

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
4. November 2010 (04.11.2010)

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2010/124872 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
G01N 29/04 (2006.01)

(74) Anwalt: GERSTEIN, Hans, Joachim; Gramm, Lins &
Partner GbR, Freundallee 13a, 30173 Hannover (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2010/002657

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY,
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM, DO,
DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP,
KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD,
ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI,
NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD,
SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR,
TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(22) Internationales Anmeldedatum:
30. April 2010 (30.04.2010)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2009 019 243.3
30. April 2009 (30.04.2009) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme
von US): DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND
RAUMFAHRT E.V. (DLR) [DE/DE]; Linder Höhe,
51147 Köln (DE).

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,
GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ,
UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD,
RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ,
DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT,
LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI,
SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN,
GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): SZEWIECZEK, Ar-
tur [DE/DE]; Naastraße 21, 38120 Braunschweig (DE).
HILLGER, Wolfgang [DE/DE]; Maschweg 12, 38110
Braunschweig (DE).

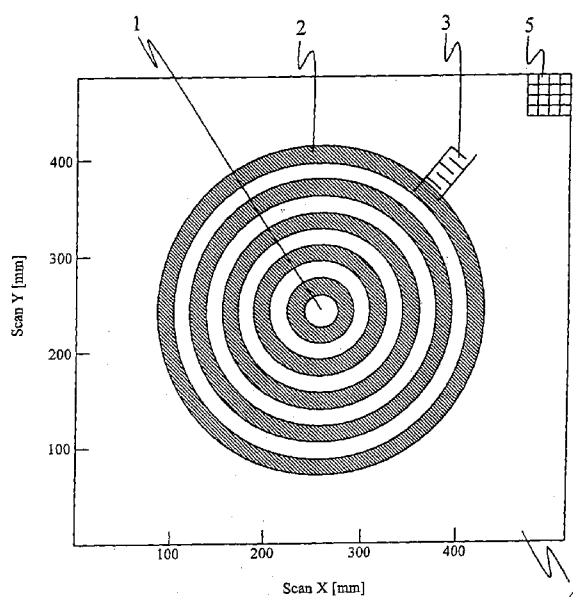
Erklärungen gemäß Regel 4.17:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR OPTIMIZING A SENSOR NETWORK

(54) Bezeichnung : VERFAHREN ZUR OPTIMIERUNG EINES SENSORNETZWERKES

Figur 1



Sensorsystems (1).

(57) Abstract: The invention relates to a method for opti-
mizing a sensor system (1) equipped for the structural
monitoring of a component (4) by means of wave propa-
gation (2), comprising the following steps: determining
at least one gridded volume data record with respect to a
wave propagation (2) in at least one partial region of the
component (4) and storing the at least one gridded volu-
me data record, determining at least one sensor position
(3) within the partial region of the component (4), and
calculating a received signal with respect to the at least
one sensor position (3) depending on the wave propaga-
tion signals stored in the at least one gridded volume
data record at the sensor position (3) for the purpose of
optimizing the sensor system (1).

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Ver-
fahren zur Optimierung eines zur Strukturüberwachung
eines Bauteils (4) mittels Wellenausbreitung (2) einge-
richteten Sensorsystems (1), mit den Schritten: Ermitteln
mindestens eines gerasterten Volumendatensatzes bezüg-
lich einer Wellenausbreitung (2) in zumindest einem
Teilbereich des Bauteils (4) und Hinterlegen des minde-
stens einen gerasterten Volumendatensatzes, Bestimmen
mindestens einer Sensorposition (3) innerhalb des Teilbe-
reichs des Bauteils (4), und Berechnen eines Empfangssi-
gnals bezüglich der mindestens einen Sensorposition (3)
in Abhängigkeit von in dem zumindest einen gerasterten
Volumendatensatz an der Sensorposition (3) hinterlegten
Wellenausbreitungssignalen zwecks Optimierung des

WO 2010/124872 A1



-
- | | |
|--|--|
| — hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, ein Patent zu beantragen und zu erhalten (Regel 4.17 Ziffer ii) | — vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eingehen (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe h) |
| — Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv) | |

Veröffentlicht:

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

Verfahren zur Optimierung eines Sensornetzwerkes

- 5 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Optimierung eines zur Strukturüberwachung des Bauteils mittels Wellenausbreitung eingerichteten Sensorsystems. Die Erfindung betrifft ebenfalls ein Computerprogrammprodukt und eine Vorrichtung hierzu.

Um den Anforderungen moderner Geräte, Maschinen und Fahrzeugen jeglicher Art gerecht zu werden, ist es notwendig geworden, die Bauteile immer komplexer zu gestalten. Dabei soll mithin die Herausforderung erreicht werden, die Festigkeit zu erhöhen und zugleich Gewicht einzusparen. Eine Möglichkeit bietet da zum Beispiel die Verwendung von kohlenstoffverstärkten Kunststoffen oder ähnliche Materialien, insbesondere Verbundwerkstoffen, die aufgrund ihres geringen Gewichtes und ihrer extremen Festigkeit eine attraktive Werkstoffalternative darstellen. Allerdings haben kohlenstoffverstärkte Kunststoffe den erheblichen Nachteil, dass bereits kleine Schlagschäden eine Beschädigungen in der Matrix hervorrufen, auch solche die mit dem bloßen Auge nicht sichtbar sind, und zu einer erheblichen Verringerung der Festigkeit des Bauteils führen können, was in sicherheitskritischen Anwendungsbereichen fatale Folgen haben könnte.

