



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 699 20 246 T2 2005.02.03**

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 121 567 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **699 20 246.9**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US99/24640**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **99 973 977.4**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 01/011311**

(86) PCT-Anmeldetag: **21.10.1999**

(87) Veröffentlichungstag

der PCT-Anmeldung: **15.02.2001**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **08.08.2001**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **15.09.2004**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **03.02.2005**

(51) Int Cl.7: **G01B 11/16**
G01L 1/24

(30) Unionspriorität:

370519 06.08.1999 US

(73) Patentinhaber:

University of Florida, Gainesville, Fla., US

(74) Vertreter:

Barz, P., Dipl.-Chem. Dr.rer.nat., Pat.-Anw., 80803 München

(84) Benannte Vertragsstaaten:

AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LI, LU, MC, NL, PT, SE

(72) Erfinder:

IFJU, Peter, Alachua, US; SCHANZE, S., Kirk, Gainesville, US; WANG, Yingsheng, Gainesville, US; HUBNER, James, Gainesville, US; JENKINS, David, Gainesville, US; EL-RATAL, Wissam, Sterling Heights, US; BRENNAN, B., Anthony, Gainesville, US; HE, Liu, Gainesville, US; SHEN, Yibing, Gainesville, US; CARROLL, Bruce, Newberry, US

(54) Bezeichnung: **LUMINESZENTER REISSLACK IN DER DEHNUNGSANALYSE**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

Hintergrund der Erfindung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft das Gebiet der Spannungsmessungen. Beispiele für Anwendungen, die aus der vorliegenden Technologie Nutzen ziehen können, umfassen die verfahrenstechnische Analyse von Spannung auf komplexen Geometrien, die Konstruktionsanalyse und die zerstörungsfreie Prüfung von Strukturen. Demgemäß kann die vorliegende Erfindung bei Automobil-, Luftfahrt-, Tiefbaustrukturen und auf den Gebieten der Sportartikel sowie vielen anderen verwendet werden. Spezielle Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung betreffen einen spannungsempfindlichen Überzug, ein Spannungsfeld-Kartierungssystem und ein Verfahren zur Durchführung einer Spannungsanalyse. Das Verfahren und die Vorrichtung der vorliegenden Erfindung sind besonders auf dem Gebiet der Ganzfeld-Spannungsanalyse nützlich.

[0002] Auf dem Gebiet der Strukturanalyse kann die Möglichkeit, die Spannungen, die Strukturkörper erfährt, eine wichtige Rückmeldung beim Entwurf und der Konstruktion derartiger Strukturkörper liefern. Typisch stellt die Oberflächenspannung des Strukturelements eine Information über die Spannungen bereit, welche der Körper erfährt. Diese Information führt zu der Identifikation von Spannungskonzentrationen, überspannten Bereichen und einer allgemeinen Spannungskartierung für den Entwurf und den Vergleich mit voraussagenden Verfahren. Derzeit gibt es eine Anzahl von Verfahren zum Messen einer derartigen Oberflächenspannung, einschließlich Punkt- und Ganzfeld-Verfahren.

[0003] Die Punktverfahren schließen Verfahren mit elektrischen Widerstands-Dehnungsmessgeräten und Verfahren unter Verwendung elektrooptischer Messfühler und optische Verfahren ein. Diese Verfahren erfordern typisch die Befestigung einer Mehrzahl von Messfühlern an mehreren Orten eines Strukturkörpers oder die schrittweise Anordnung des Messfühlers über den Strukturkörper hinweg ein, so dass, wenn die Struktur einer Spannung ausgesetzt ist, jeder Messfühler oder Schritt die Oberflächenspannung an einem Punkt anzeigt. Um die Spannung über einem gesamten Körper zu bestimmen, sind zahlreiche Messfühler erforderlich, die an kritisch unter Spannung stehenden Punkten auf der Oberfläche angeordnet sind, oder es sind zahlreiche Schritte für bewegliche Messfühler erforderlich. Demgemäß können die Punktverfahren mühsam sein, was es schwierig macht, die Spannungen über der gesamten Oberfläche einer Struktur zu bestimmen.

[0004] Es sind eine Anzahl von Oberflächenmesstechniken entwickelt worden, um die Beschränkungen der Punktverfahren zu überwinden, einschließ-

lich spröder Überzüge, photoelastischer Überzüge, Moiré-Verfahren, interferometrischer Verfahren und digitaler Bildkorrelationsverfahren. Jedes dieser Verfahren kann für gewisse Anwendungen nützlich sein, weist aber Merkmale auf, welche ihre Nützlichkeit beschränken. Spröde Überzüge stellen typisch eine gute qualitative Information über die Hauptspannungsrichtungen auf Objekten bereit. Einige Beschränkungen von spröden Überzügen bestehen darin, dass das Teil nur in einer einzigen Belastungskonfiguration getestet werden kann, sie nur eine beschränkte quantitative Information bereitstellen und dass keine Verfahren zur automatisierten Datensammlung existieren. Photoelastische Überzüge liefern nur Information über die Scherspannung und Hauptspannungsrichtung auf Objekten und sind typisch mühsam auf große Körper anzuwenden, da das Beschichtungsverfahren zeitaufwändig ist. Moiré-Verfahren sind typisch auf flache Objekte beschränkt und werden nicht bei komplexen Geometrien verwendet. Interferometrische Verfahren, wie eine holographische Interferometrie, elektrische Fleckmuster-Interferometrie und Scherographie, erfordern eine ausgeklügelte Vibrationsisolierung, was ihre Anwendbarkeit in großem Maß verringert. Digitalen Bildkorrelationsverfahren mangelt die Empfindlichkeit, die erforderlich ist, um Teile im linearen Materialbereich zu testen.

[0005] Die US-A-5 817 945 offenbart einen lumineszierenden spannungsempfindlichen Überzug.

[0006] Demgemäß gibt es immer noch ein Bedarf an einem Verfahren und System, das leicht und genau eine Ganzfeld-Spannung auf komplexen geformten Strukturen messen kann. Noch vorteilhafter wäre ein Verfahren und ein System, das dynamische Echtzeit-Spannungsmessungen, selbst bei geringen Spannungsniveaus, liefern kann.

Kurze Zusammenfassung der Erfindung

[0007] Die vorliegende Erfindung ist durch die unabhängigen Ansprüche 1, 28, 41 gegeben. In einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung schließt das System einen lumineszierenden spannungsempfindlichen Überzug und ein Spannungsfeld-Kartierungssystem ein, das verwendet werden kann, um eine Spannungskarte der mechanischen Spannung auf einem Substratmaterial zu schaffen.

[0008] Der lumineszierende spannungsempfindliche Überzug der vorliegenden Erfindung verwendet vorzugsweise einen Überzug mit einem Bindemittel auf Polymer-Basis. Der vorliegende Überzug kann eine oder mehrere lumineszierende Verbindungen enthalten. Diese lumineszierenden Verbindungen können Licht aus einer Beleuchtungsquelle absorbieren und dann Licht emittieren, so dass das Licht, das

von diesen lumineszierenden Verbindungen emittiert wird, von dem Überzug ausstrahlen und nachgewiesen werden kann. In einer speziellen Ausführungsform können dem Bindemittel ein oder mehrere lumineszierender) Farbstoffe) einverleibt oder zugesetzt werden. In einer bevorzugten Ausführungsform emittiert der lumineszierende Farbstoff in dem Überzug Licht über eine Bande von Wellenlängen, deren Zentrum von der Wellenlängenbande der Beleuchtung, die verwendet wird, um den Farbstoff anzuregen, verschieden ist. In einer speziellen Ausführungsform ist das emittierte Licht bezüglich des Beleuchtungslichts rot verschoben.

[0009] Der vorliegende Überzug kann mit einem oder mehreren einer Vielfalt von Verfahren auf ein Substratmaterial aufgebracht werden. Derartige Verfahren umfassen, ohne jedoch darauf beschränkt zu sein, eine elektrostatische Abscheidung, eine chemische Dampfabscheidung, ein Anstreichen, eine Schleuderbeschichtung und eine Tauchbeschichtung. Vorzugsweise kann der Überzug so formuliert werden, dass er unter Verwendung einer Aerosoltechnologie aufgebracht werden kann, um einen Dünnschicht auf einem Substratmaterial, wie Metall, Polymer, Keramik oder Verbundstoff, zu erzeugen. Nachdem der vorliegende Überzug auf den Strukturkörper aufgebracht worden ist, kann er ein Härungsverfahren eingehen. Dieses Härungsverfahren kann beispielsweise die Einwirkung verschiedener Umgebungsbedingungen über eine Vielfalt von Zeitdauern einschließen.

[0010] In einer bevorzugten Ausführungsform kann während des Härungsverfahrens ein Rissmuster eines trockenen Seebetts in dem Überzug erzeugt werden. Wenn das Substratmaterial anschließend einer Spannung ausgesetzt wird, ändert sich die Rissmorphologie (z. B. Rissöffnung, Risstiefe, Rissdichte, Risslänge und/oder Rissorientierung) als Ergebnis der Spannung im Substrat. Demgemäß kann die Änderung der Rissmorphologie verwendet werden, um beispielsweise durch Untersuchung der Änderungen einer oder mehrerer der charakteristischen Eigenschaften des Lichts, das von dem Überzug ausstrahlt, die Spannung in dem darunter liegenden Material zu untersuchen. Als Beispiel kann diese Rissmorphologieänderung die Gesamtintensität des von dem Überzug emittierten Lichts beeinflussen. In einer speziellen Ausführungsform ist die Intensität des von dem Überzug emittierten Lichts eine Funktion des Spannungszustands des darunter liegenden Materials. In einem Ganzfeld-Sinn kann die emittierte Intensität verwendet werden, um eine Spannungsinformation auf der Oberfläche von Strukturkörpern und komplexen Teilen zu kartieren.

