch , dass folgende Schritte durchgeführt werden:

- a) Bereitstellen zumindest eines virtuellen Temperatursensors für den Bauteil;
- b) Bereitstellen zumindest eines virtuellen Spannungssensors für den Bauteil;
- c) Ermitteln einer transienten Temperatur des Bauteiles der Brennkraftmaschine mittels des virtuellen Temperatursensors auf der Basis zumindest eines Motor- oder Betriebs- oder Streckenparameters aus der Gruppe Motordrehmoment, Motordrehzahl, Motorleistung, Kühlmittelmassestrom, Kühlmitteltemperatur, Umgebungtemperatur und Streckenprofil, wobei vorzugsweise zumindest ein Parameter in einer elektronischen Steuereinheit abgelegt ist;
- d) Ermitteln der Spannungen des Bauteils der Brennkraftmaschine mittels des virtuellen Spannungssensors auf der Basis des Gesamtdehnungstensors und der mittels des virtuellen Temperatursensors ermittelten Temperatur des Bauteils;

- e) Ermitteln der visko-plastischen Dehnungen des Bauteiles auf der Basis eines Werkstoffmodells;
- f) Aufsummieren der visko-plastischen Dehnungen des Bauteils.
- g) Ermitteln der Schädigung des Bauteils auf Grund der kumulierten plastischen Dehnungen.

Die Erfindung erlaubt damit die Ermittlung von Temperatur, Spannungen und resultierenden Schädigungen ohne Vorsehen zusätzlicher realer Sensoren alleine aus während des Betriebs vorhandenen Parametern. Vorzugsweise wird der virtuelle Temperatursensor für den Bauteil auf der Basis eines ersten mathematischen Modells gebildet und eine Kalibrierung für den stationären Fall unter Einbeziehung zumindest eines Bauteilparameters aus der Gruppe Geometrie, Wärmeübergangsbedingungen und Modell-Referenztemperatur für den Bauteil, durchgeführt. Weiters wird eine Kalibrierung des virtuellen Temperatursensors für den transienten Fall, vorzugsweise unter Einbeziehung zumindest eines Motor- oder Betriebsparameters aus der Gruppe Drehmoment, Motordrehzahl, Kühlmitteltemperatur, Kühlmitteldurchfluss, Kühlmitteldruck, durchgeführt.

Der virtuelle Spannungssensor für den Bauteil kann unter Bildung zumindest eines nichtlinearen Spannungstensors des Bauteils auf der Basis eines zweiten mathematischen Modells oder von FE-Methoden (FE-Finite Elemente) bekannter Art, zum Beispiel unter Einbeziehung zumindest eines Betriebsparameters, insbesondere einer Referenztemperatur des Bauteils aus einer Thermoschockanalyse und eines Werkstoffmodells des Bauteils, dargestellt werden. Danach wird für den stationären und den transienten Fall eine Kalibrierung des virtuellen Spannungssensors durchgeführt.

Zumindest einem der Schritte a1), a2), b1) oder b2) kann eine Thermo-Schock-Analyse zu Grunde gelegt werden.

Das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht beispielsweise

eine Analyse von kritischen Zylinderkopftemperaturen unter Feld-Betriebsbedingungen;

eine Analyse von Spannungs-/Dehnungswechseln und eine Lebensdauerabschätzungen für den Zylinderkopf unter Feld-Betriebsbedingungen;

einen Vergleich des Einflusses von unterschiedlichen Fahrzeuganwendungen auf die Zylinderkopf-Lebenszeit;

Die Erfindung wird im Folgenden an Hand der Fig. näher erläutert.

Es zeigen schematisch

Fig. 1 den Ablauf des erfindungsgemäßen Verfahrens,

Fig. 2 die Bildung und Kalibrierung des virtuellen Temperatursensors,

Fig. 3 die Bildung und Kalibrierung des virtuellen Spannungssensors,

Fig. 4 die praktische Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens an Hand des zeitlichen Verlaufes der Bauteiltemperatur T_{CH} und der kumulierten visko-plastischen Dehnung ϵ^{vcum} ,

Fig. 5 und 6 Details der Verläufe aus Fig. 4.

