

(12)

Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 353/2008
(22) Anmeldetag: 04.03.2008
(45) Veröffentlicht am: 15.08.2009

(51) Int. Cl.⁸: **G01M 7/00** (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
RU 2245531C2

(73) Patentinhaber:
ÖSTERREICHISCHES FORSCHUNGS- UND
PRÜFZENTRUM ARSENAL GESELLSCHAFT
M.B.H.
A-1210 WIEN (AT)

(54) VERFAHREN ZUR VORHERSAGE VON EIGENFREQUENZEN VON BAUWERKEN

- (57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Modellierung von Eigenfrequenzen eines Bauwerks in Abhängigkeit von Temperatur und mechanischen Belastung. Erfindungsgemäß ist vorgesehen,
- dass eine Modellfunktion (F) bestimmt wird, welche als Produkt eines belastungsabhängigen Terms ($k_\epsilon(\epsilon)$), eines temperaturabhängigen Terms ($k_T(T)$), sowie einer Grundfrequenz F gebildet ist $F(T, \epsilon) = f \cdot k_T(T) \cdot k_\epsilon(\epsilon)$,
 - dass Referenzmessungen oder Referenzsimulationen am zu vermessenden Bauwerk bei unterschiedlichen Temperaturen und Belastungen durchgeführt werden,
 - dass die Abweichung der gemessenen oder durch Simulation ermittelten Eigenfrequenz (f_e) von der durch Einsetzen in die Modellfunktion ermittelten vorhergesagten Eigenfrequenz (f_p) bei jeweils gleicher Temperatur (T) und Belastung (ϵ) minimiert wird, und
 - dass Messwerte für die Temperatur (T) und die Belastung (ϵ) in die Modellfunktion (F) eingesetzt werden und das Ergebnis der Modellfunktion ($F(T, \epsilon)$) als Eigenfrequenz (f_e) angesehen wird.

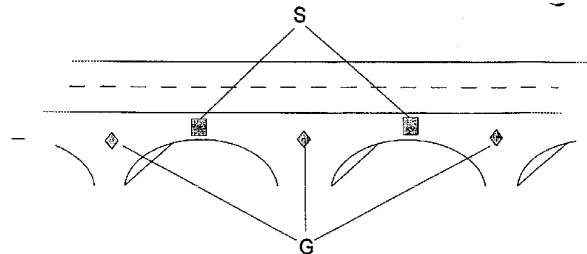


Fig. 1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren für die Modellierung und die Vorhersage von Eigenfrequenzen eines Bauwerks gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruches 1.

[0002] Das erfindungsgemäße Verfahren kann vor allem zur automatisierten Überwachung von Bauwerken, insbesondere Brücken, eingesetzt werden. Ziel der Erfindung ist die Reduktion der enormen Datenmengen, welche durch Sensoren an einem Bauwerk aufgezeichnet werden. In einem Zeitraum von mehreren Jahren, in denen das Bauwerk mit einem Überwachungssystem überwacht wird, werden vom Überwachungssystem kontinuierlich Eigenschwingungen, Temperaturen und auch Dehnungen des Bauwerks aufgezeichnet, wobei riesige Datenmengen anfallen. Mittels dieser Daten können die Schwankungen der dynamischen Eigenschaften des Bauwerks über diesen Zeitraum beobachtet und statistisch ausgewertet werden. Besonders relevant sind in diesem Zusammenhang die Abhängigkeit der Schwingungs-Eigenfrequenzen des Bauwerks von der Temperatur und von der belastungsbedingten Verformung des Bauwerks sowie in weiterer Folge eine daran anschließende Modellbildung.

[0003] Derartige Belastungen werden im Folgenden als Resultat von externen Kräften wie z. B. Wind und/oder Autoverkehr angesehen und können am Bauwerk Verformungen in Form von Verschiebungen, Biegungen, Dehnungen und Torsion bewirken. Ferner können auch neben Temperatur und Belastung weitere Umwelteinflüsse berücksichtigt werden. Bevorzugt werden hierfür die Luftfeuchtigkeit und die Lichteinstrahlung, insbesondere die Wärmestrahlung des Sonnenlichts, überwacht. Als Einstrahlung wird die Einstrahlung von infrarotem, sichtbarem und ultraviolettem Licht angesehen und die damit einhergehenden Temperaturänderungen berücksichtigt.