[0011] In einer weiteren Ausführungsform kann der Überzug so formuliert und gehärtet werden, dass er nach dem Härungsverfahren im wesentlichen rissfrei

ist. In dieser Ausführungsform können Risse während der Beaufschlagung mit mechanischer Spannung erzeugt werden. Die Dichte von Rissen sowie andere Aspekte der Rissmorphologie können sich als Ergebnis der Spannung in dem Substrat ändern. Wiederum kann die Änderung der Rissmorphologie verwendet werden, um beispielsweise durch Messen der Änderungen eines oder mehrerer charakteristische Merkmale des von dem Überzug ausstrahlenden Lichts die Spannung in dem Substrat zu untersuchen. Beispielsweise kann, wenn die Zahl der Risse zunimmt, die Intensität des von dem Überzug emittierten Lichts ebenfalls zunehmen. Zusätzlich kann die Intensität des emittierten Lichts auch eine Funktion der Rissmorphologie sein, wie vorstehend beschrieben. Die Morphologie des Rissmusters kann sich dann als Ergebnis von sich ändernder Spannung in dem darunter liegenden Material ändern. Demgemäß kann die Intensität des emittierten Lichts des Überzugs mit der Spannung in dem darunter liegenden Substratmaterial korreliert werden. Der Spannungszustand kann so auf der Oberfläche des Substratmaterials kartiert werden.

[0012] Die vorliegende Erfindung betrifft auch ein Spannungsfeld-Kartierungssystem zur Erzeugung einer Karte des mechanischen Spannungsfelds auf einem darunter liegenden Substrat. Änderungen der Lumineszenzcharakteristika, wie der Intensität aufgrund des Spannungsfeldes, können durch eine Vielfalt von Techniken abgebildet werden. In einer speziellen Ausführungsform kann die räumliche Auflösung der Abbildungsausrüstung so eingestellt werden, dass einzelne Risse in dem Überzug in dem Bild nicht beobachtet werden, sondern vielmehr eine durchschnittliche Intensität, die mit Spannung in Beziehung steht, über einem Bereich beobachtet wird. Das Verfahren der vorliegenden Erfindung kann dann ein Bild der Lumineszenzintensitätsverteilung, die von einem Substratmaterial ausstrahlt, einfangen und es in eine Karte des mechanischen Spannungsfelds auf dem darunter liegenden Substratmaterial überführen.

[0013] In einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung kann, nachdem das darunter liegende Substratmaterial mit dem spannungsempfindlichen Überzug beschichtet worden ist, der spannungsempfindliche Überzug durch eine oder mehrere einer Vielfalt von Beleuchtungsquellen beleuchtet werden, so dass die einverleibte(n) lumineszierende(n) Verbindung(en) ein Wellenlängenverschobenes Licht emittieren. In einer speziellen Ausführungsform kann der vorliegende spannungsempfindliche Überzug mit nahem UV- oder blauem Licht beleuchtet werden, so dass der lumineszierende Farbstoff in dem Überzug rot verschobenes Licht emittiert. Ein Bild der Lumineszenzintensität des nicht unter Spannung stehenden Substrats kann dann aufgezeichnet werden. Das Substrat kann dann einer mechanischen Spannung ausgesetzt werden, und zusätzli-

che Bilder können aufgezeichnet werden. In einer speziellen Ausführungsform können die Änderungen der Lumineszenzintensität durch Analyse der Bilder des nicht unter Spannung stehenden und unter Spannung stehenden Substrats entziffert werden, was eine Ausgabekarte der mechanischen Spannung auf dem Substrat zum Ergebnis hat.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0014] Fig. 1 zeigt ein System zum Kalibrieren einer optischen Spannungsantwort von spannungsempfindlichen Überzügen gemäß der vorliegenden Erfindung.

[0015] Die Fig. 2A und 2B zeigen die Beziehung zwischen mechanischer Spannungsbeaufschlagung gegen die Zeit (Fig. 2B) und die Änderung der prozentualen Lumineszenzemissionsintensität eines spannungsempfindlichen Überzugs gegen die Zeit (Fig. 2A), die gleichzeitig unter Verwendung von Signalmittelung und des in Fig. 1 gezeigten Systems aufgezeichnet wurde.

[0016] Fig. 3 zeigt ein System, das verwendet werden kann, um eine Spannungskarte eines mit einem spannungsempfindlichen Überzug beschichteten Objekts zu erzeugen.

[0017] Fig. 4 zeigt eine Auftragung des Intensitätsverhältnisses von Lumineszenzlicht, das von einem Überzug ausstrahlt, gegen die Summe der Hauptspannungen eines zylindrischen Prüflings, der in Zugspannung und/oder Verdrehung belastet ist.

[0018] Fig. 5 zeigt die Ergebnisse einer typischen Kalibrierung für Prüflinge mit axialer Spannung, wobei die Beziehung zwischen der axialen Spannung und der Änderung des Prozentsatzes an emittierter Lichtintensität angegeben ist.

[0019] Fig. 6 zeigt eine Ansicht eines Vierpunkte-Biegetests einer Automobilachse mit Spannungskarten, die aus der vorliegenden Erfindung erhalten wurden, und Finite-Elemente-Spannungskarten.

Detaillierte Beschreibung der Erfindung

[0020] Die vorliegende Erfindung betrifft einen spannungsempfindlichen Überzug, ein Spannungsmesssystem und ein Verfahren zur Bestimmung mechanischer Spannungen auf Substratmaterialien. In einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung schließt das System einen lumineszierenden spannungsempfindlichen Überzug und ein Spannungsfeld-Kartierungssystem ein, um eine Spannungskarte der mechanischen Spannung auf einem Substratmaterial zu schaffen. Die vorliegenden Überzüge können aus irgendeiner Zahl von polymeren oder nicht-polymeren Materialien, wie Po-

ly(methylmethacrylat), Poly(imid), Poly(ester), Polyamin, Poly(melaminen), Poly(urethanen), Melaminformaldehyd-Harzen, Keramiken und Gläsern zusammengesetzt sein. Diese Überzüge können auf eine Vielfalt von Substraten, wie Metalle, organische Polymere, Keramiken und Verbundstoffe, aufgebracht werden.

[0021] Der vorliegende Überzug kann ein oder mehrere Bindemittelmaterialien sowie ein oder mehrere lumineszierende Materialien enthalten. In einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist der lumineszierende spannungsempfindliche Überzug ein Überzug auf Polymer-Basis, der eine oder mehrere lumineszierende Verbindungen enthält. Beispiele für lumineszierende Verbindungen, die mit dem vorliegenden Überzug verwendet werden können, umfassen konjugierte organische Farbstoffe, wie Rhodamin B, Poly(phenylvinyl)en und Cyanine. Zum Beispiel können ein oder mehrere lumineszierende(r) Farbstoff(e) in dem Polymer, das zur Herstellung des Überzugs verwendet wird, dispergiert und/oder gelöst werden. Wenn diese lumineszierenden Farbstoffe mit einer Lichtquelle einer ersten Wellenlänge beleuchtet werden, kann das Farbstoffmolekül Licht aus der Beleuchtungsquelle absorbieren und dann Licht bei einer verschiedenen Wellenlänge emittieren. In einer speziellen Ausführungsform emittiert bzw. emittieren der oder die einverleibte(n) lumineszierende(n) Farbstoff(e) rot verschobenes Licht, wenn sie mit einer nahen UV- oder blauen Lichtquelle beleuchtet werden.

[0022] In einer speziellen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung kann der lumineszierende spannungsempfindliche Überzug hergestellt werden, indem man 0,405 g ERL 4206-Epoxyharz, 0,010 g Epon 826-Epoxyharz, 0,540 g HY 918-Härter, 0,006 g 4-(Dimethylamino)pyridin und 0,003 g Perylen in einem Testrohr mischt. Man kann die Mischung etwa 3 Stunden stehen lassen und sie dann beispielsweise unter Verwendung einer Luftbürste auf ein Substrat auftragen. Nach dem Auftragen kann der Überzug dann 12 Stunden bei 50°C gehärtet werden.

[0023] In einer weiteren speziellen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung werden 0,3 g lumineszierende Rhodamin B-Verbindung in einem Bindemittel dispergiert, das aus einer Lösung von 100 g Melaminformaldehyd-Harz, 4,0 g p-Toluolsulfonamid, 0,7 g Ammoniumchlorid, 150 ml Wasser und 150 ml Ethanol hergestellt wurde. Vorzugsweise sollten etwa 3 bis 7 g p-Toluolsulfonamid als Weichmacher und etwa 0,5 bis 2 g Ammoniumchlorid-Katalysator zu etwa 100 g Harz gegeben werden, um zu ermöglichen, dass der Überzug schnell härtet, ohne zu spröde zu werden. Das Verhältnis von Wasser zu Ethanol liegt bevorzugt zwischen 7 : 3 und 3 : 7 und beträgt bevorzugt etwa 1 : 1. Die Mischung kann auf eine sandgestrahlte Strukturkomponente unter Verwen-

dung einer Farbsprühvorrichtung in einer Anstrichkabine aufgetragen werden. Das Teil kann dann bei einer relativen Feuchtigkeit von etwa 10–20% über etwa 17 Stunden bei 43°C gehärtet werden, was ein statistisches Rissmuster eines trockenen Seebetts zur Folge hat.