Um mit minimalen sensorischen Aufwand das Schadenpotential einer bestimmten Teststrecke abschätzen und Risse vorhersagen zu können, die im Feldbetrieb entstehen, werden beim erfindungsgemäßen Verfahren "virtuelle" Temperatursensoren 1 und virtuelle Spannungssensoren 2, eingesetzt. Virtuelle Temperatur- und Spannungssensoren 1, 2 beruhen auf mathematischen Simulationsmodellen, welche Temperaturen und Spannungen der in Betracht gezogenen Bauteile in Abhängigkeit von anderen Betriebsparametern und Eingabegrößen wie Motordrehmoment M , Motordrehzahl n , Kühlmittelmassestrom m_c , Kühlmitteltemperatur T_c , etc. vorhersagen können.

Der virtuelle Temperatursensor 1 ermöglicht die Vorhersage der Temperatur T_{CH} des Bauteils - beispielsweise eines Zylinderkopfes einer Brennkraftmaschine - an spezifischen Punkten der Flammfront unter Feld-Betriebsbedingungen, in Abhängigkeit beispielsweise des Motordrehmomentes M , der Motordrehzahl n , des Kühlmittelmassestroms m_c , der Motorleistung P , der Umgebungstemperatur T_U und

der Kühlmitteltemperatur T_C . Weiters kann eventuell auch das Höhenprofil H der Teststrecke als Eingangsgröße in den virtuellen Sensor 1 einfließen. Mit $KT1$, $KT2$ sind Kalibrierungsparameter für den virtuellen Temperatursensor für die stationäre und die transiente Kalibrierung bezeichnet.

Der virtuelle Spannungssensor 2 erlaubt die Vorhersage des visko-plastischen Spannungs-/Dehnungsverhaltens auf der Basis des Temperaturergebnisses T_{CH} des virtuellen Temperatursensors 1, als Vorarbeit für eine Schadensvorhersage 3, zum Beispiel bei einem Zylinderkopf, durch Vergleich mit Heiß- und Kaltversuchen (Thermo-Schock-Analyse). Neben der Temperatur T_{CH} des betrachteten Bauteils werden eine Referenztemperatur $T_{ref(t)}$ und ein Gesamtdehnungstensor $\epsilon_{(Tref)}^{tot}$ aus einer TMA-Analyse (TMF=Thermo-Mechanical-Fatigue, TMA=thermomechanische Analyse) als Eingangsgrößen für den virtuellen Spannungssensor 2 verwendet. Weiters berücksichtigt der Verformungssensor Materialparameter wie die zeit- und temperaturabhängige Spannungs-Dehnungscharakteristik $\sigma_{\epsilon(t, T)}$, den Elastizitätsmodul $E_{(T)}$, und die thermische Expansion $\alpha_{(T)}$. Mittels des virtuellen Sensors 2 kann eine Spannungs-Dehnungsanalyse des Bauteils durchgeführt werden. Das Ergebnis der Spannungs-Dehnungsanalyse liefert für den Bauteil einen visko-plastischen Dehnungstensor $\epsilon_{(t)}^{vi}$, einen gesamten Dehnungstensor $\epsilon_{(t)}^{tot}$, die kumulierte visco-plastische Dehnung $\epsilon_{(t)}^{vcum}$ und den Spannungstensor $\sigma_{(t)}$.

Fig. 2 zeigt schematisch die Bildung und Kalibrierung des virtuellen Temperatursensor 1. Mit Bezugszeichen 1a ist die Kreierung und Kalibrierung für den stationären Fall angedeutet, welche auf der Basis der Geometrie G des Bauteils, der Wärmeübergangsbedingungen HTC und einer Referenztemperatur $T_{ref(t)}$ aus einem 3D-Simulationsmodell erfolgt. Dabei werden erste Kalibrierungsparameter $KT1$ festgelegt, welche die Beziehung zwischen der Flammfronttemperatur und der Kühlmitteltemperatur und der metallischen Kühlmittelwand definieren. Unter Verwendung der ersten Kalibrierungsparameter $KT1$ wird auf Grund des Motordrehmomentes M , der Motordrehzahl n , des Kühlmittelmassenstroms m_c , der Kühlmitteltemperatur T_C und des Kühlmitteldruckes p_C in Schritt 1b eine Kalibrierung des virtuellen Temperatursensors 1 für den transienten (instationären) Fall durchgeführt und dabei die zweiten Kalibrierparameter $KT2$ erzeugt.