[0004] Das erfindungsgemäße Verfahren kann als Basis für Methoden zur zerstörungsfreien Prüfung des Bauwerks dienen.

[0005] Wesentliche Probleme bei bestehenden Bauwerken sind die Nichtberücksichtigung von wesentlichen Umwelteinflüssen, insbesondere Temperatur und/oder mechanische Belastung oder Verformung, auf gemessene Schwingungsdaten, insbesondere Eigenfrequenzen. Hierbei können große Schwankungen auftreten, welche die Messergebnisse verzerren und im schlimmsten Fall zu Fehlvorhersagen führen.

[0006] Ziel dieses Verfahrens ist es, die eingangs genannten Probleme zu lösen und ein Verfahren zur Modellierung eines Bauwerks zur Verfügung zu stellen, welches die Einwirkung von Umwelteinflüssen auf die Modelle mitberücksichtigt. Die Erfindung löst die Aufgabe durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Kennzeichens des Anspruches 1.

[0007] Das erfindungsgemäße Verfahren bietet die Möglichkeit, eine sehr große Anzahl von aufgenommenen Schwingungsmessdaten und/oder Eigenfrequenzen in Abhängigkeit von der Temperatur und der auf das Bauwerk einwirkenden Belastung sowie der daraus resultierenden Verformung auf wenige Modellparameter zu reduzieren. Mittels einfach auszuwertender Vorgaben wird die Temperatur- und Belastungs- bzw. Verformungsabhängigkeit modelliert, wodurch Eigenfrequenzen einfach vorhergesagt werden können.

[0008] Ein Verfahren gemäß dem Anspruch 2 behandelt ein Modell, welches inhomogene oder verteilte Temperaturverhältnisse in dem Bauwerk und/oder um das Bauwerk berücksichtigt.

[0009] Mit einem Verfahren gemäß dem Anspruch 3 kann eine Anpassung der Parameter an das mechanische und thermische Verhalten einzelner Bauwerke vorgenommen werden.

[0010] Mit den Merkmalen des Anspruchs 4 kann das Verfahren für eine Vielzahl von zu ermittelnden Eigenfrequenzen unterschiedlicher Ordnung eingesetzt werden.

[0011] Mit den Merkmalen der Ansprüche 5 und 6 kann eine Anpassung der Parameter an weitere Umwelteinflüsse, insbesondere die Einstrahlung und die Luftfeuchtigkeit vorgenommen

werden.

[0012] Fig. 1 zeigt schematisch ein Bauwerk, im vorliegenden Fall eine Brücke, mit Messeinrichtungen zur Bestimmung von Umwelteinflüssen und Eigenfrequenzen.

[0013] Fig. 2 zeigt schematisch eine Ausgestaltung der temperaturabhängigen Funktion f_T mit linearem Ansatz ($c=0$) mit erfindungsgemäßen linear-exponentiellem Ansatz sowie einige Messwerte.

[0014] Fig. 3 zeigt die Abweichung der ersten gemessenen Eigenfrequenz mit und ohne Anpassung an die Umwelteinflüsse.

[0015] Fig. 4 zeigt die Abweichung gemessener Eigenfrequenzen von dem Modell ermittelten Eigenfrequenzen mit und ohne Anpassung an die Umwelteinflüsse.

[0016] Mit dem erfindungsgemäßen Modell oder Vorhersagemodell können einzelne Eigenfrequenzen f_e in Abhängigkeit von den am Bauwerk gemessenen Temperaturen T und Belastungen ε genau bestimmt werden. Basierend auf den auf das Bauwerk einwirkenden Umwelteinflüssen, im Wesentlichen der Temperatur T und der mittleren Belastung ε , wird für jede der Eigenfrequenzen f_e ein Erwartungswert bestimmt. Durch die Bestimmung von mehreren Eigenfrequenzen f_e unterschiedlicher Ordnung werden das Verhalten sowie der Betriebszustand des Bauwerks, z. B. einer Brücke, charakterisiert und ausgewertet bzw. die erhaltenen Messwerte an nachgeschaltete automatisierte Auswerteeinheiten, insbesondere Schadensdetektoren, weitergeleitet.