[0024] In einer weiteren speziellen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung werden 0,3 g Rhodamin B in einem Bindemittel dispergiert, das aus einer Lösung von 100 g Melaminformaldehyd-Harz, 4,0 g p-Toluolsulfonamid, 0,7 g Ammoniumchlorid, 150 ml Wasser und 150 ml Ethanol hergestellt worden ist. Die Mischung kann unter Verwendung einer Luftbürste auf eine sandgestrahlte Strukturkomponente aufgetragen werden. Die Komponente kann dann bei einer relativen Feuchtigkeit von etwa 10–20% unter Verwendung eines Temperaturprogramms wie folgt: etwa 42°C über 10 Stunden, wobei die Temperatur über eine Zeitspanne von etwa 2 Stunden allmählich von etwa 42°C auf etwa 25°C erniedrigt wird, gehärtet werden. Der im Wesentlichen rissfreie Überzug, der das Ergebnis ist, kann ein durchscheinendes Aussehen aufweisen.

[0025] Beispiele für andere Materialien, die verwendet werden können, um einen spannungsempfindlichen Überzug gemäß der vorliegenden Erfindung zu erzeugen, umfassen: Poly(methylmethacrylat-co-butylmethacrylat), Poly(melaminformaldehyd), Polyurethan und hybrides organisch-anorganisches Sol-Gel. Beispiele für lumineszierende Farbstoffe, die gemäß der vorliegenden Erfindung verwendet werden können, umfassen: 1,5,15,20-Tetraphenylporphyrinzink(II), trans-4-[4-(Dimethylamino)styryl]-1-methylpyridiniumiodid, trans,trans-1,4-[Bis-3,4,5-(trimethoxystyryl)]benzol und Tris(4,7-diphenyl-1,10-phenanthrolin)ruthenium(II)-dichlorid.

[0026] Die Präparierung der Substratmaterialoberfläche vor dem Auftragen des vorliegenden Überzugs kann das Verhalten des Überzugs verbessern. Insbesondere nimmt man an, dass ein Aufrauen der Oberfläche des Substratmaterials die Bildung von Keimstellen in dem gehärteten Überzug unterstützen kann. Diese Keimstellen tragen dazu bei, Risse in dem härtenden und/oder gehärteten Überzug zu erzeugen. Auch verbessert ein Aufrauen der Substratoberfläche die Haftung des Überzugs auf der Oberfläche. Zusätzlich kann ein Aufrauen der Oberfläche bewirken, dass der Überzug Licht auf im Wesentlichen Winkel-unabhängige Weise ausstrahlt. Ein derartiges Aufrauen kann mittels einer Vielfalt von Mechanismen bewerkstelligt werden, einschließlich Sandstrahlens, Bearbeitens mit Schleifpapier und chemischen Ätzens. Indem kleinere Risse gefördert werden, kann eine Aufrauung auch Anlass zu reproduzierbaren gleichförmigen Rissdichten mit beispielsweise etwa 10 Risse/mm geben. Ein chemisches Entfettungslösungsmittel kann ebenfalls vor dem

Aufbringen des Überzugs auf die Oberfläche des Substrats verwendet werden.

[0027] Der vorliegende Überzug kann beispielsweise durch Zerstäubungstechniken, wie Aerosoltechniken, elektrostatische Abscheidung und chemische Dampfabcheidung, und/oder durch Nicht-Zerstäubungstechniken, wie Anstreichen, Schleuderbeschichtung und Tauchbeschichtung, auf ein Substrat aufgetragen werden. Vorzugsweise beträgt die Überzugsdicke etwa 60–120 Mikrometer und bevorzugter etwa 80–100 Mikrometer, um die Empfindlichkeit der Messungen zu optimieren. Wenn eine Aerosolauftragung verwendet wird, können mehrere Durchgänge erforderlich sein, um eine geeignete Dicke aufzutragen, wobei jeder Durchgang etwa 7–10 Mikrometer Überzug aufträgt.

[0028] Nachdem der Überzug auf den Strukturkörper aufgetragen worden ist und geeignete Härtungsverfahren durchgeführt worden sind, kann das Bindemittel vor der Beaufschlagung des Substratmaterials mit mechanischer Spannung eine voreingeleitete Reihe von Rissen oder eine im Wesentlichen rissfreie Oberfläche aufweisen. Die Rissmustermorphologie ändert sich als Funktion von mechanischer Spannung auf der Oberfläche des Substratmaterials. Die Rissmorphologie kann die Rissdichte, Rissöffnung, Risstiefe, Rissbreite, Rissoberflächenstruktur, Rissorientierung und/oder Risslänge einschließen. Mit Bezug auf die Änderungen, die als Funktion einer auferlegten Last auftreten können, können eine oder mehrere Rissmorphologieänderungen stattfinden.

[0029] Wenn der vorliegende Überzug aufgebracht und gehärtet worden ist, kann der Überzug durch eine Anregungsquelle beleuchtet werden. In einer speziellen Ausführungsform können ein oder mehrere Farbstoffe in dem Überzug Anregungsbeleuchtung absorbieren und Licht reemittieren, das bei einer anderen Wellenlänge als die der Anregungsbeleuchtung vorliegt. Die Anregungsquelle kann beispielsweise kontinuierliches oder kurz andauerndes, kohärentes oder nicht-kohärentes, polarisiertes oder unpolarisiertes, gefiltertes oder ungefiltertes Licht einschließen.

[0030] Änderungen der Spannung auf dem Substrat können Überzugs-Rissmorphologieänderungen bewirken, die eine oder mehrere einer Vielfalt von charakteristischen Merkmalen des Lichts beeinflussen können, welches von dem lumineszierenden Überzug ausstrahlt, einschließlich des Polarisationszustandes, der Intensität, der Spektrallage, der Bandenform und der Emissionsabklingzeit. Durch Kalibrieren der Beziehung zwischen der Spannung in dem Substrat und einem oder mehreren charakteristischen Merkmalen des von dem Überzug ausstrahlenden Lichts kann der Überzug zu quantitativen Messungen der Spannung im Substratmaterial ver-

wendet werden.

[0031] Änderungen des Spannungsfelds des Substratmaterials können Änderungen der Überzugs-Rissmorphologie erzeugen, welche direkt den Anteil des Lumineszenzlichts beeinflussen, der von dem Überzug ausstrahlt. Als Ergebnis steht die Lumineszenzintensität von Licht, das von dem Überzug ausstrahlt, mit der mechanischen Spannung auf dem darunter liegenden Substratmaterial in Beziehung. In einer speziellen Ausführungsform kann die Lumineszenzintensität, die von dem vorliegenden Überzug emittiert wird, zunehmen, wenn die Struktur einer mechanischen Spannung ausgesetzt wird. Beispielsweise kann die sichtbare Lumineszenzintensität etwa linear proportional zur mechanischen Spannung auf der darunter liegenden Oberfläche sein. Dem gemäß kann die Lumineszenzintensitätsverteilung verwendet werden, um eine Karte des mechanischen Spannungsfelds auf dem darunter liegenden Substrat zu erzeugen.

[0032] Die Zunahme der Lumineszenzintensität, die als Ergebnis von Überzugs-Rissmorphologieänderungen von dem Überzug emittiert wird, beruht zumindest teilweise auf den Rissen, welche ermöglichen, dass Licht, das von den lumineszierenden Verbindungen innerhalb des Überzugs emittiert wird, aus der Überzugsoberfläche entweicht. Im Allgemeinen wird ein Teil des Lumineszenzlichts, das von den lumineszierenden Verbindungen, zum Beispiel einem oder mehreren Farbstoff(en), emittiert wird, an der Polymer/Luft-Grenzfläche zurück in den Überzug reflektiert, da es intern reflektiert wird. Risse in dem Überzug können einen Teil dieser inneren Reflexion unterbrechen und das Lumineszenzlicht umlenken und/oder streuen, so dass das Lumineszenzlicht entweichen und so von dem Film ausstrahlen kann. Die Risse können auch die Menge an Anregungsbeleuchtung, die in den Überzug eintritt, die Absorption der Anregungsbeleuchtung und/oder die Stelle einer derartigen Absorption beeinflussen.

[0033] In einer speziellen Ausführungsform kann die Beziehung zwischen der Lumineszenzintensität, die von dem vorliegenden Überzug ausstrahlt, und der Spannung auf dem Substratmaterial Information bezüglich der Addition der zwei in derselben Ebene liegenden Hauptspannungen in dem Substratmaterial liefern. Diese Beziehung ist in **Fig. 4** für einen zylindrischen Prüfling veranschaulicht, der in einer Kombination von Zugspannung und Verdrehung getestet wird. Die Trennung der Hauptspannungen kann dann durch eine Vielfalt von Techniken bewerkstelligt werden. Beispielsweise kann ein elektrisches Widerstands-Dehnungsmessgerät verwendet werden, um eine der Hauptspannungen zu bestimmen, was ermöglicht, dass man zu der anderen Hauptspannung gelangt, indem man von der Addition der zwei Hauptspannungen subtrahiert. In einer speziel-

len Ausführungsform kann der vorliegende Überzug photoelastische Eigenschaften aufweisen. Demgemäß können, wie es in der Technik bekannt ist, Polarisatoren und Viertelwellenplatten vor der Beleuchtungsquelle und dem Abbildungssystem angeordnet werden, was Messungen ermöglicht, die Information bezüglich der Subtraktion der zwei in derselben Ebene liegenden Hauptspannungen liefern. Indem man die Information, die bezüglich der Addition der beiden in derselben Ebene liegenden Hauptspannungen und der Subtraktion der beiden in derselben Ebene liegenden Hauptspannungen erhalten wird, kombiniert, können die einzelnen Hauptspannungen ermittelt werden. Vorzugsweise können die einzelnen Hauptspannungen auf einer Ganzfeld-Basis ermittelt werden.

