

(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
10. November 2011 (10.11.2011)

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2011/137995 A2

- (51) **Internationale Patentklassifikation:** Nicht klassifiziert
- (21) **Internationales Aktenzeichen:** PCT/EP2011/002171
- (22) **Internationales Anmeldedatum:** 2. Mai 2011 (02.05.2011)
- (25) **Einreichungssprache:** Deutsch
- (26) **Veröffentlichungssprache:** Deutsch
- (30) **Angaben zur Priorität:** 10 2010 018 980.4 3. Mai 2010 (03.05.2010) DE
- (71) **Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US):** FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V. [DE/DE]; Hansastr. 27c, 80686 München (DE).
- (72) **Erfinder; und**
- (75) **Erfinder/Anmelder (nur für US):** WILHELM, Tina [DE/DE]; Paulinenstr. 7, 72555 Metzingen (DE). SCHMIDT, Wolfgang [DE/DE]; Prof.-Wagner-Str. 2, 73431 Aalen (DE). HINNEN, Michael [DE/DE]; Seydlitzstr. 8, 89077 Ulm (DE).
- (74) **Anwalt:** PFENNING, MEINIG & PARTNER GBR; Theresienhöhe 13, 80339 München (DE).
- (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, DE, 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.
- (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 (AL, 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, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- Veröffentlicht:**
— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)



WO 2011/137995 A2

(54) **Title:** METHOD AND DEVICE FOR MEASURING JOINING PROPERTIES OF A MATERIAL COMPOSITE

(54) **Bezeichnung :** VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR MESSUNG VON VERBINDUNGSEIGENSCHAFTEN EINES WERKSTOFFVERBUNDES

(57) **Abstract:** The invention relates to a method and a device for measuring at least one joining property of a material composite, which comprises at least two elements joined to one another, wherein at least one of the elements is heated at least in one region, a resultant deformation of a surface of the material composite is measured and the joining property is determined from the measured deformation.

(57) **Zusammenfassung:** Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Messung zumindest einer Verbindungseigenschaft eines Werkstoffverbundes, welcher zumindest zwei miteinander verbundene Elemente aufweist, wobei zumindest eines der Elemente zumindest in einem Bereich erwärmt wird, eine hieraus resultierende Verformung einer Oberfläche des Werkstoffverbundes gemessen wird und aus der gemessenen Verformung die Verbindungseigenschaft bestimmt wird.

Verfahren und Vorrichtung zur Messung von Verbindungs-
eigenschaften eines Werkstoffverbundes

5 Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vor-
richtung zur Messung zumindest einer, vorzugsweise
mechanischen, Verbindungseigenschaft eines Werkstoff-
verbundes, welcher zumindest zwei miteinander verbun-
dene Elemente aufweist, wobei zumindest eines der
10 Elemente zumindest in einem Bereich erwärmt wird, ei-
ne hieraus resultierende Verformung einer Oberfläche
des Werkstoffverbundes gemessen wird und aus der ge-
messenen Verformung die Verbindungseigenschaft be-
stimmt wird.

15 Innovative Werkstoffverbunde, bei denen mehrere Funk-
tionswerkstoffe miteinander verbunden, beispielsweise
verklebt, werden, gewinnen zunehmend an Bedeutung.
Eine besondere Rolle spielt hierbei die Ausbildung
der Klebeverbindung, welche durch charakteristische
20 Eigenschaften der kohäsiven wie adhäsiven Haftung be-

stimmt wird und einen maßgeblichen Einfluss auf das effektive Systemverhalten ausübt. Zur Sicherstellung eines gewünschten effektiven Systemverhaltens ist es wünschenswert, die mechanischen Eigenschaften der Verbindung in quantitativer Form zu bestimmen. Dies geschieht meist prozessbegleitend im Labor.

Nach dem Stand der Technik werden zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der Verbindung Verbindungen normalerweise zerstörende Verfahren wie standardisierte Zug-Scher-Versuche oder analytische Verfahren wie spektroskopische Untersuchungen eingesetzt. Soweit Verfahren nach dem Stand der Technik zerstörungsfrei sind, erlauben sie nur einen rein qualitativen Nachweis des Vorhandenseins von Defekten, wie z.B. Delaminationen.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, ein zerstörungsfreies Prüfverfahren und eine Vorrichtung zur Durchführung eines solchen Verfahrens anzugeben, mit welchen eine quantitative produktionsintegrierte Untersuchung der Verbindungseigenschaften außerhalb eines Labors möglich ist.