[0017] Zur Ermittlung der Messwerte für die Eigenfrequenzen und für die Umwelteinflüsse sind gemäß Fig. 1 am Bauwerk sowohl Messeinrichtungen S für die Umwelteinflüsse wie Temperatur T und mechanische Belastung ε , beispielsweise Dehnmessstreifen G , sowie Frequenzmesseinrichtungen für die Ermittlung von Eigenfrequenzen f_e von vorgegebener Ordnung angebracht. Selbstverständlich sind auch andere Detektoren und Sensoren für alle Messwerte einsetzbar.

[0018] Das Vorhersagemodell wird als eine Reihe von Modellfunktionen F oder Modellfunktionen F definiert, welche Parameter aufweisen, die zur Anpassung des Modells an das Bauwerk vorgesehen sind. Durch Variation der einzelnen Parameter, insbesondere mittels Fitting-Methoden, kann ein Parametersatz gefunden werden, bei dessen Verwendung die Vorhersage der Modellfunktion F am Besten mit dem tatsächlichen Verhalten des Bauwerks übereinstimmt.

[0019] Neben der Anpassung des Modells durch Referenzmessung ist es auch möglich, die Parameter durch ein komplexeres mechanisches bzw. thermisches Simulationsmodell zu erhalten. Um die Optimierung zu vereinfachen, ist es zweckmäßig, jede Eigenfrequenz f_e für sich zu modellieren, wobei jeder einzelnen Eigenfrequenz eine bestimmende Modellfunktion F zugeordnet wird.

[0020] Zur Charakterisierung einzelner Eigenfrequenzen f_e wird die Modellfunktion F bestimmt, welche von der Belastung ε und der Temperatur T abhängig ist. Diese Modellfunktion F wird als Produkt eines belastungsabhängigen Terms $k_\varepsilon(\varepsilon)$, eines temperaturabhängigen Terms $k_T(T)$ sowie einer Grundfrequenz f gebildet: $f_e = F(T, \varepsilon) = f \cdot k_\varepsilon(\varepsilon) \cdot k_T(T)$.

[0021] Durch diesen Separationsansatz wird gewährleistet, dass weitere abhängige Terme in die Formel zur Charakterisierung eingefügt werden können, wobei für jede abhängige Variable ein unterschiedlicher Ansatz zur Beschreibung der Abhängigkeit gewählt werden kann.

[0022] Wie in Fig. 2 dargestellt, wird zur Charakterisierung des temperaturabhängigen Terms $k_T(T)$ ein linear exponentieller Ansatz der Form $k_T(T) = a + bT + \exp(c(T-d))$ gewählt. Zur genaueren Ausgestaltung des Ansatzes für $k_T(T)$ sind die Parameter a , b , c , d festlegbar. Um den temperaturabhängigen Term $k_T(T)$ für einen bestimmten Eigenwert eines Bauwerks zu bestimmen, sind diese Parameter a , b , c , d festzulegen.

[0023] Analog wird zur Charakterisierung des belastungsabhängigen Terms $k_\varepsilon(\varepsilon)$ verfahren. In

diesem Fall wird eine Potenzreiheentwicklung, insbesondere der Form $k_\varepsilon(\varepsilon) = 1 + e\varepsilon + g\varepsilon^2$ herangezogen. Als besondere Ausführungsform kann eine abgebrochene Potenzreiheentwicklung zweiter Ordnung gewählt werden.

[0024] Die Parameter a, b, c, d, e, f, g sind hierbei an tatsächliche Bauwerke bzw. an komplexere Simulationsmodelle angepasst, welchen Simulationsmodellen die Geometrie und die statischen und thermischen Eigenschaften zugrunde gelegt sind. Für jedes zu vermessende Bauwerk kann ein Satz von Parametern bestimmt oder ermittelt werden, durch deren Einsetzen in die oben gegebene Modellfunktion F die Abhängigkeit der Eigenfrequenzen des zu vermessenden Bauwerks von den angegebenen Umwelteinflüssen möglichst exakt wiedergegeben wird. Im Unterschied zu aufwändigen Simulationsmodellen, insbesondere Finite-Elemente-Simulationsmodellen, ist die Berechnung der gesuchten Eigenfrequenzen mittels der angegebenen Formeln jedoch sehr einfach, schnell und mit geringem Ressourcenaufwand durchzuführen. Einzelne Eigenfrequenzen f_e werden durch Auswertung der Modellfunktion $F(T, \varepsilon)$ bestimmt oder vorhergesagt. Werte für die Temperatur T und die Belastung ε können entweder mittels Messgeräte ermittelt oder willkürlich vorgegeben werden. Dies erlaubt eine zerstörungsfreie Vorhersage von kritischen Zuständen des Bauwerks.