[0034] In einer bevorzugten Ausführungsform schließt die vorliegende Erfindung ein Spannungsfeld-Kartierungssystem zur Erzeugung einer Karte des mechanischen Spannungsfelds ein, dem das darunter liegende Substrat ausgesetzt wird. Beim Empfang von Licht, das von dem vorliegenden Überzug ausstrahlt, kann das vorliegende Messsystem eines oder mehrere einer Vielfalt von charakteristischen Merkmalen des empfangenen Lichts messen, einschließlich des Polarisationszustandes, der Intensität, der Spektrallage, der Bandenform und der Emissionsabklingzeit. Demgemäß können eine oder mehrere Korrelationen zwischen der Spannung auf dem Substrat und den charakteristischen Merkmalen des Lichts, das von dem vorliegenden Überzug ausstrahlt, verwendet werden, um die Spannung auf dem Substrat zu bestimmen, nachdem das Licht, das von dem Überzug ausstrahlt, empfangen worden ist und ein oder mehrere charakteristische Merkmale des Lichts gemessen worden sind. Beispielsweise können Änderungen der Lumineszenzintensität aufgrund der mechanischen Spannung durch eine oder mehrere einer Vielfalt von Verfahren abgebildet werden, einschließlich: 1) visueller Betrachtung; 2) Standfotografie unter Verwendung von Silberhalogenid-Filmtechnologie; 3) analoger Videofotografie; und 4) digitaler Fotografie unter Verwendung einer CCD-Kamera von wissenschaftlicher Güte. Filter oder andere Vorrichtungen (wie Polarisatoren, Viertelwellenplatten und Diffusoren) zur Verbesserung des Bildes können ebenfalls bei dem Abbildungsverfahren verwendet werden. In einem speziellen Beispiel, in dem ein Farbstoff, der rotes Licht emittiert, den vorliegenden Überzügen einverleibt wird, kann ein roter Filter vor der Kamera verwendet werden, um die Anregungsbeleuchtung zurückzuwerfen. In jedem Fall kann die räumliche Auflösung des visuellen Systems so eingestellt werden, dass einzelne Risse in dem Bild nicht beobachtet werden, sondern dass stattdessen eine durchschnittliche Beleuchtungsintensität, die von dem Überzug emittiert wird, über einen Bereich beobachtet wird.

[0035] Ein oder mehrere einer Vielfalt von Verfahren können verwendet werden, um zu kalibrieren, wie ein spezielles Merkmal des Lumineszenzlichts, das von dem Überzug ausstrahlt, bezüglich der Spannung auf dem Substratmaterial variiert. Beispielsweise kann ein Prüfling mit einem Klebeband auf dem Substratmaterial befestigt werden, so dass der Überzug auf dem Prüfling aufgetragen wird, wenn er auf dem Substratmaterial aufgetragen wird, und auf ähnliche Weise ebenfalls gehärtet wird. Der Prüfling kann dann dahingehend getestet werden, wie das Lumineszenzlicht mit der Spannung variiert. Diese Ergebnisse können verwendet werden, um den Überzug auf dem Prüfling und damit den Überzug auf dem Substratmaterial zu kalibrieren. Eine weitere Technik beinhaltet die Anordnung irgendeines Mittels zum Messen von Spannung an einem Punkt auf dem Substrat, wie eines Dehnungsmessstreifens. Der Wert des Dehnungsmessstreifens kann dann mit dem Lumineszenzlicht von dem Überzug in der Nachbarschaft des Dehnungsmessstreifens verglichen werden, um den Überzug zu kalibrieren. Alternativ oder in Verbindung mit anderen Kalibrierungsverfahren kann ein Probenstab auf ähnliche Weise wie das Substratmaterial beschichtet und gehärtet werden und in einem speziellen Kalibrierungsaufbau kalibriert werden.

[0036] In einer weiteren Ausführungsform ist mit Bezug auf **Fig. 1** ein System **1** zum Kalibrieren der optischen Spannungsantwort eines spannungsempfindlichen Überzugs gemäß der vorliegenden Erfindung gezeigt. Das System **1** verwendet einen Aluminium-Prüfling (12 Inch lang \times 0,5 Inch breit \times 0,016 Inch dick (30 cm lang \times 1,3 cm breit \times 0,4 mm dick)), der mit einem spannungsempfindlichen Überzug beschichtet ist und in einer mechanischen Spannungsinduzierungsvorrichtung **3** (Zugbelastung) montiert ist. Die Induzierungsvorrichtung **3** kann eine Mikrospannung bis zu 3000 unter Zug bereitstellen. Der beschichtete Prüfling kann dann mit monochromatischem Licht beleuchtet werden, das beispielsweise aus einer 150 W-Xenonbogenlichtlampe **5** stammt und durch einen 0,25 mm-Monochromator **7** geleitet wird. Die Lumineszenzemissionen aus dem beschichteten Prüfling können unter Verwendung einer integrierenden Kugel **9** zur Abschwächung von Artefakten beispielsweise aufgrund von räumlicher Inhomogenität und/oder Polarisation gesammelt werden. Die Emissionsintensität kann dann durch ein optisches System ermittelt werden, das aus einem Photonenzählenden Photoelektronen-Vervielfacher-Rohr **11** besteht, welches auf einem 0,5 m-Monochromator **13** montiert ist, der über ein Borosilicat-Glasfaserbündel **15** an die integrierende Kugel gekoppelt ist. Ein Computersystem kann gleichzeitig das Spannungsmaß, dem der Prüfling ausgesetzt wird und das beispielsweise mit einem Dehnungsmessstreifen erfasst wird, aufzeichnen und auch die relative Emissionsintensität von dem Überzug aufzeichnen.

[0037] In einer alternativen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung kann die optische Spannungsantwort des spannungsempfindlichen Überzugs durch Testen eines Stahlstab-Prüflings **5**, der 5 Inch lang auf 0,25 Inch dick und 0,75 Inch breit ist, kalibriert werden. Der Stahlstab kann in eine Vierpunkte-Biegespannvorrichtung eingeführt werden. Die obere Oberfläche des Prüflings zwischen den inneren zwei Belastungskontakten steht unter reiner axialer Last. Auf der unteren Oberfläche wird ein elektrisches Widerstands-Dehnungsmessgerät für Kalibrierungszwecke verwendet. Der Prüfling wird auf der oberen Oberfläche mit dem spannungsempfindlichen Überzug beschichtet, und der Prüfling wird in dem oben erwähnten Kalibrierungsaufbau getestet.

[0038] Eine spezielle Ausführungsform eines Systems, das verwendet wird, um eine Spannungskarte eines Gegenstands zu erzeugen, ist schematisch in **Fig. 3** gezeigt. Das gezeigte System enthält eine Vorrichtung **17**, um einen Prüfling, der mit dem vorliegenden Überzug beschichtet ist, unter Spannung zusetzen. Das in **Fig. 3** gezeigte System umfasst auch eine 50 W-Wolframhalogenlampe **19**, ein 400 nm-Interferenzfilter **21**, das zwischen der Lampe und dem Prüfling installiert ist, eine 14-Bit-CCD-Kamera **23**, die einen 600 nm-Interferenzfilter **25** über der Linse installiert aufweist, und ein Tischcomputersystem **27**, das mit einer Bildverbesserungs-Software ausgestattet ist. Bei einem typischen Test wird die Lumineszenzintensität, die von dem Überzug emittiert wird, vor der Beaufschlagung mit mechanischer Spannung mit der Kamera abgebildet, was ein Bild R erzeugt. Der Gegenstand wird dann unter Spannung gesetzt, und ein zweites Bild wird aufgenommen, welches ein Bild S erzeugt. Die Spannungskarte kann dann durch Anwenden des folgenden Algorithmus:

$$[\text{Spannungskarte}] = K \cdot f([\text{Bild S}]/[\text{Bild R}])$$

erzeugt werden, worin [Spannungskarte], [Bild S] und [Bild R] Matrizen sind, die digitale Bilddaten enthalten, $f(v)$ eine Glättungsfunktion ist und K eine Kalibrierungsfunktion ist. In einer speziellen Ausführungsform ist K ungefähr linear.

[0039] Das Folgende sind Beispiele, die Verfahren zur Durchführung der Erfindung erläutern. Diese Beispiele sollten nicht als Beschränkung angesehen werden.

Beispiel 1

[0040] Dieses Beispiel beschreibt einen speziellen spannungsempfindlichen Überzug gemäß der vorliegenden Erfindung. Das verwendete Bindemittel und lumineszierende Material sind Melamin-Formaldehyd-Harz bzw. Rhodamin B. **Fig. 5** zeigt die Ergebnisse der Kalibrierungen bei einer Reihe von Prüflingen, die mit einem derartigen Überzug beschichtet

sind. Die Diagramme zeigen die relative Änderung der Intensität gegen die Mikrospannung bei einem Vierpunkte-Biegeprüfling. Diese graphische Darstellung veranschaulicht, dass die Antwort des Überzugs nahezu linear ohne merkliche Schwelle und mit hoher Wiederholbarkeit ist. Die Überzugsintensität änderte sich um etwa 7% von 0 bis 1900 Mikrospannung.