In Fig. 3 ist die Bildung und Kalibrierung 2a des virtuellen Spannungssensors 2 schematisch dargestellt. Als Eingangsgrößen für die Erstellung und Kalibrierung dienen dabei zumindest eine charakteristische Temperatur T_{TS} des Bauteils aus einer Thermo-Schock-Analyse am Motorprüfstand (beispielsweise der Ventilbrückentemperatur zwischen Auslassventilen beim Zylinderkopf), Beschränkungen CON_{TS} aus der Thermo-Schock-Analyse (eventuell mittels 3D-Simulationsmodell), sowie ein Werkstoffmodell MM (beispielsweise für GJV=Gusseisen mit Vermikulargraphit). Die Kalibrierung dient unter anderem zur Stabilisierung des virtuellen Spannungssensors 2, um eine Berechnung der Dehnungszunahme zu ermöglichen.

Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren können anhand von Motorparametern bzw. Messdaten, die der elektronischen Steuereinheit ECU vorliegen, Schädigungen motorrelevanter Teile wie Zylinderkopf, Abgaskrümmen etc. ermittelt werden.

Das Verfahren weist im Wesentlichen folgende Schritte auf:

- Ermittlung der transienten Temperaturen T_{CH} eines Bauteils der Brennkraftmaschine auf Basis von gemessenen Eingangsgrößen aus dem Motorbetrieb - entweder in Echtzeit oder aus der elektronischen Steuereinheit ECU oder aus Tabellen denen zumindest ein vorangegangener Prüflauf der Brennkraftmaschine zu Grunde liegt;
- Ermittlung von temperaturabhängigen mechanischen Randbedingungen CON_{TS} aus einer Tabelle, die wie folgt generiert wird: TMF-Berechnung (Thermo-Mechanical-Fatigue - thermo-mechanische Bauteilermüdung) liefert temperaturabhängig die Einspannungssituation/das Einspannungsverhältnis für jede Position des betrachteten Bauteils, insbesondere hinsichtlich einer Referenztemperatur $T_{ref(t)}$. Zusätzlich werden Materialparameter des Bauteils unter Verwendung eines Werkstoffmodells MM für den Bauteil berücksichtigt (das Werkstoffmodell MM kann beispielsweise auf der Spannungs-Dehnungskurve bzw. der Spannungs-Dehnungscharakteristik $\sigma\epsilon_{(t, T)}$ und dem E-Modul $E_{(T)}$ für den Bauteil basieren).
- Berechnung der plastischen Dehnungen auf Basis der thermischen und mechanischen Randbedingungen;

- Aufsummieren der plastischen Dehnungen zur Bewertung der Schädigungssituation bei realen Testfahrten.

Das erfindungsgemäße Verfahren kann in der elektronischen Steuereinheit ECU der Brennkraftmaschine implementiert werden, sodass anhand dort vorhandener Motormesswerte mittels des virtuellen Temperatur- und Spannungssensors eine Schädigung von Motorbauteilen berechnet werden kann und entsprechend derartige Teile rechtzeitig ausgetauscht bzw. gewartet werden können. In einer Variante der Erfindung kann auch vorgesehen sein, dass die elektronische Steuereinheit ECU bei Auftreten einer gewissen, vordefinierbaren Schädigung das Drehmoment und/oder die Kraftstoffzuführung und/oder die Leistung reduziert. So kann eine gravierendere Schädigung verhindert oder zumindest hinausgezögert werden.

Unter der Voraussetzung, dass eine TMF-Rechnung bereits vorhanden ist, sind folgende Input Daten für den virtuellen Temperatursensor 1 erforderlich: Motor Moment M , Motor Drehzahl n , Kühlwasser Temperatur Einlass T_C , Kühlwasser Massenstrom m_C , Kühlwasser Druck (kann eventuell abgeschätzt werden) p_C , Bauteiltemperatur (z.B. Auslassbrücke) T_{TS} , Höhenprofil der Strecke (optional) H , Motorbremse Charakteristik.

Der virtuelle Temperatursensor 1 beruht beispielsweise auf der bekannten Wärmeleitungsgleichung unter Berücksichtigung thermischer Randbedingungen, die entsprechend strömungsmechanischen Ähnlichkeitsgesetzen berechnet bzw. skaliert werden.