[0025] Die Temperatur T, welche im Bereich des zu vermessenden Bauwerks vorherrscht, ist mitunter stark inhomogen verteilt, wobei unter Umständen große Differenzen der Temperaturen T einzelner Teile des Bauwerks sowie in der umgebenden Luft vorherrschen können. Dies ist insbesondere auf Sonneneinstrahlung, unterschiedliche Wärmeleitkoeffizienten einzelner Bestandteile des Bauwerks, unterschiedlichen thermischen Absorptionsgrad der Oberfläche sowie auf die Ausrichtung einzelner Teile des Bauwerks gegenüber der Sonne zurückzuführen. Aus diesem Grund können die jeweiligen Temperaturwerte T, welche mit den einzelnen Messgeräten aufgenommen werden, vorteilhafterweise gemittelt und/oder gewichtet werden. Insbesondere wird ein gewichteter Mittelwert zwischen der Lufttemperatur T_L und der Bauwerkstemperatur T_B in der Form $T = T_L \cdot h + (1-h) \cdot T_B$ gewählt.

[0026] In diesem Fall ist h ein Gewichtungsfaktor, dessen Wert zwischen 0 und 1 liegt. Analog zu den Parametern a, b, c, d, e, f, g wird der Gewichtungsfaktor h als weiterer Parameter angesehen, welcher die Modellfunktion F bestimmt.

[0027] Analog lässt sich eine Modellierung durchführen, bei der die Luftfeuchtigkeit λ sowie die Einstrahlungsstärke δ der einfallenden Wärmestrahlung Eingang in das Modell finden. Ein Modell kann beispielsweise wie folgt formuliert werden:

$$f_e = F(T, \varepsilon; \lambda, \delta) = f \cdot k_\varepsilon(\varepsilon) \cdot k_T(T) \cdot k_F(\lambda) \cdot k_S(\delta).$$

[0028] Die beiden abhängigen Terme $k_F(\lambda)$ und $k_S(\delta)$ geben dabei die Abhängigkeit der zu erwartenden Eigenfrequenzen f_e von der gemessenen Luftfeuchtigkeit λ sowie von der Einstrahlungsstärke δ wieder. Dabei können der luftfeuchtigkeitsabhängige Term k_T und der einstrahlungsabhängige Term in der Form

$$k_F = 1 + m\lambda + n\lambda^2$$

$$k_S(\delta) = 1 + o\delta + p\delta^2$$

angenommen werden, wobei m, n, o und p als zusätzliche Parameter angesehen werden.

[0029] Zur Kalibrierung des erfindungsgemäßen Modells mit Messwerten, welche an einem Bauwerk gemessen worden sind, werden die gemessenen Umgebungsgrößen, insbesondere Belastungen ε und Temperaturen T, gemeinsam mit den gleichzeitig bestimmten Eigenfrequenzen f_e abgespeichert. In weiterer Folge werden die Parameter a, b, c, d, e, f, g und gegebenenfalls der Parameter h sowie die Parameter m, n, o, p bestimmt, derart dass die Abweichung Δf_e der gemessenen Eigenfrequenz f_e^m von der durch das Modell vorhergesagten Eigenfrequenz f_e für jeweils gleiche Umgebungsgrößen minimiert wird. Für die genaue Durchführung dieses

Verfahrensschritten sind aus dem Stand der Technik diverse mathematische Fitting-Methoden bekannt.

[0030] Sollte im Zuge der folgenden Kalibrierung festgestellt werden, dass zwischen einer der Eingangsmessgrößen $\varepsilon, T, \lambda, \delta$ und dem Wert der vom Modell ermittelten Eigenfrequenz f_e keine Korrelation besteht, bzw. diese Eigenfrequenz unterhalb einer vorgegebenen Schwelle liegt, kann derjenige mit der jeweiligen Eingangsmessgröße korrelierte Term vernachlässigt werden. Das Kalibrierungsverfahren ist anschließend mit den übrigen Termen erneut durchzuführen.