Gerade im Bereich des Flugzeugbaus können geringste Material oder Fertigungsfehler an sicherheitskritischen Bauteilen zu ernsthaften Folgen führen, die nicht zuletzt Menschenleben kosten können. Es werden daher bei Wartungsarbeiten solche kritischen Bauteile entsprechend intensiver untersucht, wobei es insbesondere darum geht, strukturelle Schäden innerhalb des Bauteils zu erkennen. Da sich die Bauteile meist an

schwer zugänglichen Positionen innerhalb des Flugzeuges befinden, werden dadurch nicht nur die Wartungsarbeiten erschwert, sondern auch um ein vielfaches teurer.

- In „Hillger, W.: Untersuchung an der Tail Unit eines Helikopters mit geführten Wellen, DGZfP-Jahrestagung 2007, Vortrag 50“ wird beschrieben, wie mittels eines aktiven Verfahrens solche Bauteile, die zwecks Untersuchung beziehungsweise Wartung nicht sinnvollerweise ausgebaut werden können, trotzdem hinsichtlich struktureller Schäden untersucht werden können. Dazu wurde die Tail Unit eines Helikopters mittels geführter Wellen untersucht, um festzustellen, wie sich solche geführte Wellen auch in komplexen Bauteilen verhalten. Dabei steht das Ziel im Vordergrund, die entsprechende Überwachungstechnik direkt in das Bauteil zu integrieren, um das Bauteil in jeder Situation und zu jedem Zeitpunkt untersuchen zu können (man spricht in diesem Falle auch von Structural Health Monitoring-SHM).
- Bei dem bekannten Verfahren des Structural Health Monitoring (SHM) werden Sender und Empfänger (Aktuatoren und Sensoren) fest mit dem Bauteil verbunden. Dabei werden von den Sendern beziehungsweise von den Aktuatoren Wellen ausgesendet, die sich in dem Bauteil entsprechend ausbreiten. Mittels entsprechender Empfänger beziehungsweise Sensoren kann dann die Wellenausbreitung aufgenommen werden und hinsichtlich struktureller Schäden untersucht werden. Denn es wurde erkannt, dass bei strukturellen Schäden des Bauteils die ausgesendeten Wellen mit der Schadstelle interagieren und so das Wellenmuster gegenüber einem Bauteil ohne Strukturveränderungen entsprechend abweicht.
- Es sind aber auch andere Sensorsysteme bekannt, die ein solches komplexes Bauteil zerstörungsfrei untersuchen können. So wird beispielsweise in „Krüger, M.: Mook, G.: Schadensdetektion adaptiver CFK-Piezokeramik-Verbunde mit Hilfe der Scanning Laservibrometrie, DGZfP-Tagung 2005“ eine Prüftechnik beschrieben, bei der mittels einer in die CFK-Struktur integrierten Piezokeramik eine Wellenausbreitung innerhalb der zu untersuchenden CFK-Struktur forciert wird, die dann mit Hilfe der Scanning

Laservibrometrie aufgenommen wird. Denn mit Hilfe von Scanning Laservibrometern beziehungsweise der Laserinterferometrie ist es möglich, elastomechanische Schwingungen und Wellen auf Bauteiloberflächen sichtbar zu machen und so die Wellenausbreitung innerhalb des Bauteils zu scannen, um anhand des aufgenommenen Wellen-
5 musters entsprechende Strukturschäden erkennen zu können. Wie in dem Paper von Krüger et al. gezeigt, erzeugen strukturelle Schäden entsprechend charakteristische Wellenmuster, wobei es entscheidend darauf ankommt, welcher Teil der zu untersuchenden Bauteilstruktur gescannt wird. Auch die Platzierung der Piezokeramik als Ak-
tuator der Wellenausbreitung ist entscheidend für das Erkennen der charakteristischen
10 Wellenmuster und die Interaktion mit eventuellen Schadstellen.

Eine andere Form des Scannings des Bauteils wird in "Hillger, W.: Visualisation and Animation of the Lamb Wave Propagation in Composites, Proceedings of the 6th International Workshop on structural Health Monitoring 2007, Stanford University, Stan-
15 ford, CA, September 11-13, 2007, volume 1, pp. 145-152" beschrieben. Dabei wird ein Ultraschallsensor verwendet, der auf einem Wasserspalt gleitet, der sich auf dem zu untersuchenden Bauteil befindet. Wird nun das Bauteil mit einem entsprechenden Ak-
tuator angeregt, so breitet sich diese Welle innerhalb des Bauteils aus und wird auf den Wasserspalt übertragen. Mit Hilfe des Ultraschallsensors kann dann die Schwingung
20 des Wasserspalts abgegriffen werden.