Beispiel 2

[0041] Dieses Beispiel beschreibt die Durchführung der vorliegenden Erfindung bei einer Struktur mit komplexer Geometrie. Die Durchführung steht in Einklang mit der bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Die Struktur ist eine Automobilachse, die Belastungen ausgesetzt wurde, welche Straßenbelastungsbedingungen simulieren. **Fig. 6** zeigt einen Vergleich einer Finite-Elemente-Analyse (FEA) der Struktur und der Ergebnisse, die unter Verwendung der vorliegenden Erfindung erhalten wurden. Es wurde eine gute Korrelation beobachtet.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Messen einer Spannung auf einem Substratmaterial, welches die Schritte umfasst: Aufbringen eines lumineszierenden Überzugs auf ein Substratmaterial; Härten des Überzugs; Beleuchten des Überzugs mit Anregungsbeleuchtung; und Messen eines charakteristischen Merkmals oder mehrerer charakteristischer Merkmale des Lumineszenzlichts, das von dem Überzug ausstrahlt, um die Spannung auf dem Substratmaterial zu bestimmen, wobei das eine oder die mehreren charakteristische(n) Merkmal(e) des Lumineszenzlichts, das von dem Überzug ausstrahlt, mit der Spannung auf dem Substratmaterial in Beziehung stehen, was zumindest teilweise auf einer Beziehung zwischen dem Ausmaß an Spannung auf dem Substratmaterial und der Morphologie von Rissen in dem Überzug beruht.
2. Verfahren nach Anspruch 1, in dem das eine oder die mehreren charakteristische(n) Merkmal(e) des Lumineszenzlichts, das von dem Überzug ausstrahlt, aus der Gruppe ausgewählt sind, die aus Polarisationszustand, Intensität, Spektrallage, Bandform und Emissionsabklingzeit besteht.
3. Verfahren nach Anspruch 1, in dem die Risse in dem Überzug beim Schritt des Härten des Überzugs geschaffen werden.
4. Verfahren nach Anspruch 1, in dem sich Risse in dem Überzug entwickeln, wenn das Substratmaterial unter Spannung gesetzt wird.
5. Verfahren nach Anspruch 3, weiter umfassend den Schritt des Aufrauens einer Oberfläche des Substratmaterials, auf welches der Überzug aufzubringen ist, vor dem Schritt des Aufbringens des Überzugs.
6. Verfahren nach Anspruch 5, in dem der Schritt des Aufrauens der Oberfläche des Substratmaterials eine oder mehrere Techniken beinhaltet, die aus der Gruppe ausgewählt sind, die aus Sandstrahlen, Schleifen mit Schleifpapier und chemischem Ätzen besteht.
7. Verfahren nach Anspruch 1, in dem der lumineszierende Überzug ein Bindemittel und mindestens eine lumineszierende Verbindung umfasst.
8. Verfahren nach Anspruch 7, in dem die mindestens eine lumineszierende Verbindung mindestens einen lumineszierenden Farbstoff einschließt, wobei der mindestens eine Farbstoff in dem Bindemittel dispergiert ist.
9. Verfahren nach Anspruch 8, in dem mindestens einer des mindestens einen Farbstoffs die Anregungsbeleuchtung einer ersten Wellenlänge absorbiert und Licht einer zweiten Wellenlänge reemittiert.
10. Verfahren nach Anspruch 9, in dem mindestens ein anderer des mindestens einen Farbstoffs eine oder mehrere Störungen kompensiert, die aus der Gruppe ausgewählt sind, die aus Temperaturschwankungen, Beleuchtungsfeldschwankungen, Druckschwankungen und Feuchtigkeitsschwankungen besteht.
11. Verfahren nach Anspruch 1, in dem die Risse die Morphologie ändern, wenn sich die Spannung auf dem Substratmaterial ändert, so dass die Änderung der Rissmorphologie eine Änderung des einen charakteristischen Merkmals oder der mehreren charakteristischen Merkmale des Lumineszenzlichts bewirkt, das von dem Überzug ausstrahlt, wobei das eine oder die mehreren charakteristische(n) Merkmal(e) des Lumineszenzlichts, das von dem Überzug ausstrahlt, mit der Spannung auf dem Substratmaterial in Beziehung stehen, so dass die Spannung auf dem Substratmaterial durch Messen des einen charakteristischen Merkmals oder der mehreren charakteristischen Merkmale des Lumineszenzlichts, das von dem Überzug ausstrahlt, bestimmt werden kann.
12. Verfahren nach Anspruch 11, in dem die Änderung der Rissmorphologie Änderungen bei einem oder mehreren Mitgliedern aus der Gruppe einschließt, die aus Rissgeometrie, Rissbreite, Rissdichte, Rissorientierung, Rissoberflächenstruktur, Risstiefe und Rissöffnung besteht.
13. Verfahren nach Anspruch 11, in dem die Intensität des Lumineszenzlichts, das von dem Überzug ausstrahlt, eine Funktion der Spannung auf dem

Substratmaterial ist.

14. Verfahren nach Anspruch 11, in dem die Intensität des Lumineszenzlichts, das von dem Überzug ausstrahlt, etwa linear mit der Spannung auf dem Substratmaterial in Beziehung steht.

15. Verfahren nach Anspruch 11, weiter umfassend die Schritte: Aufbringen eines Kalibrierungsüberzugs auf ein Kalibrierungssubstrat; Härten des Kalibrierungsüberzugs; Beleuchten des Kalibrierungsüberzugs mit Anregungsbeleuchtung; Beaufschlagen des Kalibrierungssubstrat mit einer Mehrzahl von Kalibrierungsspannungen und Messen des einen charakteristischen Merkmals oder der mehreren charakteristischen Merkmale des Lumineszenzlichts, das von dem Kalibrierungsüberzug ausstrahlt, während das Kalibrierungssubstrat mit jeder der Kalibrierungsspannungen beaufschlagt wird, und Messen jeder der Mehrzahl der Kalibrierungsspannungen mit einer Spannungsmessvorrichtung, wobei die gemessenen Werte des einen charakteristischen Merkmals oder der mehreren charakteristischen Merkmale des Lumineszenzlichts, das von dem Überzug ausstrahlt, wenn das Substrat mit jeder der Kalibrierungsspannungen beaufschlagt wird, verwendet wird, um den Überzug zu kalibrieren.

16. Verfahren nach Anspruch 15, in dem die Kalibrierung des Überzugs eine Kalibrierungsfunktion K für den Überzug zum Ergebnis hat, so dass eine Spannungskarte erzeugt werden kann, indem man den folgenden Algorithmus:

$$[\text{Spannungskarte}] = K * f([\text{Bild S}]/([\text{Bild R}]))$$

anwendet, worin [Spannungskarte], [Bild S] und [Bild R] Matrizen sind, die digitale Bilddaten enthalten, und $f(v)$ eine Glättungsfunktion ist, und wobei [Bild R] auf einem Bild des einen oder der mehreren charakteristischen Merkmale von Licht basiert, das von dem Überzug ausstrahlt, wenn das Substratmaterial nicht unter Spannung steht, und [Bild S] auf einem Bild des einen oder der mehreren charakteristischen Merkmale von Licht basiert, das aus dem Überzug ausstrahlt, wenn das Substrat unter Spannung steht.

17. Verfahren nach Anspruch 1, in dem der Schritt des Aufbringens eines lumineszierenden Überzugs auf ein Substratmaterial die Verwendung einer oder mehrerer Techniken beinhaltet, die aus der Gruppe ausgewählt sind, die aus Aerosoltechnologie, elektrostatischer Abscheidung, chemischer Dampfabcheidung, Anstreichen, Schleuderbeschichtung und Tauchbeschichtung besteht.

18. Verfahren nach Anspruch 1, in dem das Substratmaterial aus der Gruppe ausgewählt ist, die aus Metall, Polymer, Keramik und Verbundstoff besteht.

19. Verfahren nach Anspruch 1, in dem die Anregungsbeleuchtung nahes Ultraviolettlicht bis blaues Licht ist.

20. Verfahren nach Anspruch 19, in dem das Lumineszenzlicht bezüglich der Anregungsbeleuchtung rotverschoben ist.

21. Verfahren nach Anspruch 1, in dem eine Ganzfeld-Spannungskarte des Substratmaterials erzielt wird.

22. Verfahren nach Anspruch 3, in dem ein Muster von Rissen eines trockenen Seebeckens während des Härtingsverfahrens erzielt wird.

23. Verfahren nach Anspruch 2, in dem das eine oder die mehreren charakteristischen Merkmale von Licht, das von dem Überzug ausstrahlt, durch ein Messsystem mit einer solchen räumlichen Auflösung gemessen werden, dass einzelne Risse nicht beobachtet werden.

24. Verfahren nach Anspruch 1, in dem die Schritte des Beleuchtens des Überzugs mit Anregungsbeleuchtung und des Messens des einen oder der mehreren charakteristischen Merkmale von Lumineszenzlicht, das von dem Überzug ausstrahlt, wiederholt durchgeführt werden, um anzuzeigen, wie die Spannung auf dem Substratmaterial im Lauf der Zeit variiert.

25. Verfahren nach Anspruch 1, in dem die gemessene Spannung auf dem Substratmaterial einen Wert der Addition einer ersten und zweiten Hauptspannung in dem Substratmaterial liefert, wobei das Verfahren weiter den Schritt des Bestimmens der ersten Hauptspannung auf solche Weise umfasst, dass man durch Subtrahieren der ersten Hauptspannung von der Addition der ersten und zweiten Hauptspannung zu der zweiten Hauptspannung gelangt.

26. Verfahren nach Anspruch 25, in dem die erste Hauptspannung mit einem elektrischen Widerstands-Dehnungsmessgerät gemessen wird.