[0031] Im Zuge dieser Fitting-Methoden ist es möglich, einigen Messwerten stärkeres Gewicht zukommen zu lassen als anderen. Dies kann im Zuge des erfindungsgemäßen Verfahrens dahingehend ausgenutzt werden, dass Eigenfrequenzen f_e , bei welchen im Zuge der Messung eine höhere Amplitude oder eine höhere Signalenergie festgestellt worden ist, bei den Fitting-Methoden stärkere Beachtung bzw. Gewichtung finden. Meist umfassen diese Fitting-Methoden eine Summation von Fehlertermen einzelner Messungen. Derartige Fehlerterme können mit einem Faktor, welcher die Signalamplitude oder die Signalenergie der Messung der jeweiligen Eigenfrequenz f_e wiedergibt, gewichtet werden. Ferner können auch gemessene Eigenfrequenzen f_e vernachlässigt werden, deren Signalamplitude oder -energie unterhalb eines vorgegebenen Grenzwerts liegt.

[0032] Für eine genaue Bestimmung von kritischen Zuständen ist die Betrachtung mehrerer Eigenfrequenzen f_e , insbesondere eine Anzahl n der niedrigsten n Eigenfrequenzen heranzuziehen. Für gegebene Temperaturen T und Belastungen ε können folglich mehrere, insbesondere die niedrigsten n aufeinanderfolgenden, Eigenfrequenzen $f_{e1} \dots f_{en}$ bestimmt werden. Für jede zu modellierende Eigenfrequenz f_{ei} wird eine Modellfunktion F_i gebildet, wobei die jeweiligen Parameter $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i, g_i$ und gegebenenfalls h_i, m_i, n_i, o_i, p_i , an die Messwerte f_e^m angepasst werden. Die jeweiligen Parametersätze $a_1 \dots, a_n, b_1 \dots, b_n, g_1 \dots, g_n$, sowie gegebenenfalls $h_1 \dots, h_n, m_1 \dots, m_n, p_1 \dots, p_n$, welche für die Eigenfrequenzen f_{e1}, \dots, f_{en} gebildet worden sind, werden zur Verfügung gehalten, insbesondere abgespeichert. Anschließend werden die Parameter a_i, \dots, h_i gegebenenfalls m_i, \dots, p_i , sowie die Temperatur der T und die Belastung ε , gegebenenfalls die Luftfeuchtigkeit und die Beleuchtungsstärke, in die Modellfunktion F eingesetzt, wodurch alle Parameter und Umwelteinflüsse bekannt sind, und die Modellfunktion durch Auswertungen der einzelnen arithmetischen Operationen ausgewertet wird. Das Ergebnis wird als Wert der Eigenfunktion $f_{e,i}$ angesehen.

[0033] Alternativ können weitere Umwelteinflüsse mit demselben Separationsansatz durch Hinzufügen weiterer von externen Einflüssen abhängiger Funktionen berücksichtigt werden. Zur Modellierung dieser Funktionen können auch polynomiale oder linear exponentielle Ansätze gewählt werden, wobei die auftretenden freien Parameter analog zur Bildung der Modellfunktion F zur Ermittlung der Eigenfrequenzen f_e herangezogen und optimiert werden.

[0034] Als zu untersuchende Bauwerke kommen Brücken, Hochhäuser, Dämme, Türme bzw. sämtliche Hochbauten in Frage.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Modellierung sowie zur Vorhersage von Eigenfrequenzen eines zu vermessenden Bauwerks, insbesondere einer Brücke, in Abhängigkeit von der Temperatur des Bauwerks sowie der auf das Bauwerk einwirkenden mechanischen Belastung, insbesondere der Druckbelastung durch Fahrzeuge, wobei am zu vermessenden Bauwerk ein oder mehrere Schwingungssensoren und/oder Beschleunigungssensoren sowie Temperatursensoren und Sensoren zur Bestimmung der auf das zu vermessende Bauwerk wirkenden mechanischen Belastung vorgesehen sind, **dadurch gekennzeichnet**,
 - dass zur Charakterisierung einer Eigenfrequenz (f_{ei}) des Bauwerks in Abhängigkeit von der Belastung (ε) und der Temperatur (T) eine Modellfunktion (F) bestimmt wird, welche als Produkt eines belastungsabhängigen Terms ($k_\varepsilon(\varepsilon)$), eines temperaturabhängigen Terms