Der virtuelle Spannungssensor 2 basiert auf einem elasto-viscoplastischen Chaboche Modell oder einem adaptierten elasto-viscoplastischen Chaboche Modell (Chaboche Modelle sind zum Beispiel in "Mechanics of Solid Materials", Jean Lemaitre, Jean-Louis Chaboche, Cambridge University Press, 1990, beschrieben).

Als mechanische Randbedingungen werden temperaturabhängige Einspannungsbedingungen im Modell angewandt, die Temperatur wird vom virtuellen Temperatursensor 1 berechnet. Auch die Temperaturrandbedingungen werden vom virtuellen Temperatursensor 1 berechnet

Mechanische Randbedingungen des Gesamtdehnungstensors:

Die Einspannungsbedingungen des Sensorbereichs werden aus vorangegangenen Thermoshock - FE-Simulationen entnommen und als temperaturabhängiges Kennfeld oder als eine darauf basierende Ersatzfunktion hinterlegt. Hierfür wird die totale Dehnung ϵ_{tot} als mechanische Randbedingung verwendet.

$$\epsilon_{\text{tot}} = \epsilon_{\text{el}} + \epsilon_{\text{pl}} + \epsilon_{\text{vi}} + \epsilon_{\text{th}}$$

mit

- ϵ_{el} ... elastische Dehnung
- ϵ_{pl} ... plastische Dehnung
- ϵ_{vi} ... visco plastische Dehnung
- ϵ_{th} ... thermische Dehnung

Die mit dem virtuellen Temperatursensor 1 errechneten Temperaturen werden als Eingangsgröße für das Kennfeld/die Ersatzfunktion verwendet, um die Randbedingungen entsprechend der Temperaturentwicklung vorzugeben.

Die Fig. 4 zeigt eine praktische Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens in einem Feldversuch während einer Testfahrt auf einer Teststrecke, welche ein definiertes Höhenprofil H aufweisen kann. Die gesamte kumulierte visco-plastische Dehnung $\Delta\epsilon^{\text{vcum}}$ betrug beispielsweise 0,033%. Die Testfahrt wurde durch einzelne Pausen R unterbrochen, in denen eine Abkühlung des betrachteten Bauteiles (Zylinderkopf) eintrat. Fig. 5 und 6 stellen Ausschnitte aus Fig. 4 dar.

Wie aus Fig. 5 erkennbar ist, kommt es auch nach Abkühlung des Bauteils während einer Belastungspause zu einem Fortschreiten der kumulierte visco-plastische Dehnung ϵ^{vcum} . Fig. 6 zeigt, dass auch Kriecheffekte CE im visko-plastischen Verhalten während Heißphasen HP wiedergegeben werden.

Das erfindungsgemäße Verfahren kann besonders vorteilhaft beispielsweise bei Zylinderköpfen, Kolben und Auslasssammler angewendet werden. Daneben sind aber auch andere Einsatzmöglichkeiten denkbar.

P A T E N T A N S P R Ü C H E

1. Verfahren zur Abschätzung der Schädigung zumindest eines technischen Bauteils einer Brennkraftmaschine, dadurch gekennzeichnet, dass folgende Schritte durchgeführt werden:
 - a) Bereitstellen zumindest eines virtuellen Temperatursensors (1) für den Bauteil;
 - b) Bereitstellen zumindest eines virtuellen Spannungssensors (2) für den Bauteil;
 - c) Ermitteln einer transienten Temperatur (T_{CH}) des Bauteiles der Brennkraftmaschine mittels des virtuellen Temperatursensors (2) auf der Basis zumindest eines Motor- oder Betriebs- oder Streckenparameters aus der Gruppe Motordrehmoment (M), Motordrehzahl (n), Motorleistung (P), Kühlmittelmassestrom, (m_c), Kühlmitteltemperatur (T_c), Umgebungstemperatur (T_u) und Streckenprofil (H), wobei vorzugsweise zumindest ein Parameter in einer elektronischen Steuereinheit (ECU) abgelegt ist;
 - d) Ermitteln der Spannungen des Bauteils der Brennkraftmaschine mittels des virtuellen Spannungssensors (2) auf der Basis eines vorgegebenen Gesamtdehnungstensor ($\epsilon_{(Tref)}^{tot}$) und der mittels des virtuellen Temperatursensors (1) ermittelten Temperatur (T_{CH}) des Bauteils;
 - e) Ermitteln der visko-plastischen Dehnungen (ϵ^v) des Bauteiles auf der Basis eines Werkstoffmodells (MM);
 - f) Aufsummieren der visko-plastischen Dehnung ($\epsilon^{vcum}_{(t)}$) des Bauteils.
 - g) Ermitteln der Schädigung des Bauteils auf Grund der kumulierten plastischen Dehnungen ($\epsilon^{vcum}_{(t)}$).
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Schritt a) folgende Schritte beinhaltet:

- a1) Erzeugen zumindest eines virtuellen Temperatursensors (1) für den Bauteil auf der Basis eines ersten mathematischen Modells und Durchführen einer Kalibrierung für den stationären Fall, vorzugsweise unter Einbeziehung zumindest eines Bauteilparameters aus der Gruppe Geometrie (G), Wärmeübergangsbedingungen (HTC) und Modell-Referenztemperatur ($T_{ref(t)}$);
- a2) Durchführen einer Kalibrierung des virtuellen Temperatursensors (1) für den transienten Fall - vorzugsweise unter Einbeziehung zumindest eines Motor- oder Betriebsparameters aus der Gruppe Drehmoment (M), Motordrehzahl (n), Kühlmitteltemperatur (T_c), Kühlmittelmassestrom (m_c), Kühlmitteldruck (p_c);
- 3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der Schritt b) folgende Schritte beinhaltet:
 - b1) Erzeugen zumindest eines virtuellen Spannungssensors (2) für den Bauteil unter Bildung zumindest eines nichtlinearen Spannungssensor ($\sigma_{(t)}$) auf der Basis eines zweiten mathematischen Modells unter Einbeziehung zumindest eines Betriebsparameters, insbesondere einer Referenztemperatur $T_{ref(t)}$ des Bauteils aus einer Thermoschockanalyse und eines Werkstoffmodells (MM) des Bauteils;
 - b2) Durchführen einer Kalibrierung des virtuellen Spannungssensors (2) für den stationären Fall und für den transienten Fall;
- 4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest einem der Schritte a1), a2), b1) oder b2) eine Thermoschockanalyse an einem Motorprüfstand zu Grunde gelegt wird.
- 5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass der virtuelle Temperatursensor (1) und/oder der virtuelle Spannungssensor (2) in die elektronische Steuereinheit (ECU) der Brennkraftmaschine implementiert wird.
- 6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass ein Algorithmus zur Schädigungsermittlung zumindest eines Bauteils in

die elektronische Steuereinheit (ECU) der Brennkraftmaschine implementiert wird.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Gesamtdehnungstensor ($\epsilon^{\text{tot}}_{(\text{Tref})}$) des Bauteils vor Schritt d) in einer thermomechanischen Analyse (TMA) ermittelt wird.
8. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahren zur Abschätzung der Schädigung zumindest eines technischen Bauteils einer Brennkraftmaschine nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass in der elektronischen Steuereinheit (ECU) der Brennkraftmaschine ein virtueller Temperatursensor (1) und/oder ein virtueller Spannungssensor (2) implementiert ist.
9. Vorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass in der elektronischen Steuereinheit (ECU) der Brennkraftmaschine ein Algorithmus zur Schädigungsermittlung zumindest eines Bauteils implementiert ist.