Diese Aufgabe wird gelöst durch das Verfahren nach Anspruch 1 und die Vorrichtung nach Anspruch 8. Die jeweiligen abhängigen Ansprüche geben vorteilhafte Weiterbildungen des erfindungsgemäßen Verfahrens und der erfindungsgemäßen Vorrichtung an.

Erfindungsgemäß wird ein Verfahren zur Messung zumindest einer, vorzugsweise mechanischen, Verbindungseigenschaft eines Werkstoffverbundes bereitgestellt. Unter einem Werkstoffverbund wird hierbei ein Objekt verstanden, welches zumindest zwei miteinander verbundene Elemente aufweist, die bevorzugt über zumin-

dest eine Verbindungsfläche miteinander verbunden sind, die vorzugsweise also flächig miteinander verbunden sind. Ein derartiger Werkstoffverbund kann beispielsweise ein Laminat oder alle Arten von Klebe-
5
verbindung, alle Arten von Verbundwerkstoffen (CFK, GFK, Sandwichkonstruktionen) sowie Beschichtungen sein.

10 Erfindungsgemäß wird nun zumindest eines der Elemente des Werkstoffverbundes zumindest lokal, d.h. in einem begrenzten Bereich, erwärmt. Auch eine vollständige Erwärmung ist möglich.

15 Die Erwärmung sollte vorzugsweise so durchgeführt werden, dass sie zu einer Verformung zumindest eines der Elemente, einer Oberfläche des Werkstoffverbundes und/oder einer Verbindungsschicht zwischen den Elementen führt, derart, dass die Verformung an zumindest einer Oberfläche des Werkstoffverbundes zu er-
20 kennen ist und messbar ist.

25 Erfindungsgemäß wird nun eine aus der Erwärmung resultierende Verformung einer Oberfläche des Werkstoffverbundes gemessen. Es wird hierbei die Abweichung der Oberfläche von ihrem nicht erwärmten Zustand bestimmt. Die Messung der Verformung der Oberfläche kann hierbei vorzugsweise orts aufgelöst oder auch nur an einem oder mehreren vereinzelteten Punkten der Oberfläche durchgeführt werden.

30 Aus der gemessenen Verformung wird dann die zumindest eine Verbindungseigenschaft bestimmt. Hierbei können die gemessenen Werte der Verformung direkt herangezogen werden oder es werden aus der gemessenen Verformung ein oder mehrere Werte oder Funktionen abgelei-
35 tet, mittels welcher dann die zumindest eine Verbin-

Bevorzugterweise wird als Verbindungseigenschaft bestimmt wird.

5 Bevorzugterweise wird als Verbindungseigenschaft ein Schubmodul und/oder ein Elastizitätsmodul der Verbindungsstelle zwischen den zumindest zwei Elementen bestimmt.

10 Bevorzugterweise ist zumindest eines der Elemente des Werkstoffverbundes, welches nur an einer Seite mit anderen Elementen des Werkstoffverbundes verbunden ist und eine freie Oberfläche aufweist, flächig ausgebildet. Es kann dann als die Verformung eine Verformung der dem Werkstoffverbund abgewandten freien Oberfläche dieses flächigen Elementes gemessen werden. Insbesondere kann hierbei der Werkstoffverbund ein Laminat aufweisen, welches mehrere miteinander verbundene, beispielsweise verklebte, flächige Schichten aufweist.

20 Bevorzugterweise kann nun die Erwärmung des zumindest einen Elementes oder einer Verbindungsschicht zwischen zwei Elementen mittels Einstrahlung von elektromagnetischer Strahlung bewirkt werden. Bevorzugt ist eine lokale Erwärmung, insbesondere mit einem Laserstrahl mit definiertem Durchmesser und definierter Intensität, da hierdurch eine genauere quantitative Bestimmung der Verbindungseigenschaften möglich ist.

