



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
BUNDESAMT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

⑤① Int. Cl.³: G 01 N 13/00
G 01 N 25/02
G 01 N 25/72

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

⑫ **PATENTCHRIFT** A5

⑪

647 075

⑫① Gesuchsnummer: 3619/80

⑫② Anmeldungsdatum: 08.05.1980

⑫③ Priorität(en): 10.05.1979 US 037872

⑫④ Patent erteilt: 28.12.1984

⑫⑤ Patentschrift veröffentlicht: 28.12.1984

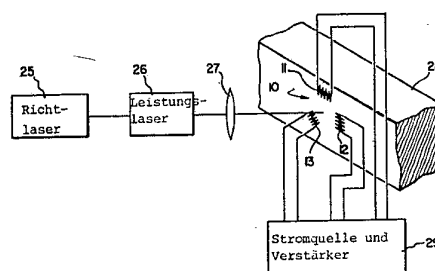
⑦③ Inhaber:
General Electric Company, Schenectady/NY
(US)

⑦② Erfinder:
Thompson, Robert Alan, Schenectady/NY (US)
Wang, Hsin-Pang, Scotia/NY (US)

⑦④ Vertreter:
Dr. A.R. Egli & Co., Patentanwälte, Zürich

⑤④ Verfahren zur Bestimmung von Restspannungen durch Messen der Oberflächendeformation auf einem Gegenstand.

⑤⑦ Es werden Restspannungsmessungen vorgeschlagen unter Verwendung eines Dehnungsmessers (10) und der Deformationsentlastung, die durch lokales Schmelzen von einem Bereich des zu untersuchenden Gegenstandes (28) durch einen Laserstrahl (26) oder durch eine andere fokussierte Wärmequelle erreicht wird. Die Oberflächendeformation wird gemessen (11, 12, 13), nachdem der geschmolzene Bereich wieder erstarrt, und die Wirkung der thermischen Spannung und der Umschmelzspannung wird dadurch eliminiert, dass ein Eichwert einer vergüteten Probe subtrahiert wird. Das Verfahren ist halbzerstörungsfrei, billiger als bestehende Techniken und kann dazu verwendet werden, die Restspannung auf der inneren Oberfläche von Rohrleitungen zu messen.



PATENTANSPRÜCHE

1. Verfahren zur Bestimmung von Restspannungen durch Messen der Oberflächendeformation auf einem Gegenstand, dadurch gekennzeichnet, dass ein Dehnungsmesser auf der Oberfläche des untersuchten Gegenstandes befestigt wird, ein Bereich des Gegenstandes in unmittelbarer Nähe des Dehnungsmessers mit einer fein gerichteten Wärmequelle temporär lokal geschmolzen wird, um die Spannungen zu entspannen, die Deformationsänderung aufgrund der Spannungsentlastungen nach dem Erstarren des geschmolzenen Bereiches und nach einem Zeitraum gemessen wird, der ausreicht, damit thermische Spannungen im wesentlichen verschwinden und die Umschmelzspannungen vorherrschend werden, und von der gemessenen Deformation des untersuchten Gegenstandes ein Eichwert der Deformation einer vergüteten Probe subtrahiert wird, die aus dem gleichen Material wie der untersuchte Gegenstand besteht, wobei der Eichwert in der Weise gefunden wird, dass in identischer Weise ein Bereich in der unmittelbaren Nähe eines Dehnungsmessers mit einer fein gerichteten Wärmequelle temporär lokal geschmolzen und die Deformationsänderung gemessen wird, die durch die Spannungsentlastung hervorgerufen worden ist, nachdem der geschmolzene Bereich wieder erstarrt und nachdem ein ausreichender Zeitraum verstrichen ist, damit die thermischen Spannungen verschwinden können und die Umschmelzspannungen vorherrschend werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Wärmequelle ein fokussierter Laserstrahlpuls mit einer Pulslänge von 1–10 Millisekunden ist.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass der Laserstrahl abgelenkt wird, um den Strahl auf eine Innenfläche des untersuchten Gegenstandes zu richten.