27. Verfahren nach Anspruch 25, in dem die gemessene Spannung auf dem Substratmaterial einen Wert der Addition einer ersten und zweiten Hauptspannung in dem Substratmaterial liefert, wobei der Überzug photoelastische Eigenschaften aufweist, so dass ein Wert der Subtraktion der ersten und zweiten Hauptspannung erhalten werden kann und mit dem Wert der Addition der ersten und zweiten Hauptspannung vereinigt werden kann, um sowohl die erste als auch die zweite Hauptspannung zu bestimmen.

28. Spannungsfeld-Kartierungssystem, umfassend Mittel zum Beleuchten eines lumineszierenden Über-

zugs auf einem Substratmaterial, wobei ein oder mehrere charakteristische(s) Merkmal(e) des Lichts, das von dem Überzug emittiert wird, mit einem Ausmaß an Spannung auf dem Substratmaterial in Beziehung stehen, was zumindest teilweise auf einer Beziehung zwischen dem Ausmaß an Spannung auf dem Substratmaterial und der Morphologie von Rissen in dem Überzug beruht; und Mittel zum Messen des einen charakteristischen Merkmals oder der mehreren charakteristischen Merkmale des Lichts, das von dem Überzug emittiert wird, wobei die Messung des einen charakteristischen Merkmals oder der mehreren charakteristischen Merkmale des Lichts, das von dem Überzug emittiert wird, Information bezüglich der Spannung auf dem Substratmaterial liefert.

29. Spannungsfeld-Kartierungssystem nach Anspruch 28, in dem das eine oder die mehreren charakteristische(n) Merkmal(e) des Lumineszenzlichts, das von dem Überzug ausstrahlt, aus der Gruppe ausgewählt sind, die aus Polarisierungszustand, Intensität, Spektrallage, Bandform und Emissionsabklingzeit besteht.

30. Spannungsfeld-Kartierungssystem nach Anspruch 28, in dem die Risse in dem Überzug geschaffen werden, während der Überzug härtet.

31. Spannungsfeld-Kartierungssystem nach Anspruch 28, in dem sich die Risse in dem Überzug entwickeln, wenn das Substratmaterial unter Spannung gesetzt wird.

32. Spannungsfeld-Kartierungssystem nach Anspruch 28, in dem der lumineszierende Überzug ein Bindemittel und mindestens eine lumineszierende Verbindung umfasst.

33. Spannungsfeld-Kartierungssystem nach Anspruch 32, in dem die mindestens eine lumineszierende Verbindung mindestens einen lumineszierenden Farbstoff einschließt, wobei der mindestens eine Farbstoff in dem Bindemittel dispergiert ist.

34. Spannungsfeld-Kartierungssystem nach Anspruch 33, in dem mindestens einer des mindestens einen Farbstoffs eine oder mehrere Störungen kompensiert, die aus der Gruppe ausgewählt sind, die aus Temperaturschwankungen, Beleuchtungsfeldschwankungen, Druckschwankungen und Feuchtigkeitsschwankungen besteht.

35. Spannungsfeld-Kartierungssystem nach Anspruch 30, in dem die Risse die Morphologie ändern, wenn sich die Spannung auf dem Substratmaterial ändert, so dass die Änderung der Rissmorphologie eine Änderung des einen charakteristischen Merkmals oder der mehreren charakteristischen Merkmale des Lumineszenzlichts bewirkt, das von dem Über-

zug ausstrahlt, wobei das eine oder die mehreren charakteristische(n) Merkmal(e) des Lumineszenzlichts, das von dem Überzug ausstrahlt, mit der Spannung auf dem Substratmaterial in Beziehung stehen, so dass die Spannung auf dem Substratmaterial durch Messen des einen charakteristischen Merkmals oder der mehreren charakteristischen Merkmale des Lumineszenzlichts, das von dem Überzug ausstrahlt, bestimmt werden kann.

36. Spannungsfeld-Kartierungssystem nach Anspruch 35, in dem es sich bei einem des einen charakteristischen Merkmals oder der mehreren charakteristischen Merkmale um die Intensität des Lumineszenzlichts handelt, das von dem Überzug ausstrahlt.

37. Spannungsfeld-Kartierungssystem nach Anspruch 36, in dem die Änderung der Rissmorphologie Änderungen bei einem oder mehreren Mitgliedern aus der Gruppe einschließt, die aus Rissgeometrie, Rissbreite, Rissdichte, Rissorientierung, Rissoberflächenstruktur, Risstiefe und Rissöffnung besteht.

38. Spannungsfeld-Kartierungssystem nach Anspruch 36, in dem die Intensität des Lumineszenzlichts, das von dem Überzug ausstrahlt, eine Funktion der Spannung auf dem Substratmaterial ist.

39. Spannungsfeld-Kartierungssystem nach Anspruch 36, in dem die Änderung der Intensität des Lumineszenzlichts, das von dem Überzug ausstrahlt, eine Funktion der Änderung der Spannung auf dem Substratmaterial ist.

40. Spannungsfeld-Kartierungssystem nach Anspruch 28, in dem die Anregungsbeleuchtung nahes Ultraviolett- bis blaues Licht ist.

41. Substrat mit einem lumineszierenden Überzug, wobei der Überzug umfasst:
ein Bindemittel; und
mindestens eine lumineszierende Verbindung, wobei, wenn der Überzug durch Anregungsbeleuchtung beleuchtet wird, die mindestens eine lumineszierende Verbindung die Anregungsbeleuchtung einer ersten Wellenlänge absorbiert und Licht einer zweiten Wellenlänge reemittiert, welches dann von dem Überzug ausstrahlen kann, wobei ein oder mehrere charakteristische(s) Merkmal(e) des Lichts, das von dem Überzug ausstrahlt, mit der Spannung auf dem Substratmaterial in Beziehung stehen, was zumindest teilweise auf einer Beziehung zwischen der Spannung auf dem Substratmaterial und der Morphologie von Rissen in dem Überzug beruht.

42. Beschichtetes Substrat nach Anspruch 41, wobei der Überzug ein oder mehrere Mitglieder aus der Gruppe umfasst, die aus Poly(methylmethacrylat), Poly(imid), Poly(estern), Polyamin, Poly(melaminen), Poly(urethanen), Melaminformaldehyde

hyd, Keramiken und Gläsern, Poly(methylmethacrylat-co-butylmethacrylat), Poly(melaminformaldehyd), Polyurethan und hybridem organisch-anorganischem Sol-Gel besteht.

43. Beschichtetes Substrat nach Anspruch 41, wobei die mindestens eine lumineszierende Verbindung aus der Gruppe ausgewählt ist, die aus konjugierten organischen Farbstoffen, Poly(phenylenvinyl), Cyaninen, 1,5,15,20-Tetraphenylporphyrinzink(II), trans-4-[4-(Dimethylamino)styryl]-1-methylpyridiniumiodid, trans,trans-1,4-[Bis-3,4,5-(trimethoxystyryl)]benzol und Tris(4,7-diphenyl-1,10-phenanthrolin)ruthenium(II)-dichlorid besteht.

44. Beschichtetes Substrat nach Anspruch 41, wobei der Überzug durch Mischen von etwa 0,450 g ERL 4206-Epoxyharz, etwa 0,010 g Epon 826-Epoxyharz, etwa 0,540 g HY 918-Härter, etwa 0,006 g 4-(Dimethylamino)pyridin und etwa 0,003 g Perylen erzeugt wird.

45. Beschichtetes Substrat nach Anspruch 41, wobei der Überzug durch Dispergieren eines lumineszierenden Farbstoffs in einem Bindemittel erzeugt wird, das aus einem Harz hergestellt ist, dem ein Weichmacher und ein Katalysator in einem Verhältnis von etwa 100 Gramm Harz zu etwa 3 bis 7 Gramm Weichmacher zu etwa 0,5 bis 2 Gramm Katalysator zugesetzt worden sind.

46. Beschichtetes Substrat nach Anspruch 45, wobei Rhodamin B als der lumineszierende Farbstoff verwendet wird, p-Toluolsulfonamid als der Weichmacher verwendet wird, Ammoniumchlorid als der Katalysator verwendet wird und Melaminformaldehyd als das Harz verwendet wird.