30 Die Messung der Verformung der Oberfläche kann vorzugsweise mittels Speckle Interferometrie und/oder, vorzugsweise digitaler, Shearographie und/oder mittels Bildkorrelation erfolgen. Hierzu wird die Vorrichtung zur Messung der Verformung, vorzugsweise senkrecht, gegenüber oder über derjenigen Oberfläche angeordnet, deren Verformung in Folge von Erwärmung gemessen werden soll. Die Speckle Interferometrie ist

ein Verfahren zur Verformungsmessung. Hierbei wird die zu vermessende Oberfläche mittels kohärenten Lichts, also z.B. Laserlicht, beleuchtet. Kohärentes Licht, das an einer rauen Oberfläche gestreut wird, erzeugt lokal konstruktive und destruktive Interferenzen, die als fleckiges Muster erscheinen. Dieses Muster reagiert empfindlich auf Veränderungen der beleuchteten Oberfläche. Daher kann aus einer Veränderung des Fleckenmusters auf eine Veränderung der Oberfläche, insbesondere deren lokaler Abstand zur Quelle des kohärenten Lichtes, geschlossen werden.

Die Shearographie ist eine Kurzbezeichnung für die Laser Speckle Shearing Interferometrie und somit eine Sonderform der Speckle Interferometrie.

Das Prinzip der Shearografie, insbesondere der digitalen Shearografie, beruht darauf, dass Verformungen sowohl in der Ebene (In-Plane) als auch aus der Ebene heraus (Out-of-Plane) durch die Erfassung von Weglängenänderungen kohärenter elektromagnetischer Wellen zwischen einem Objekt und einem Detektor flächenhaft ermittelt werden können. Dies wird ermöglicht durch die Ausnutzung von Interferometrien von jeweils benachbarten Laserstrahlen und Auswertung resultierender Phasenänderungen. Mit dieser Methode gelingt es, flächenhaft Verformungen im Bereich eines Bruchteils der Wellenlänge des verwendeten Lasers – somit im Nanometerbereich – zu bestimmen.

Durch eine spezifische Anregung von mechanischen oder thermomechanischen Verformungen lassen sich hierdurch Defekte wie Delaminationen, Einschlüsse und auch Kissing Bonds diskret abbilden, da diese Störstellen in der Regel ein anderes Verformungsverhalten als die ungestörte Umgebung aufweisen.

Bildkorrelation ist ebenfalls ein Verfahren zur Verformungsmessung. Hierbei werden Bilder einer Oberfläche aufgenommen und Verformungen anhand von Bildkorrelationsalgorithmen ermittelt. Diese identifizieren einzelne im Bild verschobene Muster. Anhand der Verschiebungsdaten lassen sich entsprechende Verfahren ableiten.

5
10 Zur Bestimmung der Verbindungseigenschaft kann bevorzugt eine Korrelation mit experimentell durchgeführten direkten Messungen der Verbindungseigenschaften, wie Schubmodul und/oder Elastizitätsmodul, durchgeführt werden. Dies kann z.B. mittels standardisierter Zug-Scher-Versuche und/oder zentrischer Zugversuche
15 geschehen.

Zur Bestimmung der gesuchten Verbindungseigenschaft aus den gemessenen Verformungen kann außerdem auch
20 eine Korrelation mit Ergebnissen aus numerischen Simulationen der Verformung bei variierenden Verbindungseigenschaften, wie z.B. Schubmodul und/oder Elastizitätsmodul, durchgeführt werden.

25 Sowohl der Vergleich der Messergebnisse mit direkten Messungen der Verbindungseigenschaften als auch mit Simulationsergebnissen kann vorteilhaft wie folgt erfolgen:

30 Es kann zunächst zumindest eine Korrelationskurve bzw. Korrelationsfunktion gemessen oder simuliert werden, die die gemessene bzw. simulierte Verformung mit eingestellten bzw. vorgegebenen Werten der entsprechenden Verbindungseigenschaften in Korrelation
35 setzt. Wird nun mittels des erfindungsgemäßen Verfahrens eine bestimmte Verformung gemessen, kann an der

Korrelationskurve der entsprechende Wert der Verbindungseigenschaften abgelesen werden.

5 Besonders vorteilhaft ist das erfindungsgemäße Verfahren anwendbar auf Werkstoffverbunde, deren zumindest zwei miteinander verbundene Elemente durch Kleben miteinander verbunden sind. Es kann dann eine Verbindungseigenschaft der Klebeverbindung gemessen werden.