2013 10 11

Fu/St

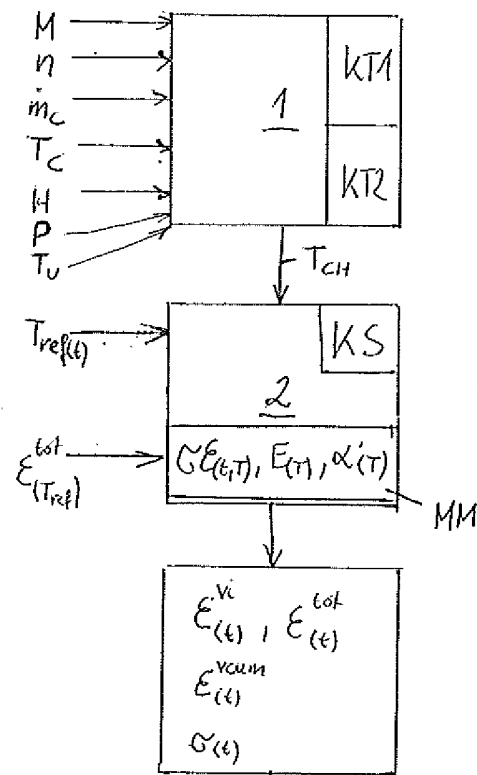


Fig. 1

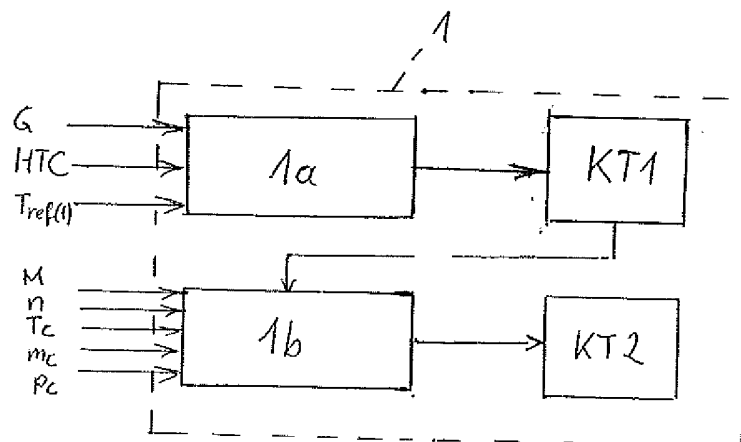