4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Wärmequelle ein fokussierter Laserstrahl ist, der abgelenkt wird, um den Strahl auf eine Innenfläche des untersuchten Gegenstandes zu richten.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1–4, dadurch gekennzeichnet, dass als Dehnungsmesser ein mehrere Elemente umfassendes, rosettenförmig angeordnetes Widerstands-Dehnungsmessgerät verwendet wird, das an der Oberfläche des untersuchten Gegenstandes und an der Oberfläche einer vergüteten Probe aus dem gleichen Material befestigt wird, ein Loch in dem Gegenstand und in der vergüteten Probe an den Mittelpunkten der entsprechenden rosettenförmig angeordneten Messstreifen mit einem fokussierten Laserstrahl temporär lokal geschmolzen wird, um die Spannungen zu entspannen, die durch die Entspannung hervorgerufene Deformationsänderung sowohl für den Gegenstand als auch die vergütete Probe gemessen wird, nachdem der geschmolzene Bereich wieder erstarrt und nach einer ausreichend langen Zeitdauer, damit die thermischen Spannungen und die Umschmelzspannungen sich stabilisieren, und der Eichwert der Deformation für die vergütete Probe vom Messwert der Deformation für den untersuchten Gegenstand subtrahiert wird, um einen Wert der Entlastungsdeformation zu erhalten, der für die Ermittlung der Restspannungen verwendet wird.

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Bestimmung von Restspannungen durch Messen der Oberflächendeformation auf einem Gegenstand.

Die Restspannung ist auch als eine Innenspannung bekannt und ist definiert als ein Spannungssystem innerhalb eines festen Körpers, das nicht von äusseren Kräften abhängig ist. Die zwei gegenwärtig vorwiegend zur Bestimmung der Restspannung bekannten Techniken sind die Entspannungsmethoden und die Röntgenstrahlmethode. Das erste Verfah-

ren ist, wie es üblicherweise ausgeführt wird, indem ein Loch in eine Probe gebohrt oder auf andere Weise maschinell hergestellt wird, um die Spannungen zu entspannen, zerstörend. Versuche, die Restspannung zerstörungsfrei zu messen, haben wenig Erfolg gehabt, mit Ausnahme der Verwendung von Röntgenstrahlen, aber diese sind nur auf eine Oberflächenschicht von 0,01 mm anwendbar und nicht auf die Messung der Restspannung auf der innenseitigen Oberfläche eines Rohres oder einer anderen Innenfläche.

Die Restspannungen werden aus der Messung von Oberflächendeformationen ermittelt, die durch Spannungen hervorgerufen werden, die an einem lokal geschmolzenen Bereich von einem untersuchten Gegenstand entspannt werden, was in der Nähe des Dehnungsmessers geschieht. Das lokale Schmelzen wird durch einen Laserstrahl oder eine andere fein gerichtete Wärmequelle herbeigeführt, und es wird ein kurzer Wärmeimpuls verwendet, um den geschmolzenen Bereich zu begrenzen und den Dehnungsmesser zu schützen. Nach dem Ende des Wärmeimpulses beginnt der geschmolzene Bereich wieder zu erstarren. Die thermischen Spannungen verschwinden, wenn die Temperatur sinkt und die Umschmelzspannung vorherrschend wird, und die Deformations- oder Dehnungsänderung, die durch die Entspannung hervorgerufen wird, wird nun durch eine relativ einfache elektrische Schaltungsanordnung gemessen. Die Wirkungen sowohl der thermischen Spannung als auch der Umschmelzspannung werden eliminiert, indem ein Eichwert von einer vergüteten Probe aus dem gleichen Material von der Messung des untersuchten Gegenstandes subtrahiert wird. Die resultierende Entlastungsdeformation wird für die Berechnung der Restspannungen verwendet.

Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel des erfindungsgemässen Verfahrens wird ein Widerstands-Dehnungsmesser mit drei Elementen in einer rosettenartigen Anordnung verwendet, und in der Mitte der Rosette wird durch einen Laser mit Impulsbetrieb temporär ein Loch geschmolzen. Die Dehnungseichmessung mit einer vergüteten Probe wird im wesentlichen identisch durchgeführt, indem der mit dem Gegenstand durchgeführte Versuch dupliziert wird, wobei eine ausreichende Zeitdauer nach der Erstarrung des Loches (10–30 Sekunden) gewartet wird, damit sich die thermischen und Umschmelzspannungen stabilisieren. Anstelle des Lochschmelzens wird ein spannungsentlasteter, nahezu vollständiger Ring um den Umfang des Messgerätes herum geschmolzen, wenn eine genauere und empfindlichere Technik erforderlich ist.

Die mit der Erfindung erzielbaren Vorteile bestehen insbesondere darin, dass das erfindungsgemässe Verfahren die echte Restspannung in einem Körper misst, halbzerstörungsfrei ist, d.h., dass die Beschädigung des Teiles so klein ist, dass das geprüfte Teil für eine weitere Verwendung nicht beeinträchtigt ist, da wenig Material verloren geht, in Verbindung mit optischen Komponenten verwendet werden kann, um den Laserstrahl zur Messung der Restspannung auf der Innenfläche von Rohren und anderen Teilen abzulenken, und billiger ist als bekannte Techniken.

Die Erfindung wird nun mit weiteren Vorteilen anhand der folgenden Beschreibung und der Zeichnung von Ausführungsbeispielen näher erläutert.

Figur 1 ist eine Draufsicht auf einen drei Elemente umfassenden rosettenartigen Dehnungsmesser zum Lochschmelzen.

Figur 2 zeigt in einem Kurvenbild die Deformation über der Zeit für einen Gegenstand mit Restspannung und für eine vergütete Eichprobe.

Figur 3 ist ein Querschnitt durch ein Reaktorrohr und zeigt einen Laser und optische Einrichtungen zum lokalen Schmelzen für die Restspannungsmessung auf der inneren Oberfläche des Rohres.

Figur 4 ist ein schematisches Blockdiagramm von einem Laser-Deformationsmesssystem.

Figur 5 zeigt einen nahezu vollständig ringförmigen geschmolzenen Bereich für die Spannungsentlastung.

Das erfindungsgemässe Verfahren zum Messen von Restspannungen basiert auf der bekannten Lochbohrtechnik von Restspannungsmessungen. Restspannungen werden aus der Messung von Oberflächen deformationen ermittelt, die durch Spannungsentlastungen an dem Loch hervorgerufen werden. Bei diesem Verfahren wird vorübergehend ein Loch in dem untersuchten Gegenstand in der unmittelbaren Nähe des Dehnungsmessers geschmolzen, um die Spannung zu entspannen. Unter gewissen Umständen kann das Lochschmelzverfahren eine unzureichende Empfindlichkeit oder Genauigkeit aufweisen, und dann kann das Hohlbohrverfahren verwendet werden, wenn eine genauere, empfindlichere Technik erforderlich ist. In diesem Falle wird anstelle eines Loches in der Mitte einer Messeinrichtung ein spannungsentlasteter Ring oder ein nahezu vollständiger Ring um den Umfang der Messeinrichtung herum geschmolzen. Das halbzerstörungsfreie Verfahren ist auf das Hohlbohren und auch auf das Lochschmelzen und andere lokal geschmolzene Geometrien anwendbar.