($k_T(T)$), sowie einer Grundfrequenz f gebildet ist $F(T, \varepsilon) = f \cdot k_T(T) \cdot k_\varepsilon(\varepsilon)$,

- dass zur Charakterisierung des temperaturabhängigen Terms ($k_T(T)$) ein Ausdruck der Form $k_T(T) = a + bT + \exp(c(T-d))$ gewählt wird,
 - dass zur Charakterisierung des belastungsabhängigen Terms ($k_\varepsilon(\varepsilon)$) eine abgebrochene Potenzreihenentwicklung, insbesondere eine Polynomentwicklung zweiter Ordnung $k_\varepsilon(\varepsilon) = 1 + e\varepsilon + g\varepsilon^2$, gewählt wird,
 - dass Referenzmessungen oder Referenzsimulationen am zu vermessenden Bauwerk bei unterschiedlichen Temperaturen und Belastungen durchgeführt werden und die Eigenfrequenzen sowie die Temperaturen und Belastungen, insbesondere in Datensätzen, abgespeichert werden,
 - dass die Parameter (a, b, c, d, e, f, g) so bestimmt werden, dass die Abweichung der gemessenen oder durch Simulation ermittelten Eigenfrequenz (f_e) von der durch Einsetzen in die Modellfunktion ermittelten vorhergesagten Eigenfrequenz (f_e) bei jeweils gleicher Temperatur (T) und Belastung (ε) minimiert wird,
 - dass für jede zu modellierende Eigenfrequenz (f_e) eine Modellfunktion (F_i) umfassend eine Anzahl von Parametern (a, b, c, d, e, f, g) gebildet wird, indem die der Modellfunktion (F_i) zugehörigen Parameter (a, b, c, d, e, f, g), insbesondere mittels eines Fitting-Verfahrens, durch Variation an die Messwerte angepasst werden, und
 - dass Messwerte für die Temperatur (T) und die Belastung (ε), welche am Bauwerk ermittelt werden und/oder vorgegeben werden, in die Modellfunktion (F) eingesetzt werden und das Ergebnis der Modellfunktion ($F(T, \varepsilon)$) als Eigenfrequenz (f_e) angesehen wird.
2. Verfahren gemäß Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass jene Messwerte von Umwelteinflüssen bei der Bestimmung der Parameter stärker, insbesondere proportional zur Signalenergie oder zur Signalamplitude, gewichtet werden, deren Amplituden bzw. Signalenergie größer ist.
 3. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Charakterisierung der Temperatur (T) ein gewichteter Mittelwert zwischen einzelnen in der Umgebung des Bauwerks gemessenen Temperaturen, insbesondere ein gewichteter Mittelwert zwischen der Lufttemperatur (T_L) und der Bauwerkstemperatur (T_B) in der Form $T = hT_L + (1-h)T_B$, mit einem Gewichtungsfaktor (h), dessen Wert zwischen 0 und 1 liegt, gewählt und eingesetzt wird, und
 - dass der Gewichtungsfaktor (h) als weiterer Parameter für die Auswertung der Modellfunktion herangezogen wird.
 4. Verfahren gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass mindestens eine Eigenfrequenz (f_e) mindestens einer Ordnung, vorzugsweise der ersten Ordnung, des Bauwerkes für eine Vielzahl von Belastungen (ε) und Temperaturen (T) gemessen und ein Messdatensatz umfassend die gemessene Eigenfrequenz (f_e), die gemessene Belastung (ε) und die gemessene Temperatur (T) abgespeichert wird, und
 - dass die Parameter (a, b, c, d, e, f, g) mittels Variation bzw. Fitting-Methoden so bestimmt werden, dass die Abweichung der gemessenen Eigenfrequenz (f_e) von der durch das Modell vorhergesagten Eigenfrequenz minimiert wird,
 - dass Messwerte für die gemessene Temperatur (T) und Belastung (ε) in die so ermittelte Modellfunktion F eingesetzt werden, und
 - dass gegebenenfalls Messwerte von Eigenfrequenzen, bei deren größere Signalenergien auftreten, stärker, insbesondere der Signalenergie proportional, gewichtet werden.
 5. Verfahren gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass für gegebene Temperaturwerte (T) und Belastungen (ε) mehrere, insbesondere aufeinander folgende, Eigenfrequenzen (f_{e1}, \dots, f_{en}) bestimmt werden,