Aufgrund der Komplexität der heutigen Bauteile, insbesondere im Bereich der kohlenstoffverstärkten Kunststoffe ist die Position des Scannings beziehungsweise die Platzierung der Sensoren eine wichtige Entscheidung. So ist es nicht selten, dass die komplexen Bauteile mit sogenannten Stringern versehen werden, die erheblichen Einfluss
25 auf die Wellenausbreitung nehmen, so dass Impact-Schäden zwischen zwei solchen Stringern nicht erkannt werden können, wenn nicht auch ein entsprechender Aktuator beziehungsweise Sensor zwischen diesen Stringern angeordnet wird (vgl. „Hillger, W.: Lamb-Wellen zur Schadensanzeige in faserverstärkten Kunststoffen, DGZfP-
30 Jahrestagung 2005, Beitrag P12“).

Es ist daher Aufgabe der vorliegenden Erfindung ein Verfahren zur Optimierung eines solchen Sensorsystems anzugeben, ohne teure Versuche an den Bauteilen selbst durchführen zu müssen.

5

Die Aufgabe wird mit dem Verfahren der eingangs genannten Art erfindungsgemäß gelöst durch

- 10 - Ermitteln mindestens eines gerasterten Volumendatensatzes bezüglich einer Wellenausbreitung in zumindest einem Teilbereich des Bauteils und Hinterlegen des mindestens einen gerasterten Volumendatensatzes,
- Bestimmen mindestens einer Sensorposition innerhalb des Teilbereichs des Bauteils, und
- 15 - Berechnen eines Empfangssignals bezüglich der mindestens einen Sensorposition in Abhängigkeit von in dem zumindest einen gerasterten Volumendatensatz an der Sensorposition hinterlegten Wellenausbreitungssignalen zwecks Optimierung des Sensorsystems.

20

Als Sensorsystem wird in der vorliegenden Erfindung dabei sowohl ein Sensorsystem verstanden, welches fest mit dem Bauteil verbunden ist (zum Beispiel piezoelektronische Elemente) als auch Sensoren, die an das Bauteil auf eine andere Weise (Luftan-

25 Laserinterferometrie-Sensoren (Luftkontakt) oder Ultraschall-Sensoren (Kontakt zum Beispiel mittels Luft- oder Wasserspalt) ermöglichen. Dabei soll das Sensorsystem hinsichtlich der Position der Sensoren, der Anzahl der Sensoren, der Abstand zwischen den Sensoren und/oder der Form der Sensoren optimiert werden.

30 Mit dem vorliegenden Verfahren wird es nunmehr möglich, die Wellenausbreitung in-

nerhalb eines Bauteils, welches mit den vorhergenannten Verfahren untersucht werden soll, dahingehend zu analysieren, dass das verwendete Sensorsystem hinsichtlich der Struktur des Bauteils optimiert wird. Somit lässt sich unter anderem die bestmögliche Position der Sensoren relativ schnell und unkompliziert ermitteln, ohne dass es dafür aufwendiger Untersuchungen des Bauteils bedarf.

Um dies zu erreichen, wird zunächst ein gerasterter bzw. rasterförmiger Volumendatensatz bezüglich einer Wellenausbreitung des Bauteils ermittelt, indem beispielsweise eine definiert angeregte Wellenausbreitung mittels eines z.B. fest applizierten Aktuators innerhalb des Bauteils eingescannt wird. Solche Wellenausbreitungen lassen sich dabei zum Beispiel mit Hilfe einer Videoanimation grafisch darstellen.

Anschließend wird eine Sensorposition bestimmt, an der später einmal tatsächlich ein Sensor appliziert werden soll. An dieser Sensorposition wird nun aus dem hinterlegten Volumendatensatz das Empfangssignal berechnet, welches ein Sensor empfangen würde, wäre er tatsächlich und physikalisch an dieser Position angeordnet (unter angeordnet wird selbstverständlich neben der direkten Ankopplung durch applizieren der Sensoren auch die Ankopplung über Luft oder andere übertragbare Medien verstanden).

Somit lässt sich das Empfangssignal eines auf einem Bauteil angeordneten Sensors aus einem Volumendatensatz berechnen, ohne dass es dafür aufwendige und teure Untersuchungen bedarf. Es kann somit relativ schnell herausgefunden werden, welches die optimale Position eines Sensors oder was der optimale Abstand der Sensoren untereinander ist. Dabei ist es natürlich auch denkbar, dass mehrere Volumendatensätze aufgenommen werden, die unterschiedliche Wellenausbreitungen und Wellenmuster enthalten, insbesondere solche, die aufgrund von sogenannten Impact-Schäden hervorgerufen werden. Durch die Simulation eines solchen Sensorsystems durch Berechnung von Empfangssignalen an bestimmten Sensorpositionen auf Grundlage eines zuvor eingescannten Wellenfeldes kann das Sensornetz beziehungsweise Sensorsystem einfach und kostengünstig optimiert werden.