Das drei Elemente umfassende rosettenartige Dehnungsmessgerät 10, wie es in Figur 1 gezeigt ist, wird üblicherweise gewählt, wenn die Hauptspannungen und eine Haupttrichtung ermittelt werden sollen. Die drei Messelemente 11, 12 und 13 werden auf einem Messkreis bei 0°, 90° und 225 °C angeordnet. In der Mitte des Messgerätes, konzentrisch zu dem Messkreis, befindet sich ein Kreisring 14, der als ein Ausrichtmuster dient und in dem ein Loch 15 temporär geschmolzen wird durch eine geeignete fein gerichtete Wärmequelle. Die gefalteten Messelemente und das Ausrichtmuster sind geätzte Folienkomponenten auf einer durchgehenden Kunststoffhalterung 16 und werden nach Art von gedruckten Schaltungen hergestellt. An jedem Ende des Messelementes befindet sich ein vergrößerter Kontaktstreifen 17 zur Herstellung elektrischer Anschlüsse. Das Rosettenmessgerät 10 ist ein metallisches Widerstandsgerät, das so arbeitet, dass, wenn eine Folienlänge mechanisch gedehnt wird, ein längerer und schmaler Leiter entsteht, dessen elektrischer Widerstand normalerweise vergrößert wird. Wenn die Länge des Widerstandselementes innig an einem deformierten Widerstand befestigt wird derart, dass es ebenfalls deformiert wird, dann kann die gemessene Widerstandsänderung als eine Dehnung geeicht werden. Es sind viele andere Dehnungsmessanordnungen bekannt, die anstelle des rosettenartigen Meters verwendet werden können, was von dem jeweiligen Anwendungsfall abhängt.

Das lokal geschmolzene Loch oder der Bereich 15 für die Spannungsentlastung wird an der Mitte des Dehnungsmessers durch einen gebündelten Laser- oder Elektronenstrahl hergestellt, oder es kann irgendeine Wärmequelle verwendet werden, die einen fein gerichteten, kurzen Wärmeimpuls liefern kann. Von diesen wird der Laser vorgezogen und im Pulsbetrieb mit einer Pulslänge von etwa 1–10 Millisekunden betrieben. Ein kurzer Wärmeimpuls begrenzt den geschmolzenen Bereich und schützt die Dehnungsmesser, und es ist auch wichtig, den untersuchten metallischen oder aus Kunststoff bestehenden Gegenstand zu schmelzen, ohne dass Material verspritzt. Wenn das Schmelzen richtig gesteuert wird, ist das Loch nach der Erstarrung wieder weitgehend geschlossen. Das Verfahren ist seiner Art nach halbzerstörungsfrei, da der geschmolzene Bereich in wenigen Millisekunden wieder erstarrt, bevor eine wesentliche Materialmenge verloren geht.

Im folgenden wird nun das Verfahren zum Messen der Restspannung durch lokales Schmelzen beschrieben. Zunächst bringt der Laser für eine ausreichende Zeitperiode

Energie in den Gegenstand, es wird ein geschmolzenes Loch gebildet und in dessen Nähe wird die Restspannung entspannt. Zur gleichen Zeit wird auch eine thermische Spannung eingeführt aufgrund der ungleichförmigen Temperaturverteilung. Wenn der Laserimpuls endet, beginnt das geschmolzene Loch wieder zu erstarren. Die thermischen Beanspruchungen werden beseitigt, wenn die Temperatur abnimmt, und die Umschmelzung wird vorherrschend. Die Deformationsänderung, die durch die Spannungsentlastung hervorgerufen wird, wird gemessen, nachdem der geschmolzene Bereich wieder erstarrt ist und nachdem ein gewisser Zeitraum von etwa 10–30 Sekunden verstrichen ist zur Stabilisierung der thermischen Beanspruchungen und der Umschmelzspannungen. Die Kurve der Deformation über der Zeit gemäss Figur 2, die sich auf die Kurve für einen Gegenstand mit Restspannung bezieht, zeigt, dass der Spitzenwert der Deformation auftritt, während der Bereich geschmolzen ist, und dass die Deformation nach einem kurzen Zeitraum im wesentlichen konstant ist. Die Wirkung von sowohl der thermischen Beanspruchung als auch der Umschmelzbeanspruchung wird eliminiert, wenn ein Eichwert einer vergüteten Probe von der Messung eines Gegenstandes mit Restspannung subtrahiert wird. Die vergütete Probe muss aus dem gleichen Material bestehen wie der geprüfte Gegenstand, wie beispielsweise rostfreiem Stahl, aber braucht nicht die gleiche Form zu haben (beispielsweise kann der eine Gegenstand ein Rohr und der andere eine ebene Platte sein). Es wird ein vergütetes Stück gewählt, weil es keine eingebaute Restbeanspruchung besitzt und eine spannungsfreie Messung durchgeführt werden kann. Die Eichmessung der Deformation wird im wesentlichen in identischer Weise durchgeführt, indem der für den Gegenstand durchgeführte Versuch dupliziert wird. Bezüglich der Kurve für die Deformation über der Zeit in Figur 2 für die vergütete Probe wird die Oberflächen deformation in gleicher Weise gemessen, nachdem der geschmolzene Bereich erstarrt ist und die Wirkung der thermischen und Umschmelzspannungen sich stabilisiert hat. Die Entlastungsdeformation $\Delta \epsilon$ wird dadurch erhalten, dass die Deformation für die vergütete Probe von der Deformation für den Gegenstand mit der Restspannung subtrahiert wird. Diese wird zur Berechnung der Restspannung benutzt. In dem biaxialen Spannungsfeld können drei Unbekannte, zwei Hauptbeanspruchungen und eine Haupttrichtung, dadurch gelöst werden, dass drei Dehnungsmesser in verschiedenen Richtungen angeordnet werden.