10 Das Verfahren kann vorteilhaft mit einer erfindungsgemäßen Messvorrichtung zum Messen zumindest einer Verbindungseigenschaft eines Werkstoffverbundes durchgeführt werden. Eine solche Messvorrichtung
15 weist zumindest eine Erwärmungsvorrichtung auf, mit der zumindest ein Element des Werkstoffverbundes oder eine Oberfläche zumindest eines Elementes des Werkstoffverbundes zumindest in einem Bereich erwärmbar ist. Die Messvorrichtung weist weiter eine Verformungs-Messvorrichtung auf, mit der eine aus der Erwärmung resultierende Verformung einer Oberfläche des Werkstoffverbundes messbar ist. Sie weist außerdem
20 eine Bestimmungsvorrichtung auf, mit der aus der gemessenen Verformung der Oberfläche die Verbindungseigenschaft bestimmbar ist.
25

Vorzugsweise ist hierbei sowohl die Verformungs-Messvorrichtung als auch die Erwärmungsvorrichtung über derjenigen Oberfläche angeordnet, deren Verformung
30 gemessen werden soll bzw. die erwärmt werden soll. Besonders bevorzugt ist jene Oberfläche, die erwärmt wird, auch jene Oberfläche, die gemessen wird. Es ist aber auch denkbar, dass eine andere Oberfläche erwärmt wird, als diejenige, die vermessen wird. So
35 kann insbesondere bei Laminaten die Vermessung an einer der erwärmten Oberfläche gegenüber liegenden

Oberfläche des Laminats durchgeführt werden.

Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren und der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist eine zerstörungsfreie, prozessintegrierte und orts aufgelöste Ermittlung von mechanischen Verbindungseigenschaften, wie Schubmodul und/oder Elastizitätsmodul, von Verbindungen bei Werkstoffverbunden, insbesondere Klebeverbindungen, möglich. Bei Klebeverbindungen können insbesondere Adhäsions- und Kohäsions-Eigenschaften auf der Basis thermomechanischer Effekte bestimmt werden.

Im Folgenden soll die Erfindung anhand von Figuren beispielhaft erläutert werden.

Dabei zeigt

Figur 1 einen Aufbau zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens,

Figur 2 eine Korrelationskurve,

Figur 3 ein shearografisch ermitteltes Verformungsbild,

Figur 4 Verformungen bei variierendem Elastizitätsmodul eines Klebstoffs und

Figur 5 Verformungen bei modifizierten Oberflächen eines Substrates.

Figur 1 zeigt einen erfindungsgemäßen Aufbau zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens. Hierbei wird als Werkstoffverbund ein Laminat 1 vermessen, welches zwei miteinander verbundene Elemente 1a und 1b aufweist, welche durch eine Klebeschicht 2

miteinander verbunden sind. Mittels einer Strahlungsquelle 7 wird Wärmestrahlung 3 auf eine Oberfläche 4 des Laminats 1 eingestrahlt. Die Wärmestrahlung 3 trifft hierbei auf einen Bereich 5 des Laminats 1, ruft also eine lokale Erwärmung des der Wärmequelle zugewandten Elementes 1a des Laminats 1 hervor. Gleichzeitig oder anschließend wird nun mittels einer Verformungs-Messvorrichtung 6 eine Verformung des Laminats 1 bzw. des erwärmten Elementes 1a bzw. dessen Oberfläche 4 gemessen.

Die Verformungsmessrichtung 6 ist hier eine Shearografievorrichtung, bei der mittels eines Lasers 8 die Oberfläche 4 des Laminats 1 beleuchtet wird, und mit einem Shearografiekopf 6 durch Verformung der Oberfläche 4 hervorgerufene Phasenänderungen gemessen werden.

In Figur 1 ist der Werkstoffverbund 1 im Zustand nach einer durch die Erwärmung hervorgerufenen Verformung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass jener Bereich 5, auf welchen die Wärmestrahlung 3 eingestrahlt wurde, verformt ist, wobei die jeweilige Out-of-plane-Verformung an der Stelle $x \Delta(x, y)$ beträgt, d.h. der maximale Abstand der verformten Oberfläche von der ursprünglichen Oberfläche, Δ beträgt. Aus dieser Verformungsfigur des Bereichs 5, kann nun die Verbindungseigenschaft bestimmt werden. Eine solche Verbindungseigenschaft kann beispielsweise ein Elastizitätsmodul oder ein Schubmodul sein. Mittels der Verformungsmessvorrichtung 6 ist einerseits die maximale Verformung Δ bestimmbar, es ist aber auch eine ortsaufgelöste Verformung der Oberfläche als $\Delta(x, y)$ bestimmbar, wobei x, y den Ort auf der Oberfläche des Elementes 1a angibt.