Ganz besonders vorteilhaft ist es dabei, wenn der Volumendatensatz bezüglich einer Lamb-Wellenausbreitung ermittelt wird. Lamb-Wellen haben dabei insbesondere den Vorteil, dass sie sich mit kleiner Dämpfung großflächig ausbreiten und so das gesamte Bauteil erfassen. Im Gegensatz zur Ultraschallprüfung, bei der das Bauteil aufwendig punktförmig gescannt werden muss, kann mit Hilfe von Lamb-Wellen das gesamte Bauteil erfasst werden. Es sind aber auch andere Wellen denkbar, wie z.B. Biegewellen oder Rayleigh-Wellen sowie Kombinationen davon, die sich als Grundlage für den Volumendatensatz eignen.

Um den gerasterten Volumendatensatz zu ermitteln, ist es besonders vorteilhaft, wenn dazu das Bauteil rasterförmig gescannt wird (z.B. bei einer Rasterpunktgröße von 1 x 1 mm), wobei an jedem Rasterpunkt ein Wellenausbreitungssignal erfasst und in dem gerasterten Volumendatensatz hinterlegt wird, so dass sich an jedem Rasterpunkt auf dem Bauteil ein entsprechendes Wellenausbreitungssignal ergibt. Ein solcher Rasterpunkt wird dabei vorzugsweise relativ klein zu wählen sein, um eine größtmögliche Graduierung zu erreichen.

Dabei ist es ganz besonders vorteilhaft, wenn bei dem rasterförmigen Scannen des Bauteils an jedem Rasterpunkt eine neue Wellenausbreitung generiert wird, wobei die Wellenausbreitung mittels eines an dem Bauteil applizierten Aktuators erfolgen kann. Somit ergibt sich an jedem Rasterpunkt auf dem Bauteil eine tatsächliche Wellenausbreitung an dieser Position über die Zeit. Der gerasterte Volumendatensatz enthält demnach für jeden Rasterpunkt ein Wellenausbreitungssignal, so dass sich ein Datensatz der Art

$$\mathbf{D}_{\text{vol}} = \mathbf{f}(\mathbf{t}, \mathbf{x}, \mathbf{y})$$

ergibt, wobei t = die Zeit seit der Generierung der Wellenausbreitung und x, y die Rasterposition ist. Es ließe sich somit an jeder Rasterposition (x, y) ein natives Empfangssignal über die Zeit (t) ermitteln.

Aus einem solchen gerasterten Volumendatensatz kann nunmehr vorteilhafterweise das Empfangssignal an einer Sensorposition aus mehreren Wellenausbreitungssignalen an verschiedenen Rasterpunkten berechnet werden. Dabei werden die Wellenausbreitungssignale der Rasterpunkte zur Berechnung herangezogen, die sich an der Sensorposition befinden.

Dabei können die Rasterpunkte an der Sensorposition, die zur Berechnung herangezogen werden, aufgrund einer Sensorform an der Sensorposition ermittelt werden. Es werden in diesem Falle nur die Wellenausbreitungssignale der Rasterpunkte herangezogen, die von der Sensorform abgedeckt werden. Wird ein Rasterpunkt dabei nur teilweise von der Sensorform abgedeckt, so lässt sich der Einfluss dieses Wellenausbreitungssignals auf die Gesamtberechnung in Abhängigkeit der abgedeckten Fläche des Rasterpunktes gewichten.

Des Weiteren ist es denkbar, dass die Berechnung in Abhängigkeit der Sensorform erfolgt, da unterschiedliche Sensorformen unterschiedliche Empfangssignale ermitteln. Denn zur Ermittlung einer Wellenausbreitung innerhalb eines Bauteils sind verschiedene Sensoren bekannt, wie z. B. ein Interdigitalwandler mit kammartiger Form oder ein Sensorarray. Dabei wird z.B. bei einem Sensorarray, dass aus einer Mehrzahl von Sensoren besteht, dass Empfangssignal aus den einzelnen berechneten Empfangssignalen der jeweiligen Sensoren des Array berechnet.

Besonders vorteilhaft ist dabei auch, wenn das Empfangssignal weiterhin in Abhängigkeit einer Sensorart an der Sensorposition berechnet wird, insbesondere einer Sensorart in Bezug auf die Ankopplung. So lassen sich Empfangssignale von Sensoren berechnen, die aufgrund ihrer Art fest mit dem Bauteil verbunden werden. Es lassen sich aber auch Empfangssignale von Sensoren berechnen, die mittels Luftankopplung vorgesehen sind. In Abhängigkeit dieser unterschiedlichen Eigenschaften der Sensorarten lassen sich somit verschiedenste Empfangssignale in Abhängigkeit der jeweiligen Sensorarten

simulieren.

- Die Berechnung der Empfangssignale kann dabei durch Summation der Wellenausbreitungssignale an den Rasterpositionen der Volumendatensätze durch Mittelwertbildung,
- 5 Interpolation, Anpassung des Frequenzgangs und/oder Wellenlängen – und Frequenzfilterung erfolgen. Dabei wird aus den verschiedenen Wellenausbreitungssignalen ein Empfangssignal berechnet, das sich an der entsprechenden Sensorposition ergeben würde, wobei die Berechnungsmethoden für den Fachmann bekannte und standardisierte Methoden sind.

Die Erfindung wird anhand der beigefügten Zeichnungen beispielhaft näher erläutert.