Die Verwendung einer entfernten, gerichteten Wärmequelle gestattet Restspannungsmessungen bei schwierigen Geometrien, wie beispielsweise einer Innenfläche von einem Gegenstand. Gemäss Figur 3 ist ein Beispiel die Messung der Restspannung auf dem Innendurchmesser eines Reaktorrohres 18. Schweiß-Restspannungen in nuklearen Rohrleitungen spielen eine Hauptrolle in dem intergranularen, durch Spannungskorrosion hervorgerufenen Rissbildungsproblem, und da eine derartige Rissbildung auf der Innenfläche des Rohres auftritt, muss die Messung hier durchgeführt werden. Ein Leistungslaser 19 befindet sich an einer entfernten Stelle und der Laserstrahl 20 wird nach dem Eintritt in das Rohr durch ein Prisma 21 und eine Fokulinse 22 auf die Mitte des aufgetragten Rosettendehnungsmessers 10 abgelenkt. Die Laserwärmquelle und optische Bauteile zum Ablenken des Strahles, zu denen auch Spiegel gehören können, können auf einem bewegbaren Wagen montiert werden. Das halbzerstörungsfreie Verfahren ist schnell, billiger als bestehende Methoden und eignet sich für an Montagestellen durchgeführte Messungen der Restspannung.