Die Form und Intensität dieser Durchbiegung kann in quantitativer Form vorteilhaft hochpräzise shearografisch erfasst und ausgewertet werden und direkt als Funktion der Parameter Laserintensität sowie Durchmesser des Laserstrahls, der geometrischen ebenso wie elastischen Eigenschaften des Substrats und des Klebstoffs beschrieben werden. Hier wird der Effekt ausgenutzt, dass in Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften des Klebstoffs im Adhäsions- sowie Kohäsionsbereich eine charakteristische Verformungsfigur auftritt. Bis auf Adhäsions- und Kohäsionseigenschaften sind in der Regel alle Parameter bekannt. Somit lassen sich die unbekanntes Adhäsions- und Kohäsionseigenschaften rechnerisch mittels numerischer Simulationen oder durch eine Korrelationsanalyse auf experimenteller Basis an Proben variierender Adhäsions- und Kohäsionseigenschaften wie oben dargestellt ermitteln. Da in der Regel die Kohäsionseigenschaften recht zuverlässig angesteuert werden können, liegt das Hauptaugenmerk in der Regel auf der Bestimmung von Adhäsionseigenschaften.

Die gezeigte Verformungs-Messvorrichtung 6 kann alternativ beispielsweise auch ein Speckle-Interferometer oder ein System zur Bildkorrelation sein.

Nicht gezeigt in Figur 1 ist eine Bestimmungsvorrichtung, mit welcher aus der gemessenen Verformung die gesuchte Verbindungseigenschaft bestimmbar ist. Mittels einer solchen Bestimmungsvorrichtung kann beispielsweise anhand einer experimentell oder numerisch ermittelten Korrelationskurve oder -funktion die mechanische Verbindungseigenschaft bestimmt werden. Diese Korrelationskurve beschreibt bevorzugt den quantitativen Zusammenhang zwischen gemessenen Verformungen und der zugehörigen mechanischen Verbin-

5 dungseigenschaft.

Figur 2 zeigt beispielhaft eine Korrelationskurve, die eine Korrelation zwischen dem E-Modul $E_{\text{Adhäsionszone}}$ in der Adhäsionszone und der maximalen Verformung w_{max} nach Erwärmung herstellt. Derartige Kurven können gemessen werden oder aus Simulationen hergeleitet werden.

10 Wird nun im erfindungsgemäßen Verfahren eine bestimmte Verformung w_{max} gemessen, so kann aus einer solchen Kurve die entsprechende Verbindungseigenschaft, in diesem Beispiel also das E-Modul, abgelesen werden.

15 Zur Verifizierung des erfindungsgemäßen Verfahrens wurden unterschiedlichste Proben bei variierendem Elastizitätsmodul des Klebstoffs untersucht. Die Adhäsionseigenschaften wurden gezielt modifiziert und die Proben einer mechanischen Belastung unterzogen.
20 Gleichzeitig wurden analoge numerische Simulationen nach der Methode der Finiten Elemente durchgeführt und zerstörende Referenzmessungen in Form von Zug-Scher-Versuchen durchgeführt.

25 Beispielhaft werden im Folgenden ausgewählte Ergebnisse von Untersuchungen einer Probe, bestehend aus einem Aluminiumsubstrat (100/25/2 mm) und einem PVC-Substrat (100/25/2 mm), welche mit Epoxidharz einer Stärke von 0,2 mm verklebt wurden, dargestellt. Hierbei wurde das PVC-Substrat so erwärmt, dass es nur innerhalb dieses Substrates zur Wärmeentwicklung kam.

Die Temperaturerhöhung an der Oberfläche betrug ca. 15 °C. Die resultierenden thermoelastisch hervorgerufenen Out-of-Plane-Verformungen wurden shearografisch
35 hochpräzise ermittelt. Figur 3 zeigt ein solches Ver-

formungsbild, das eine charakteristische lokale Ausbeulung im Bereich der erwärmten Zone mit maximalen Out-of-Plane-Verformungen w von wenigen Mikrometern aufweist.

5

Untersuchungen an Proben mit unterschiedlichen E-Moduln des Epoxidharzes zeigen, dass sich mit zunehmendem E-Modul höhere Verformungen einstellen. In Figur 4 ist der Verlauf der Out-of-Plane-Verformungen im Bereich der Ausbeulung für einen E-Modul von 1000 N/mm² bzw. 2000 N/mm² dargestellt. Bei qualitativ ähnlichem Verlauf der Verformungen stellen sich hier quantitativ bei einem höheren E-Modul deutlich höhere Out-of-Plane-Verformungen ein.