Es zeigen:

- 5 Figur 1 - Schematische Darstellung eines Lamb-Wellenfeldes einer CFK-Platte;
- Figur 2 - Wellenausbreitungssignal (Rohdaten) an einem Rasterpunkt;
- 10 Figur 3 - berechnetes Empfangssignal an einer äquivalenten Sensorposition.

- Figur 1 zeigt die schematische und sehr idealisierte Darstellung eines Lamb-Wellenfeldes 2, das sich innerhalb einer Platte 4 ausbreitet. In der Platte 4 mit quasi-isotropen Aufbau und den Abmessungen 500 x 500 mm sowie eine Dicke von 2 mm
- 15 wurde mittig ein runder piezoelektrischer (PZT-) Aktuator 1 appliziert. An der gegenüberliegenden Seite wurde die Platte mit einem breitbandigen kapazitiven Sensor (Frequenzbereich 10 Hz bis 100 kHz) in einem Abstand von wenigen Millimetern mäanderförmig in einem Raster von 1 x 1 mm gescannt.
- 20 Der piezoelektrische Aktuator generiert dabei ein Wellenfeld 2, was sich in der CFK-Platte ausbreitet. An jedem Rasterpunkt 5, der von dem kapazitiven Sensor gescannt wird, erfolgt eine elektrische Anregung des piezoelektrischen Aktuators 1. Nach der elektrischen Anregung des piezoelektrischen Aktuators 1 mit einem elektrischen Burst-Signal mit einer Mittelfrequenz von 40 KHz und drei Wellenzügen wird eine Wellen-
- 25 ausbreitung in dem Bauteil generiert, wobei von dem Sensor an jedem Rasterpunkt 5 nach der elektrischen Anregung des piezoelektrischen Aktuators 1 ein Zeitbereich von 600 µs aufgezeichnet und als Wellenausbreitungssignal an dem entsprechenden Rasterpunkt 5 hinterlegt wird. Der Aktuator 1 ist in diesem Ausführungsbeispiel mittig fest mit dem Bauteil verbunden.

Aus einem solchen vollständigen Scan lässt sich danach eine Videoanimation berechnen, wobei Figur 1 einen Schnappschuss 148 μ s nach der Anregung des piezoelektrischen Aktuators 1 schematisch darstellt. Die so an jedem Rasterpunkt 5 gescannten Wellenausbreitungssignale werden somit ganzheitlich als ein gerasterter Volumendatensatz hinterlegt.

Figur 2 zeigt das Wellenausbreitungssignal an einem bestimmten Rasterpunkt (Position 360, 122), wie es von dem kapazitiven Sensor 600 μ s lang aufgezeichnet wurde. Zu erkennen ist, dass nach ungefähr 200 μ s ein entsprechender Ausschlag erfolgt, der darauf hin deutet, dass ab diesem Zeitpunkt die sich in dem Bauteil ausbreitende Welle an dieser Position angekommen ist.

Figur 3 zeigt nunmehr ein berechnetes Empfangssignal. Dazu wurde eine Sensorposition (Bezugszeichen 3 in Figur 1) bestimmt, wobei unter der Sensorposition eine Position zu verstehen ist, an der ein tatsächlicher Sensor an dem Bauteil appliziert werden kann oder ein entsprechender Sensor zum Beispiel mittels Luftkontakt an das Bauteil 4 angekoppelt wird. Da in der Regel ein solcher Sensor größer ist als die verwendete Rasterauflösung, werden von dem piezoelektrischen Sensor mehrere Rasterpunkte 5 abgedeckt. Die Rasterpunkte sind dabei in der rechten oberen Ecke in Figur 1 schematisch angedeutet.

Gemäß der vorliegenden Erfindung wird nunmehr aus den Wellenausbreitungssignalen, die an den von der Sensorposition abgedeckten Rasterpunkten ermittelt wurden, das Empfangssignal berechnet, welches einen Sensor empfangen würden, wenn er tatsächlich an dem Bauteil appliziert beziehungsweise angekoppelt werden würde. Somit lässt sich bereits im Vorfeld ein Empfangssignal eines Sensors berechnen, ohne dass es dafür aufwendiger Untersuchungen bedarf. Die Berechnung kann dabei auch in Abhängigkeit der zukünftigen Sensorart bzw. der Sensorform erfolgen.

In dem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Form ist, wie in Figur 1 gezeigt, eine

kammartige Sensorform gewählt worden. Eine solche kammartige Sensorform hat dabei den Vorteil, dass sie, ganz allgemein gesprochen, bestimmte Wellenlängen (Moden) herausfiltern kann. Als Grundlage für die Berechnung werden dabei jene Welleausbreitungssignale der Rasterpunkte verbindet, die von der kammartigen Struktur des Sensors
5 3 abgedeckt werden. Wird ein Rasterpunkt dabei nur teilweise von dem Sensor abgedeckt, so wird die Fläche ermittelt, die von dem Sensor an dem Rasterpunkt abgedeckt wird und in Abhängigkeit dieser abgedeckten Fläche fließt dann das darunter liegende Wellenausbreitungssignal entsprechend in die Berechnung ein.