Fig. 2

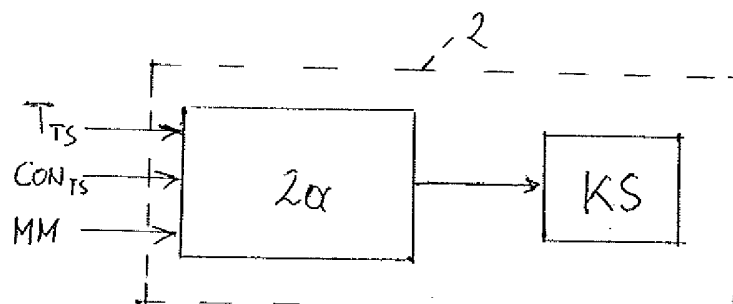


Fig. 3

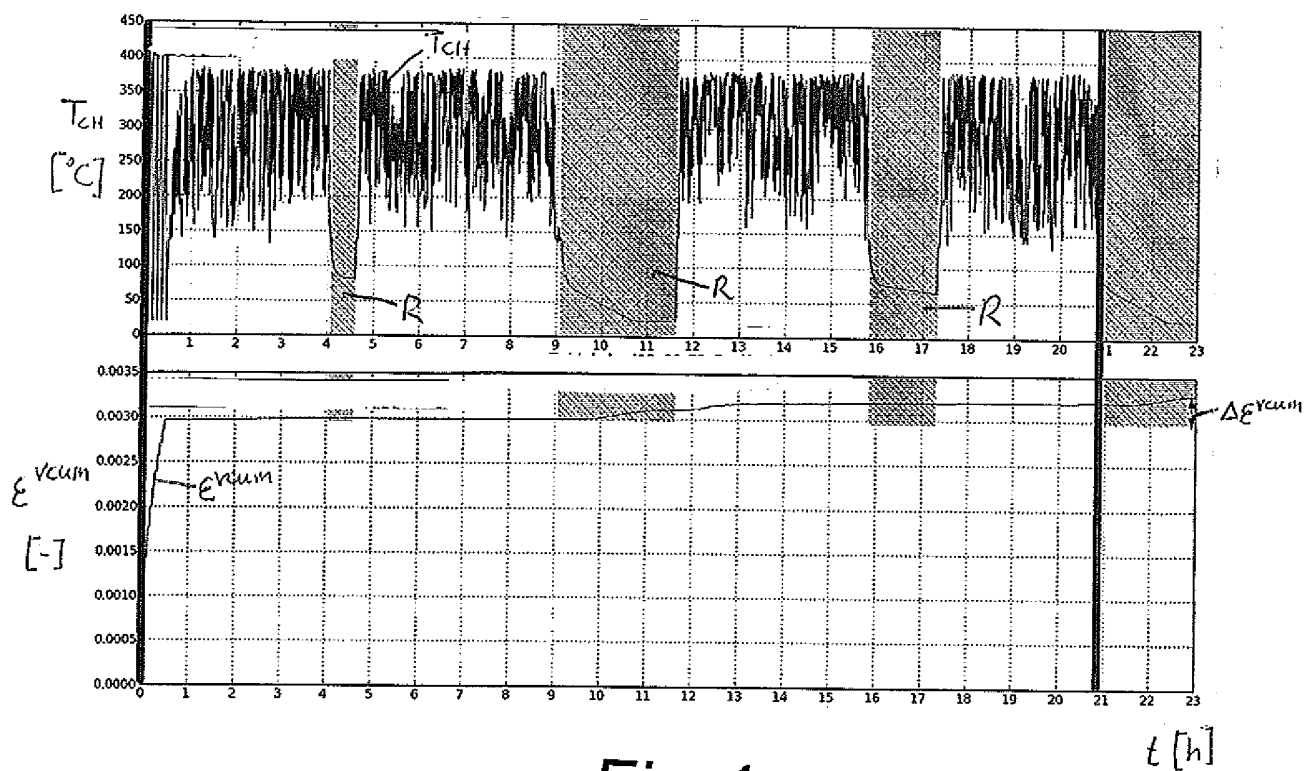