Es folgen 5 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

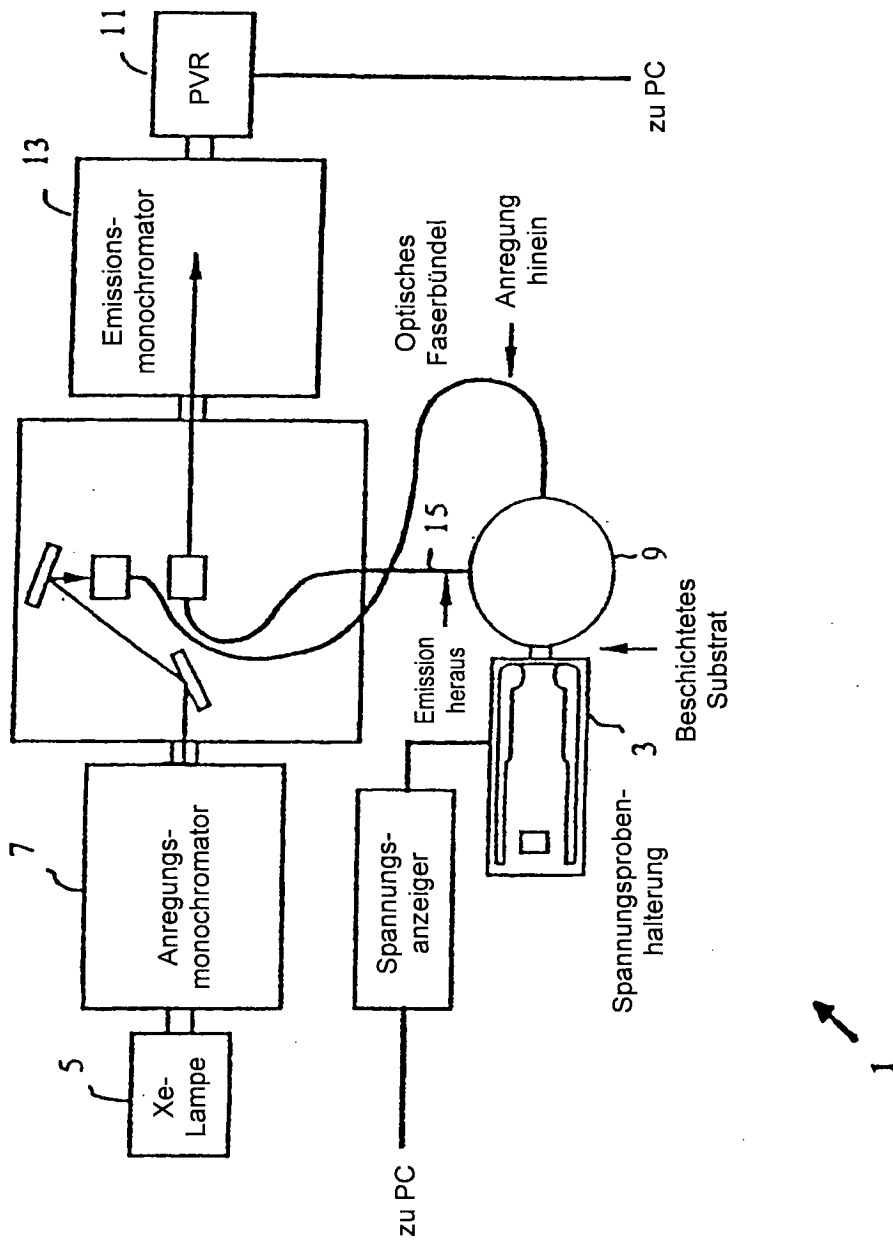


FIG. 1

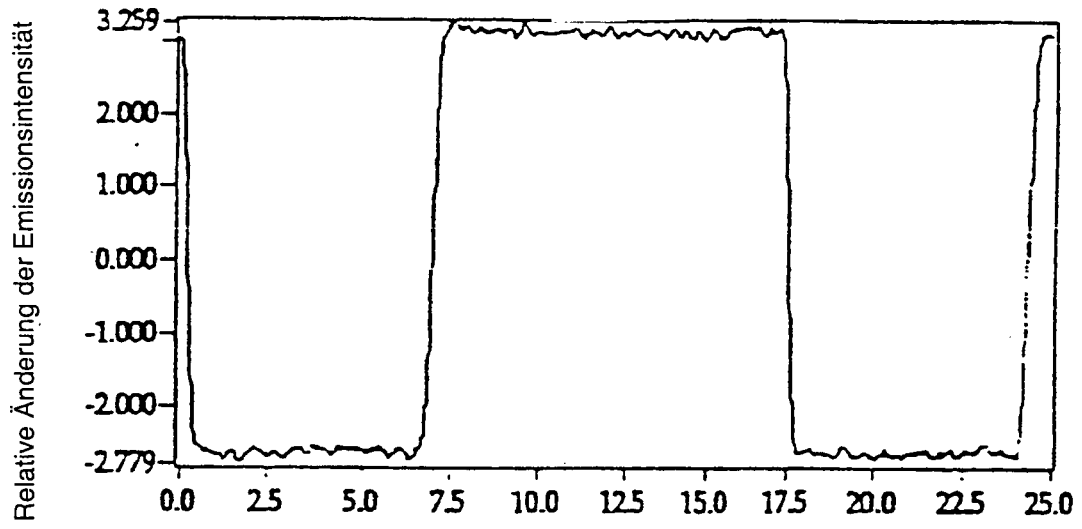


FIG. 2A

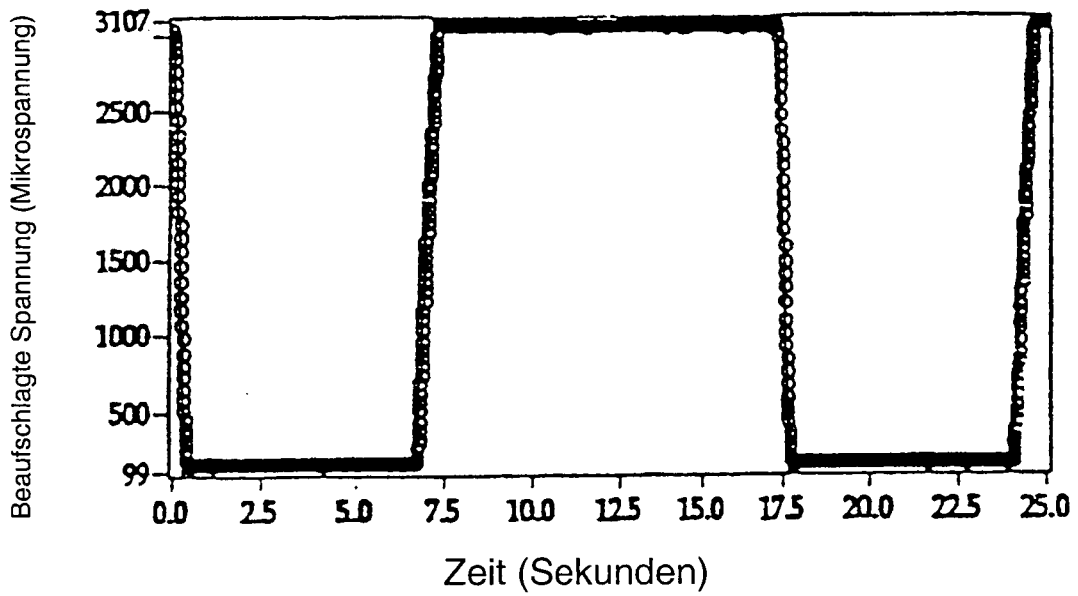


FIG. 2B