10 Denkbar sind aber auch andere Sensorformen, zum Beispiel rechteckige oder runde Sensoren. Unterschiedliche Sensorformen erzeugen dabei unterschiedliche Empfangssignale, so dass die Empfangssignale unterschiedlicher Sensorformen aufgrund eines zuvor durchgeführten Scans des Bauteils simuliert werden können.

15 An einer impactgeschädigten Platte kann die Interaktion der Lamb-Wellen mit den Fehlern dargestellt werden und mit an den äquivalenten Sensorpositionen das Empfangssignal berechnet werden. Dabei kann die Änderung des Empfangssignals durch eine Fehlerstelle ermittelt werden, was hinsichtlich der Optimierung des Sensorsystems wichtig ist. So lassen sich aus den Erkenntnissen, die aus den äquivalenten Sensorposi-
20 tionen ermittelt wurden, die optimale Position, Form, Abstand und Anzahl der Sensoren des Sensorsystems ableiten, umso relativ sicher Strukturschäden innerhalb des Bauteils erkennen zu können.

Patentansprüche:

1. Verfahren zur Optimierung eines zur Strukturüberwachung eines Bauteils (4)
mittels Wellenausbreitung (2) eingerichteten Sensorsystems (1), mit den Schrit-
5 ten:
 - Ermitteln mindestens eines gerasterten Volumendatensatzes bezüglich ei-
ner Wellenausbreitung (2) in zumindest einem Teilbereich des Bauteils
(4) und Hinterlegen des mindestens einen gerasterten Volumendatensat-
10 zes,
 - Bestimmen mindestens einer Sensorposition (3) innerhalb des Teilbe-
reichs des Bauteils (4), und
 - 15 - Berechnen eines Empfangssignals bezüglich der mindestens einen Sen-
sorposition (3) in Abhängigkeit von in dem zumindest einen gerasterten
Volumendatensatz an der Sensorposition (3) hinterlegten Wellenausbrei-
tungssignalen zwecks Optimierung des Sensorsystems (1).
- 20 2. Verfahren nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch Ultraschallsensoren, insbe-
sondere piezoelektrische Sensoren, Laserinterferometrie-Sensoren und/oder ka-
pazitive Sensoren als sensorischen Teil des Sensorsystems (1).
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, gekennzeichnet durch Ermitteln des geraster-
25 ten Volumendatensatzes bezüglich einer Lamb-Wellen-, Biege-Wellen- und/oder
Rayleigh-Wellenausbreitung.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch
Ermitteln des gerasterten Volumendatensatzes durch rasterförmiges Scannen
30 zumindest eines Teilbereiches des Bauteils (4) derart, dass an jedem Rasterpunkt

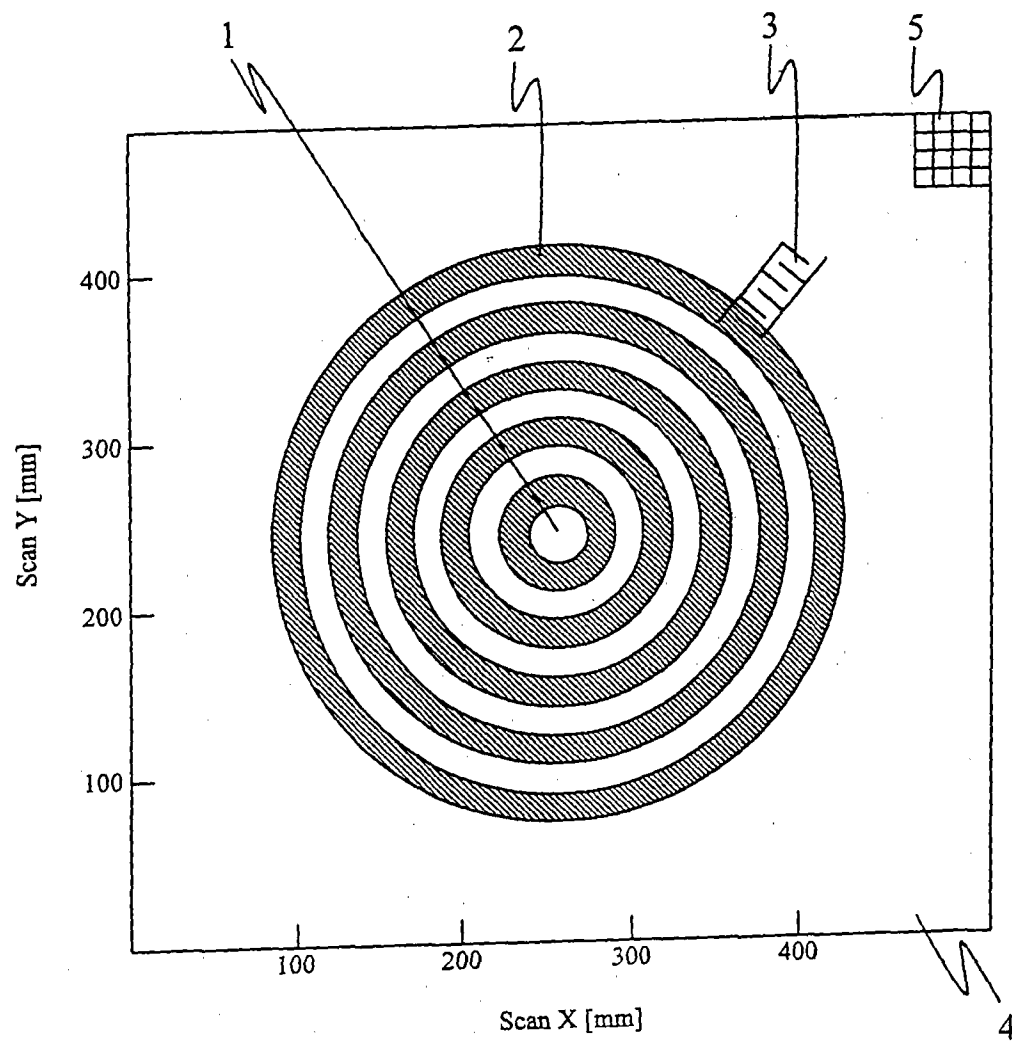
(5) ein Wellenausbreitungssignal erfasst und in dem gerasterten Volumendatensatz hinterlegt wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, gekennzeichnet durch rasterförmiges Scannen derart, dass an jedem Rasterpunkt (5) eine Wellenausbreitung (2) generiert wird.
6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, gekennzeichnet durch Berechnen des Empfangssignals in Abhängigkeit der an den Rasterpunkten hinterlegten Wellenausbreitungssignale, die von der Sensorposition umfasst werden.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch Berechnen des Empfangssignals weiterhin in Abhängigkeit einer Sensorform, insbesondere einer runden, rechteckigen, kammartigen und/oder arrayartigen Sensorform.
8. Verfahren nach Anspruch 7, gekennzeichnet durch Berechnen des Empfangssignals in Abhängigkeit der an den Rasterpunkten hinterlegten Wellenausbreitungssignale, die von der Sensorform an der Sensorposition abgedeckt werden.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch Berechnen des Empfangssignals in Abhängigkeit von aus den jeweiligen Sensorteilen eines Sensorarray berechneten Empfangssignalen.
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch Berechnen des Empfangssignals weiterhin in Abhängigkeit einer Sensorart, insbesondere einer Sensorart in Bezug auf die Ankopplung.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch Berechnen des Empfangssignals aus den Wellenausbreitungssignalen durch Summation der Wellenausbreitungssignale, Mittelwertbildung, Interpolation,