Fig.4

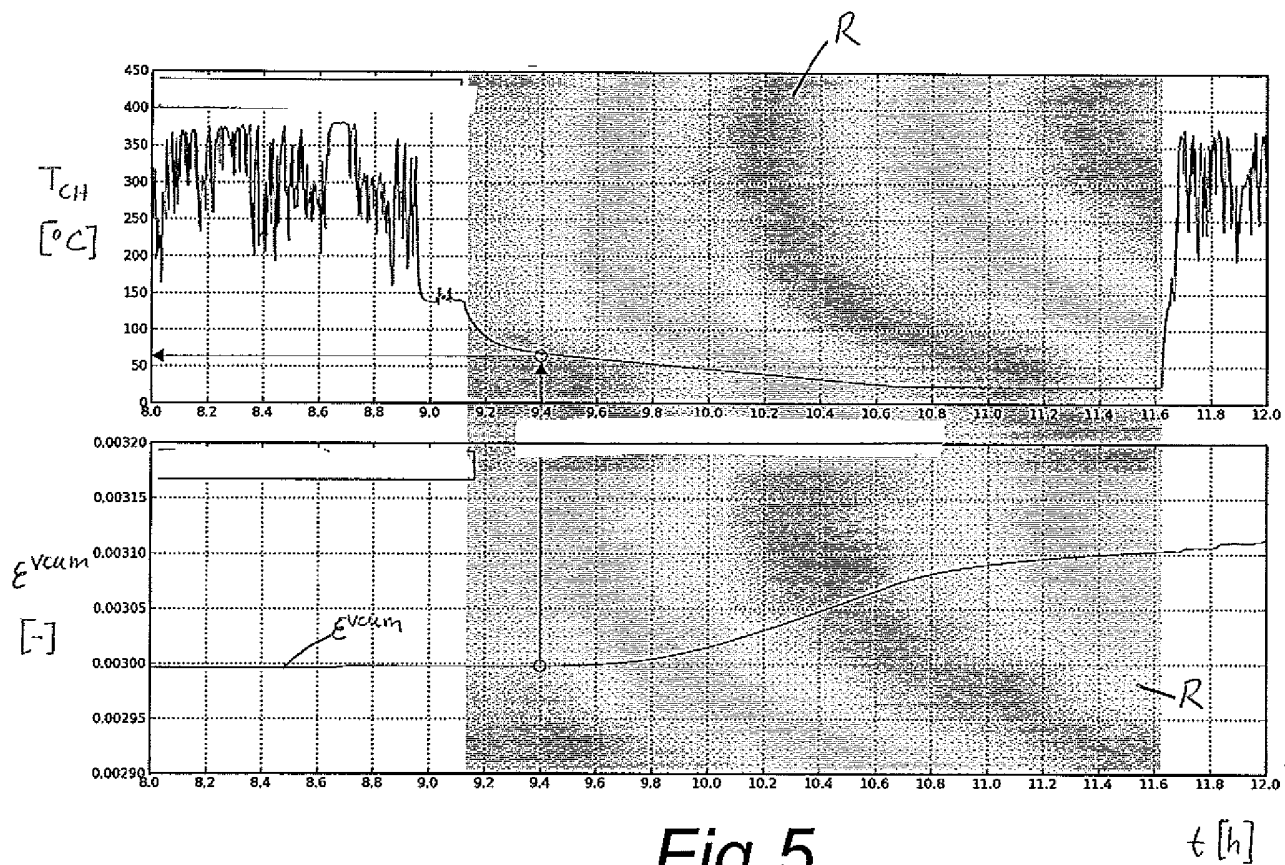


Fig.5

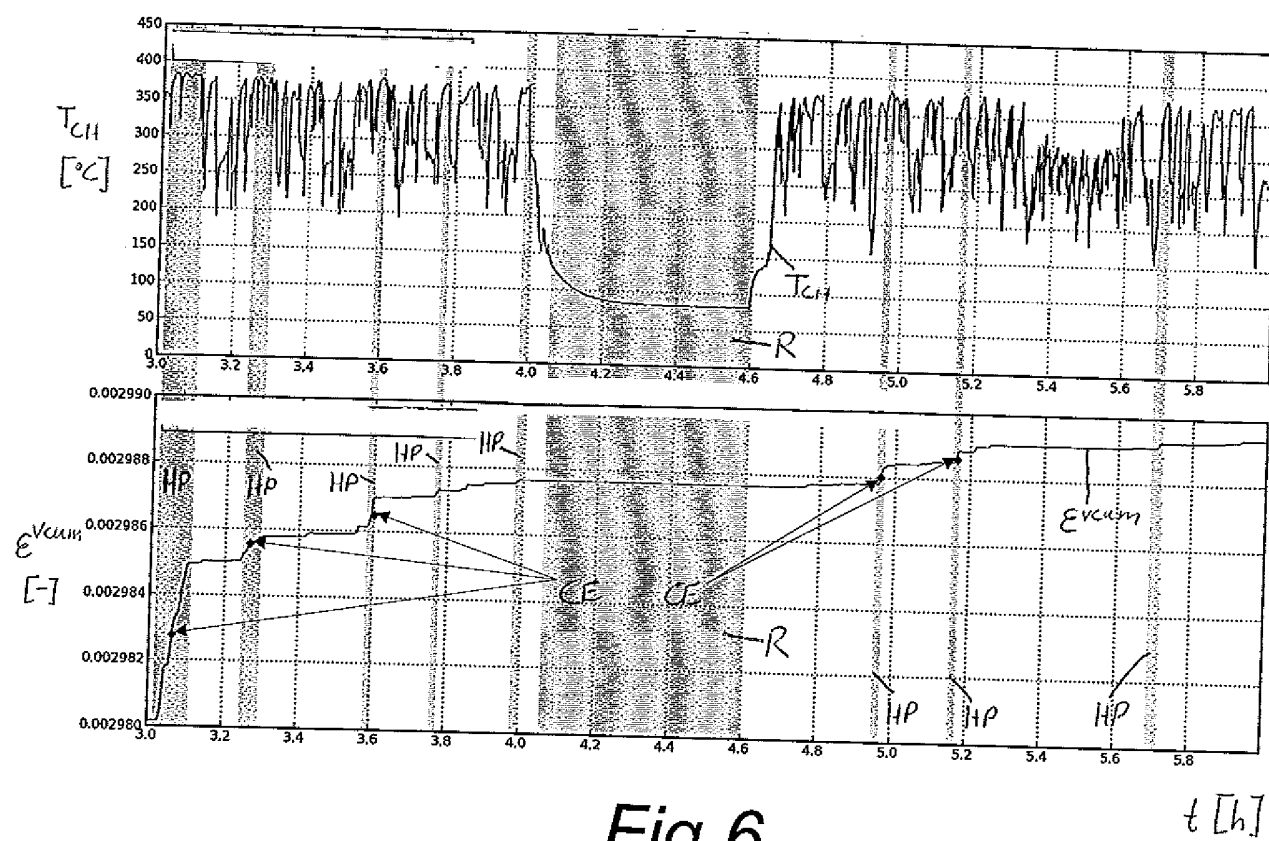


Fig.6

t [h]