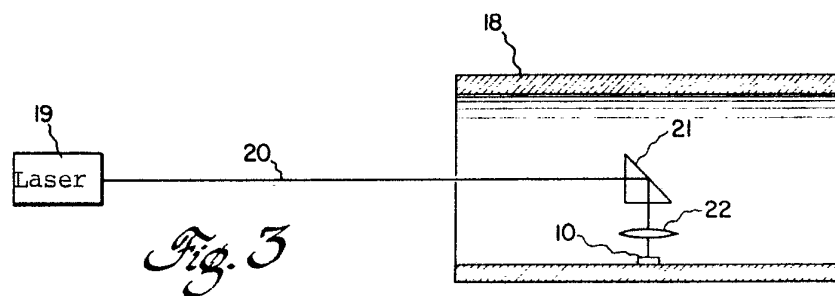
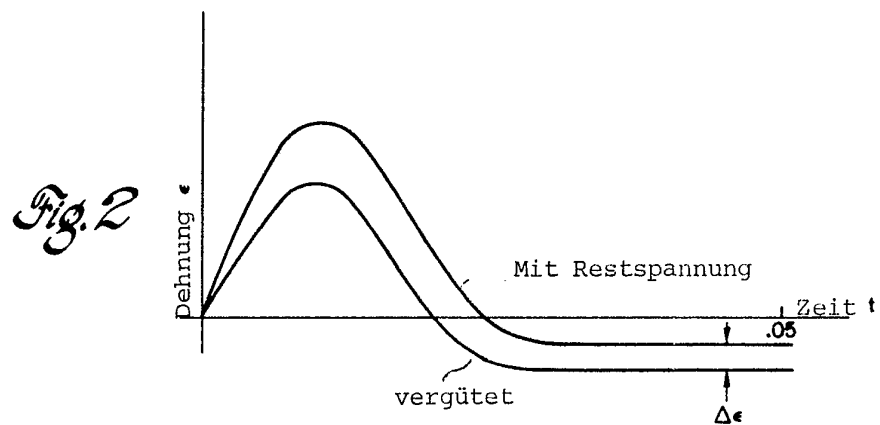
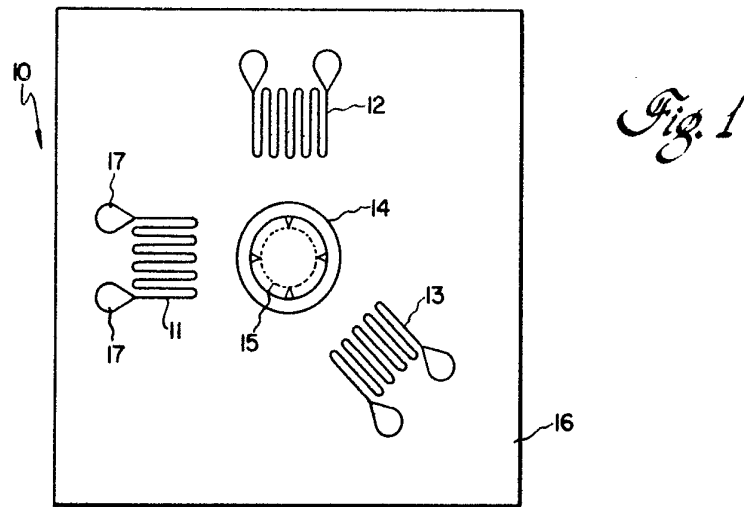
Figur 4 zeigt das Blockdiagramm von einem vollständigen Laser-Deformationsmesssystem. Das Lasersubsystem umfasst einen Richtlaser 25, einen Leistungslaser 26 und eine

Fokussierungslinse 27. Diese Komponenten sind handelsüblich. Der eine kleine Leistung aufweisende Richtlaser in dem einen Subsystem ist ein Helium-Neon-Laser, der auf einer gemeinsamen Achse mit dem Leistungslaser montiert ist, der ein Neodymglas-Laser mit einer Wellenlänge von $1,06 \mu\text{m}$ ist. Der Richtlaser hat eine unterschiedliche Wellenlänge in dem Rotbereich und stellt sicher, dass der Impuls des Leistungslasers auf die Mitte des Dehnungsmessers gerichtet ist. Der Dehnungsmesser 10 ist der gleiche wie in Figur 1 und kann ein handelsübliches lochbohrendes Rosetten-Dehnungsmesser sein. Diese Dehnungsmesser sind relativ klein mit einer Gesamtausdehnung von etwa 6 mm oder weniger und sind mit einem geeigneten Kleber mit dem Gegenstand oder der Probe 28 verbunden. Die Deformationsänderung nach dem Laserschmelzen wird durch eine elektrische Schaltungsanordnung gemessen, die eine Stromquelle und Verstärker 29 umfasst. Jedem Messelement wird ein konstanter Strom zugeführt und die über dem Element gemessene Spannung ist direkt proportional zu der Dehnung, die ihrerseits der mechanischen Spannung proportional ist. Die Spannung wird aus der gemessenen Dehnung durch geeignete Formeln ermittelt, die das Poissons'sche Verhältnis und den Elastizitätsmodul E für das Material umfassen. Wenn angenommen wird, dass das Rohr 18 der untersuchte Gegenstand und der Stab 28 die vergütete Probe ist, wird der gleiche Dehnungsmesser für beide Versuche benutzt, und das Laser-Subsystem und die Pulslänge und die Eingangsenergie des Laserpulses werden dupliziert. Wenn die Eichmessung der Dehnung für ein gegebenes Material einmal ermittelt worden ist, braucht dieses Verfahren nicht jedesmal wiederholt zu werden, wenn ein Gegenstand aus diesem Material untersucht wird. Weiterhin kann