Anpassung des Frequenzgangs und/oder Wellenlängen- und Frequenzfilterung.

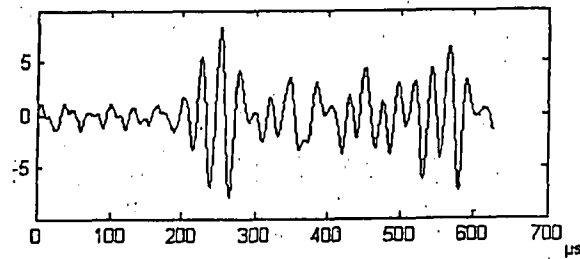
12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch
Optimieren des Sensorsystems (1) hinsichtlich Position, Anzahl, Abstand
5 und/oder Form der Sensoren in Abhängigkeit der berechneten Empfangssignale
an den Sensorpositionen (3).
13. Computerprogrammprodukt mit Programmcodemitteln zur Durchführung des
Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wenn das Computerpro-
10 gramm auf einem Rechner ausgeführt wird.
14. Vorrichtung mit Mitteln zum Hinterlegen mindestens eines gerasterten Volu-
mendatensatzes und mit Eingabemitteln zur Bestimmung einer Sensorposition,
wobei die Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der An-
15 sprüche 1 bis 12 eingerichtet ist.

1/2

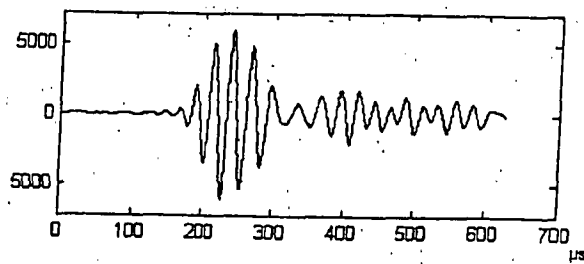


Figur 1

2/2



Figur 2



Figur 3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2010/002657

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

INV. G01N29/04
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01N

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	MALLET L ET AL: "Structural health monitoring using scanning laser vibrometry: II. Lamb waves for damage detection" SMART MATERIALS AND STRUCTURES, IOP PUBLISHING LTD., BRISTOL, GB LNKD-DOI:10.1088/0964-1726/13/2/003, vol. 13, no. 2, 2 April 2004 (2004-04-02), pages 261-269, XP002413153 ISSN: 0964-1726 paragraph [4.3.] paragraph [5.1.] figures 2, 10a, 11 ----- -/--	1-14