10

15

Zur gezielten Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Adhäsionseigenschaften auf das Verformungsverhalten wurden zwei Testreihen untersucht. Zum einen wurde die Oberfläche des PVC-Substrates mittels Ölverunreinigung und Anrauen modifiziert, zum anderen wurden Proben unterschiedlichen Zug-Scher-Spannungen unterzogen und simultan shearografische Untersuchungen durchgeführt. Figur 5 zeigt, dass sich unterschiedliche Modifikationen der Substratoberfläche deutlich auf das Verformungsverhalten auswirken. Mit zunehmender Verbesserung der mechanischen Eigenschaften stellen sich quantitativ deutlich höhere Out-of-Plane-Verformungen bei qualitativ ähnlichem Verlauf ein. Die mechanischen Eigenschaften wurden hierbei begleitend mittels Zug-Scher-Versuchen ermittelt.

20

25

30

Wird die Probe nun einer Zug-Scher-Belastung unterworfen, so kommt es mit zunehmender Belastung zu deutlichen Änderungen des thermoelastischen Verformungsverhaltens.

35

Patentansprüche

5

1. Verfahren zur Messung zumindest einer Verbindungseigenschaft eines Werkstoffverbundes, welcher zumindest zwei miteinander verbundene Elemente aufweist, wobei
10 zumindest eines der Elemente zumindest in einem Bereich erwärmt wird, eine hieraus resultierende Verformung einer Oberfläche des Werkstoffverbundes gemessen wird und aus der gemessenen Verformung die Verbindungseigenschaft bestimmt wird,
15 wobei die zumindest eine Verbindungseigenschaft ein Schubmodul und/oder ein Elastizitätsmodul an der Verbindungsstelle der zumindest zwei Elemente miteinander umfasst.
2. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch,
20 dadurch gekennzeichnet, dass zumindest eines der Elemente, welches nur einseitig mit anderen Elementen des Werkstoffverbundes verbunden ist, flächig ausgebildet ist und als die Verformung eine Verformung der dem Werkstoffverbund abgewandten Oberfläche dieses flächigen Elementes
25 gemessen wird.
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
30 dadurch gekennzeichnet, dass die Erwärmung eine lokale Erwärmung der Oberfläche des Werkstoffverbundes, deren Verformung gemessen wird, ist, die bevorzugt mittels elektromagnetischer Strahlung bewirkt wird.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass die Messung der
Verformung der Oberfläche mittels, vorzugsweise
5 digitaler, Speckle-Interferometrie,
Bildkorrelation und/oder Shearographie erfolgt.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass die Verbindungsei-
10 genschaft aus der gemessenen Verformung mittels
zumindest einer Korrelation, vorzugsweise zumin-
dest einer Korrelationsfunktion bestimmt wird,
wobei die Korrelation oder Korrelationsfunktion
15 durch Messung und/oder Simulation von Verformun-
gen bei unterschiedlichen Werten der entspre-
chenden Verbindungseigenschaft ermittelt wurde.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass die zumindest eine
20 Verbindungseigenschaft eines Werkstoffverbundes
gemessen wird, dessen zumindest zwei miteinander
verbundene Elemente durch Kleben miteinander
verbunden sind und die Verbindungseigenschaft
eine Eigenschaft der Klebeverbindung ist.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass die Messung der
Verformung der Oberfläche an einem oder mehreren
25 Punkten der Oberfläche oder orts aufgelöst er-
folgt.
8. Messvorrichtung zum Messen zumindest einer Ver-
bindungseigenschaft eines Werkstoffverbundes,
welcher zumindest zwei miteinander verbundene
- 30

Elemente aufweist, aufweisend:

5 zumindest eine Erwärmungsvorrichtung, mit der
zumindest ein Element des Werkstoffverbundes zu-
mindest in einem Bereich erwärmbar ist und
zumindest eine Verformungs-Messvorrichtung, mit
der eine aus der Erwärmung resultierende Verfor-
mung einer Oberfläche des Werkstoffverbundes
messbar ist, sowie

10 einer Bestimmungsvorrichtung, mit der aus der
gemessenen Verformung der Oberfläche die Verbin-
dungseigenschaft bestimmbar ist,

wobei die zumindest eine Verbindungseigenschaft
ein Schubmodul und/oder ein Elastizitätsmodul an
der Verbindungsstelle der zumindest zwei Elemen-
15 te miteinander umfasst.