- dass für jede zu modellierende Eigenfrequenz (f_e) eine Modellfunktion (F_i) durch die Parameter (a, b, c, d, e, f, g) gebildet wird,
 - dass Parametersätze ($a_1, \dots, g_n, a_1, \dots, g_2, \dots, a_n, \dots, g_n$), sowie gegebenenfalls eine Anzahl von für jede einzelne Eigenfrequenz bestimmten Gewichtungsfaktoren (h_1, \dots, h_n), abgespeichert werden, und
 - dass für gegebene Temperatur (T) und Belastung (ϵ) eine Mehrzahl von Eigenfrequenzen (f_e) bestimmt wird.
6. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Luftfeuchtigkeit (λ) und/oder die einfallende Wärmestrahlung (δ), insbesondere von Sonnenlicht, mittels am Bauwerk oder in dessen Nähe befestigten Sensoren aufgezeichnet werden,
- ein weiterer von der Luftfeuchtigkeit (λ) abhängiger Term $k_F(\lambda)$ der Form $k_F = 1 + m\lambda + n\lambda^2$ gebildet wird, und/oder
 - ein weiterer von der Einstrahlung (δ), insbesondere der Wärmestrahlung, abhängiger Term $k_s(\delta)$ der Form $k_s(\delta) = 1 + o\delta + p\delta^2$ gebildet wird, und
 - dass die Modellfunktion (F) um zumindest einen der beiden Terme (k_F, k_s), insbesondere in der Form $F(T, \epsilon; \lambda, \delta) = f \cdot k_T(T) \cdot k_\epsilon(\epsilon) \cdot k_F(\lambda) \cdot k_s(\delta)$, erweitert wird, und
 - gegebenenfalls die weiteren Koeffizienten (m, n, o, p) als weitere Parameter für die Berechnung herangezogen werden.
7. Datenträger, **dadurch gekennzeichnet**, dass auf ihm ein Programm zur Durchführung eines Verfahrens gemäß den Ansprüchen 1 bis 6 gespeichert ist.