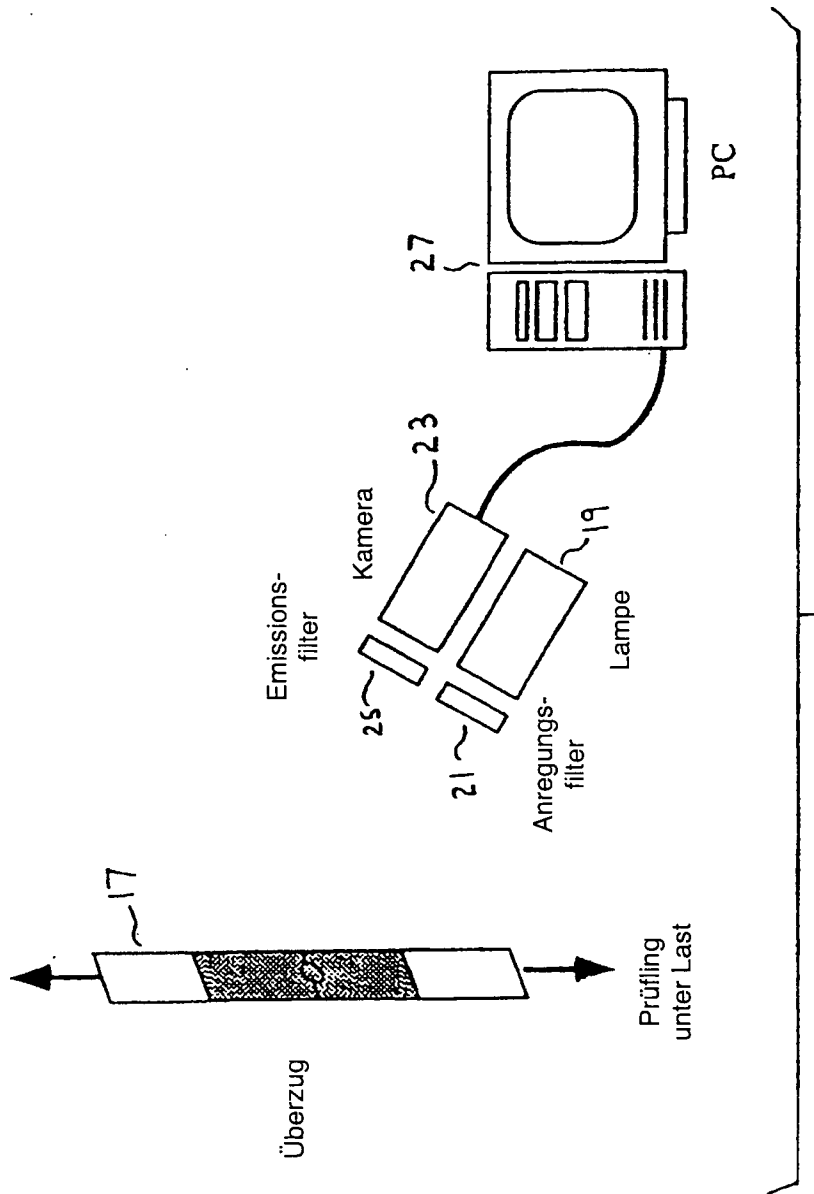


FIG. 3

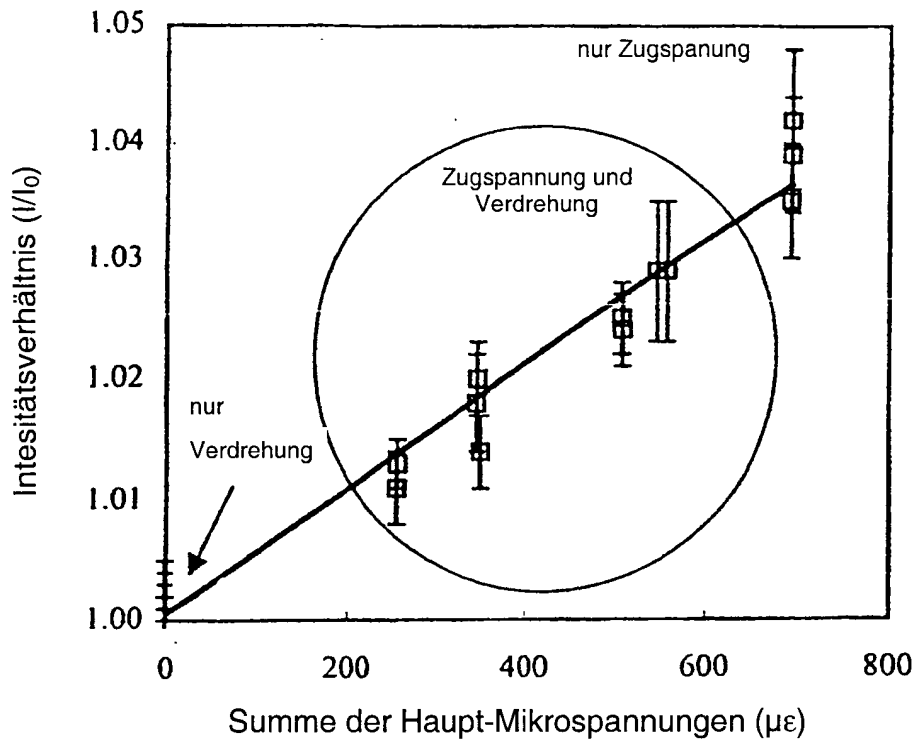


FIG. 4

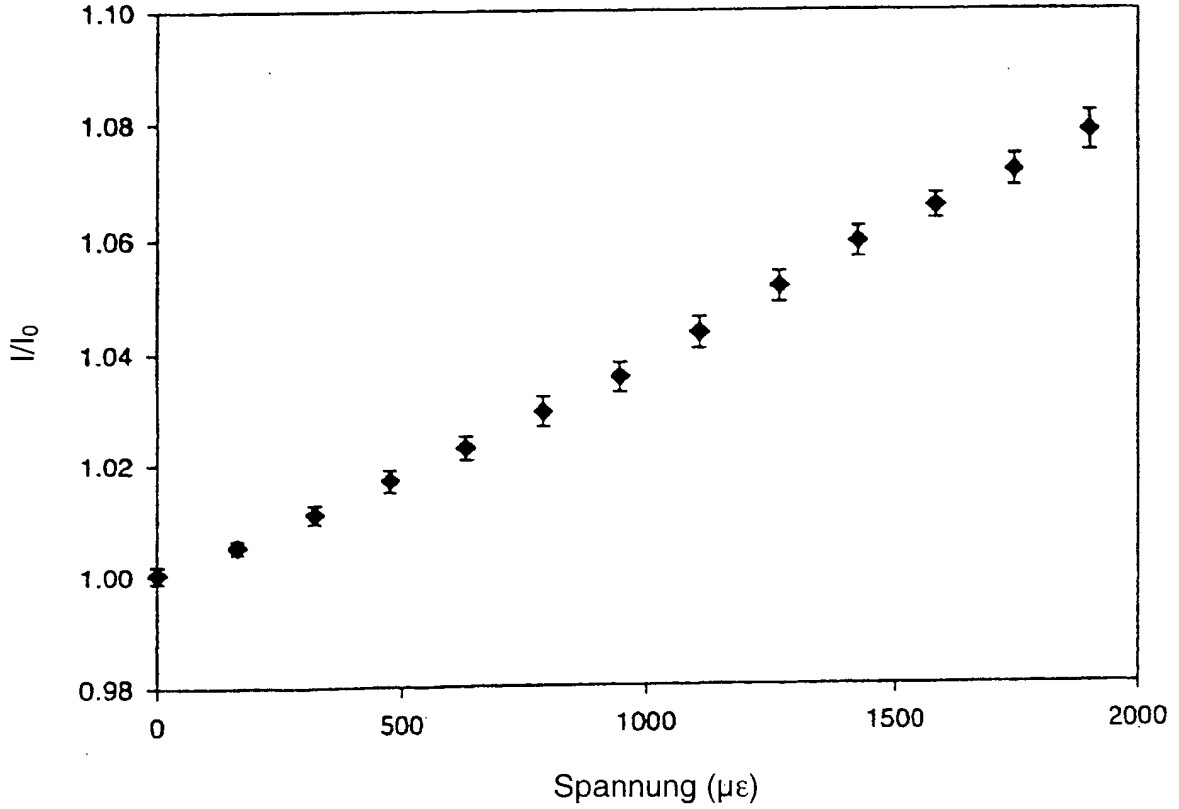


FIG. 5

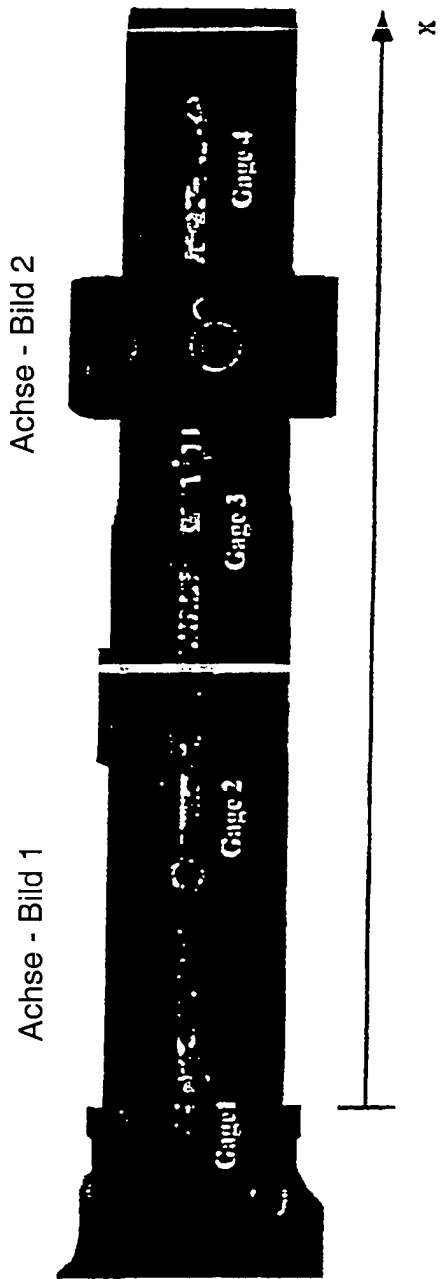


FIG. 6A

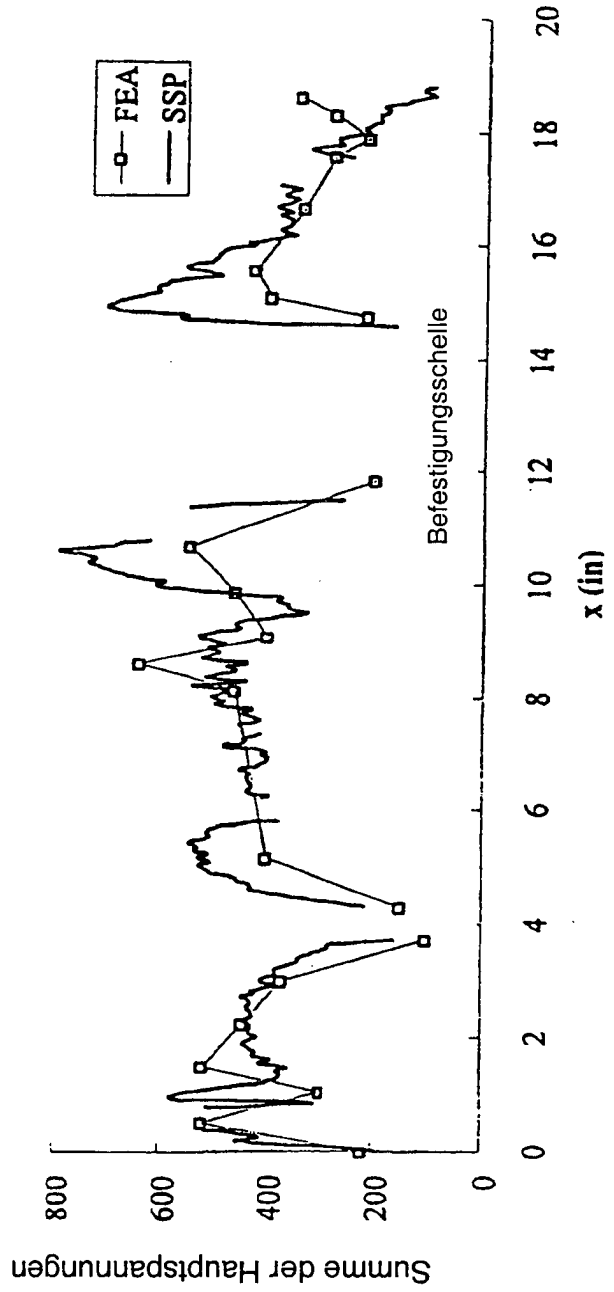


FIG. 6B