die Spannung, die den Eichwert der vergüteten Probe darstellt, automatisch durch die Einrichtung von der gemessenen Spannung für einen Gegenstand mit Restspannung subtrahiert werden. Hierfür sind verschiedene Möglichkeiten bekannt.

Wenn die drei Deformationsentlastungen $\Delta \epsilon$ für die rosettenförmige Messkonfiguration bekannt sind, ist die Berechnung der Spannungen und die Grösse der Hauptspannungen und deren Richtungen nur noch Routinesache. Dies-
10 bezüglich wird auf «Hole-Drilling Strain-Gage Method of Measuring Residual Stresses» von N.G. Rendler und I. Vigness, Experimental Mechanics Dezember 1966, Seiten 577–586 und auf das Buch «Mechanical Measurements», zweite Ausgabe, T.G. Beckwith und N.L. Buck, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1973, Library of Congress Catalog Card No. 70–85 380 verwiesen. Alternativ können die drei Spannungen, die die Deformationsentlastung darstellen, in einen Mikroprozessor eingegeben werden, der die Berechnung der Hauptspannungen und deren Richtungen übernimmt. Diese
20 Technik misst die echte Restspannung, d.h. eine mittlere Spannung bis 1,25 mm oder mehr Tiefe von einer Oberfläche.

Das eingangs erwähnte Hohlbohrungsverfahren ist in Figur 5 dargestellt und anwendbar, wenn eine genauere und empfindlichere Technik erforderlich ist. In diesem Fall wird
25 anstelle der Herstellung eines Loches in der Mitte des Dehnungsmessers ein spannungsentlasteter, nahezu vollständig ringförmiger Bereich 30 um den Dehnungsmesser herum geschmolzen. Ein fein fokussierter Laserstrahl wird abgelenkt, um den nahezu vollständigen Ring auszubilden, wobei ein ge-
30 wisser Raum für die Durchführung von Leitern zu den Messelementen freibleibt.



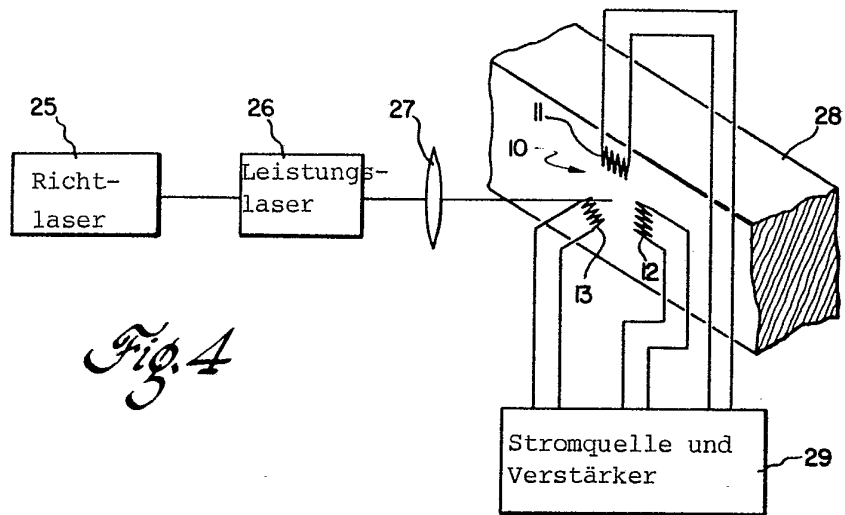


Fig. 5