Hierzu 2 Blatt Zeichnungen

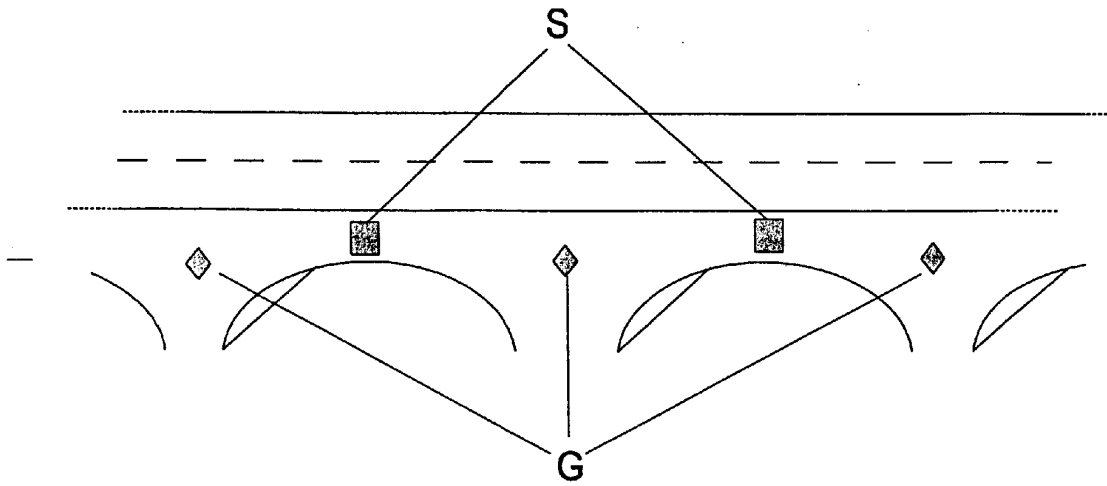


Fig. 1

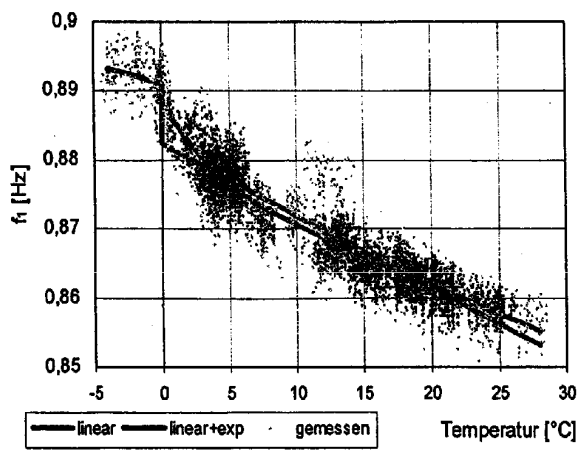


Fig. 2

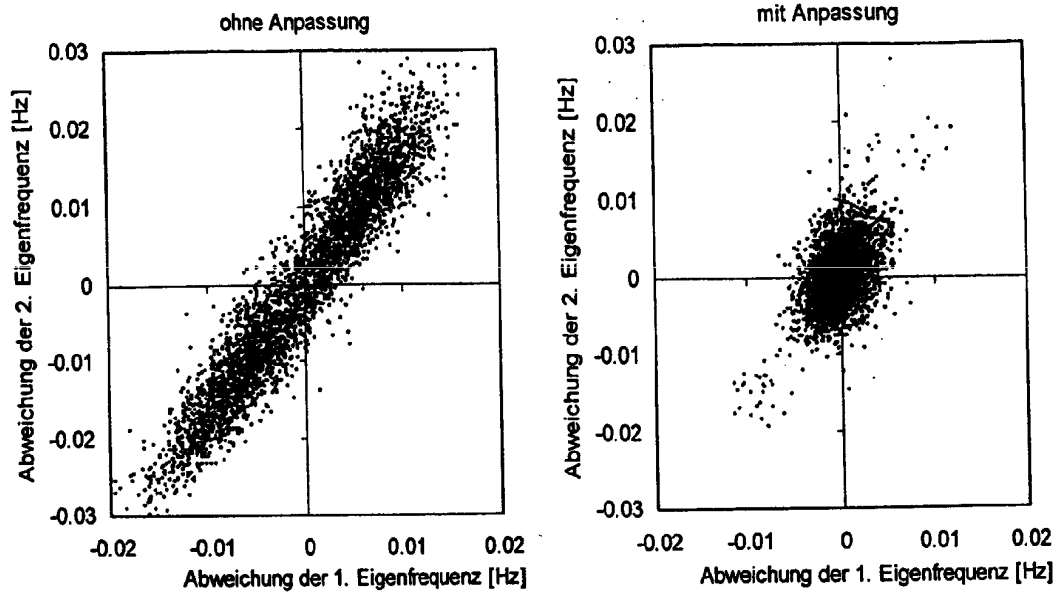


Fig. 3

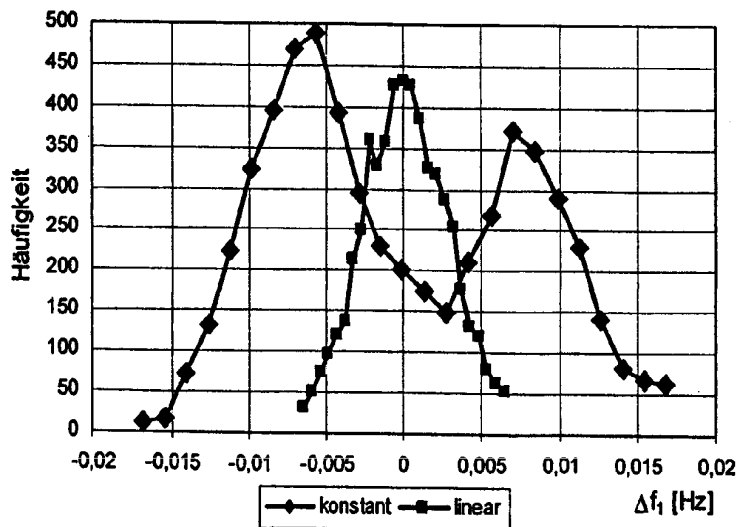


Fig. 4