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

4 October 2010

Date of mailing of the international search report

14/10/2010

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Baranski, Jörg

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2010/002657

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	LEONG W H ET AL: "Structural health monitoring using scanning laser vibrometry: III. Lamb waves for fatigue crack detection; Structural health monitoring using scanning laser vibrometry: III. Lamb waves for fatigue crack detection" SMART MATERIALS AND STRUCTURES, IOP PUBLISHING LTD., BRISTOL, GB LNKD-DOI:10.1088/0964-1726/14/6/031, vol. 14, no. 6, 1 December 2005 (2005-12-01), pages 1387-1395, XP020091997 ISSN: 0964-1726 paragraph [3.3.] paragraph [4.1.] figures 5, 9	1-14
X	LEE B C ET AL: "Sensor location studies for damage detection with Lamb waves" SMART MATERIALS AND STRUCTURES, IOP PUBLISHING LTD., BRISTOL, GB LNKD-DOI:10.1088/0964-1726/16/2/019, vol. 16, no. 2, 1 April 2007 (2007-04-01), pages 399-408, XP020120414 ISSN: 0964-1726 paragraph [3.2.] paragraph [3.3.]; figures 4, 11	1-14
A	LEE B C ET AL: "Numerical modelling and simulations for optimal sensor location in damage detection with Lamb waves" PROCEEDINGS OF SPIE - THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING - MODELING, SIGNAL PROCESSING, AND CONTROL FOR SMART STRUCTURES 2007 2007 SPIE US, vol. 6523, 2007, XP002601820 DOI: DOI:10.1117/12.715647 the whole document	1-14
A	STASZEWSKI W J ET AL: "Overview of optimal sensor location methods for damage detection" PROCEEDINGS OF THE SPIE - THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING SPIE-INT. SOC. OPT. ENG USA, vol. 4326, 2001, pages 179-187, XP002601821 ISSN: 0277-786X the whole document	1-14

-/--

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2010/002657

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	MUJICA ET AL: "Multivariate statistics process control for dimensionality reduction in structural assessment" MECHANICAL SYSTEMS AND SIGNAL PROCESSING, LONDON, GB LNKD- DOI:10.1016/J.YMSSP.2007.05.001, vol. 22, no. 1, 30 October 2007 (2007-10-30), pages 155-171, XP022321705 ISSN: 0888-3270 the whole document -----	1-14

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2010/002657

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES

INV. G01N29/04

ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierte Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)

G01N

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EP0-Internal

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	MALLET L ET AL: "Structural health monitoring using scanning laser vibrometry: II. Lamb waves for damage detection" SMART MATERIALS AND STRUCTURES, IOP PUBLISHING LTD., BRISTOL, GB LNKD-DOI:10.1088/0964-1726/13/2/003, Bd. 13, Nr. 2, 2. April 2004 (2004-04-02), Seiten 261-269, XP002413153 ISSN: 0964-1726 Absatz [4.3.] Absatz [5.1.] Abbildungen 2, 10a, 11 ----- -/--	1-14



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

4. Oktober 2010

Absenddatum des internationalen Recherchenberichts

14/10/2010

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde

Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Baranski, Jörg

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2010/002657

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	LEONG W H ET AL: "Structural health monitoring using scanning laser vibrometry: III. Lamb waves for fatigue crack detection; Structural health monitoring using scanning laser vibrometry: III. Lamb waves for fatigue crack detection" SMART MATERIALS AND STRUCTURES, IOP PUBLISHING LTD., BRISTOL, GB LNKD-DOI:10.1088/0964-1726/14/6/031, Bd. 14, Nr. 6, 1. Dezember 2005 (2005-12-01), Seiten 1387-1395, XP020091997 ISSN: 0964-1726 Absatz [3.3.] Absatz [4.1.] Abbildungen 5, 9 -----	1-14
X	LEE B C ET AL: "Sensor location studies for damage detection with Lamb waves" SMART MATERIALS AND STRUCTURES, IOP PUBLISHING LTD., BRISTOL, GB LNKD-DOI:10.1088/0964-1726/16/2/019, Bd. 16, Nr. 2, 1. April 2007 (2007-04-01), Seiten 399-408, XP020120414 ISSN: 0964-1726 Absatz [3.2.] Absatz [3.3.]; Abbildungen 4, 11 -----	1-14
A	LEE B C ET AL: "Numerical modelling and simulations for optimal sensor location in damage detection with Lamb waves" PROCEEDINGS OF SPIE - THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING - MODELING, SIGNAL PROCESSING, AND CONTROL FOR SMART STRUCTURES 2007 2007 SPIE US, Bd. 6523, 2007, XP002601820 DOI: DOI:10.1117/12.715647 das ganze Dokument -----	1-14
A	STASZEWSKI W J ET AL: "Overview of optimal sensor location methods for damage detection" PROCEEDINGS OF THE SPIE - THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING SPIE-INT. SOC. OPT. ENG USA, Bd. 4326, 2001, Seiten 179-187, XP002601821 ISSN: 0277-786X das ganze Dokument ----- -/--	1-14

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2010/002657

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	MUJICA ET AL: "Multivariate statistics process control for dimensionality reduction in structural assessment" MECHANICAL SYSTEMS AND SIGNAL PROCESSING, LONDON, GB LNKD- DOI:10.1016/J.YMSSP.2007.05.001, Bd. 22, Nr. 1, 30. Oktober 2007 (2007-10-30), Seiten 155-171, XP022321705 ISSN: 0888-3270 das ganze Dokument -----	1-14