9. Messvorrichtung nach dem vorhergehenden An-
spruch,
dadurch gekennzeichnet, dass mit der Messvor-
richtung ein Verfahren nach einem der Ansprüche
20 1 bis 7 durchführbar ist.

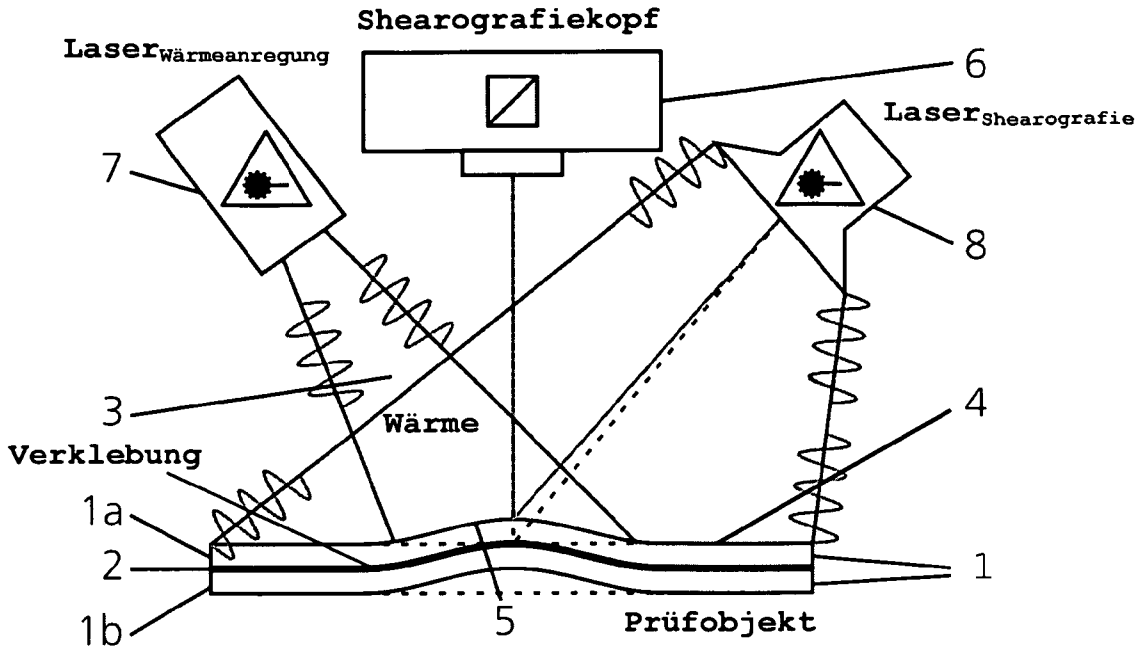


Fig. 1

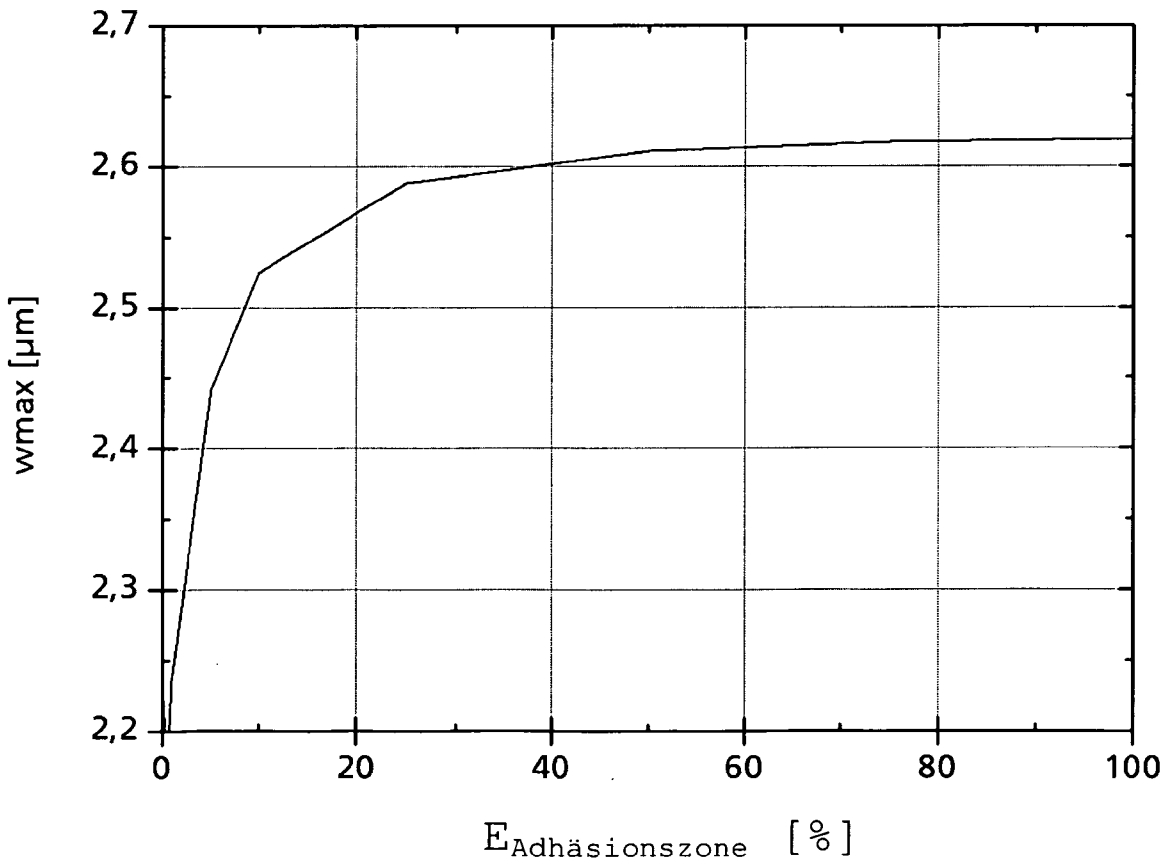
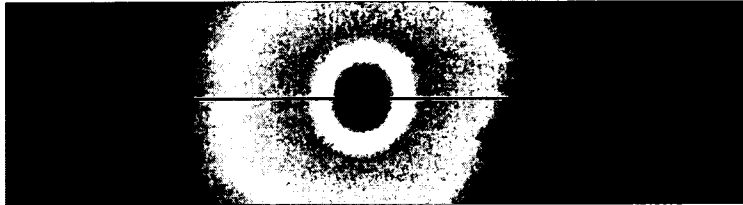
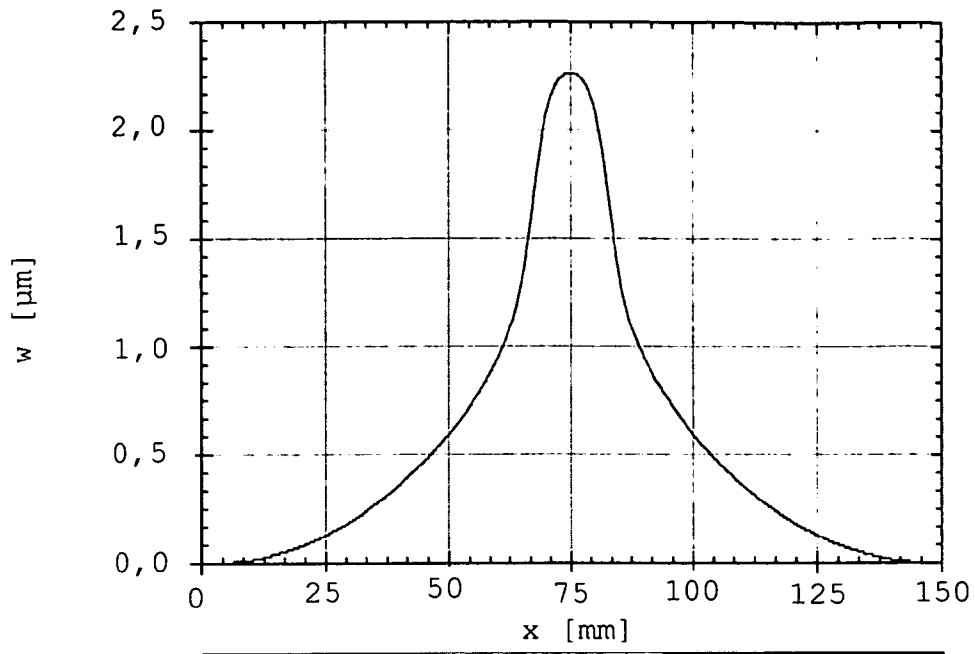
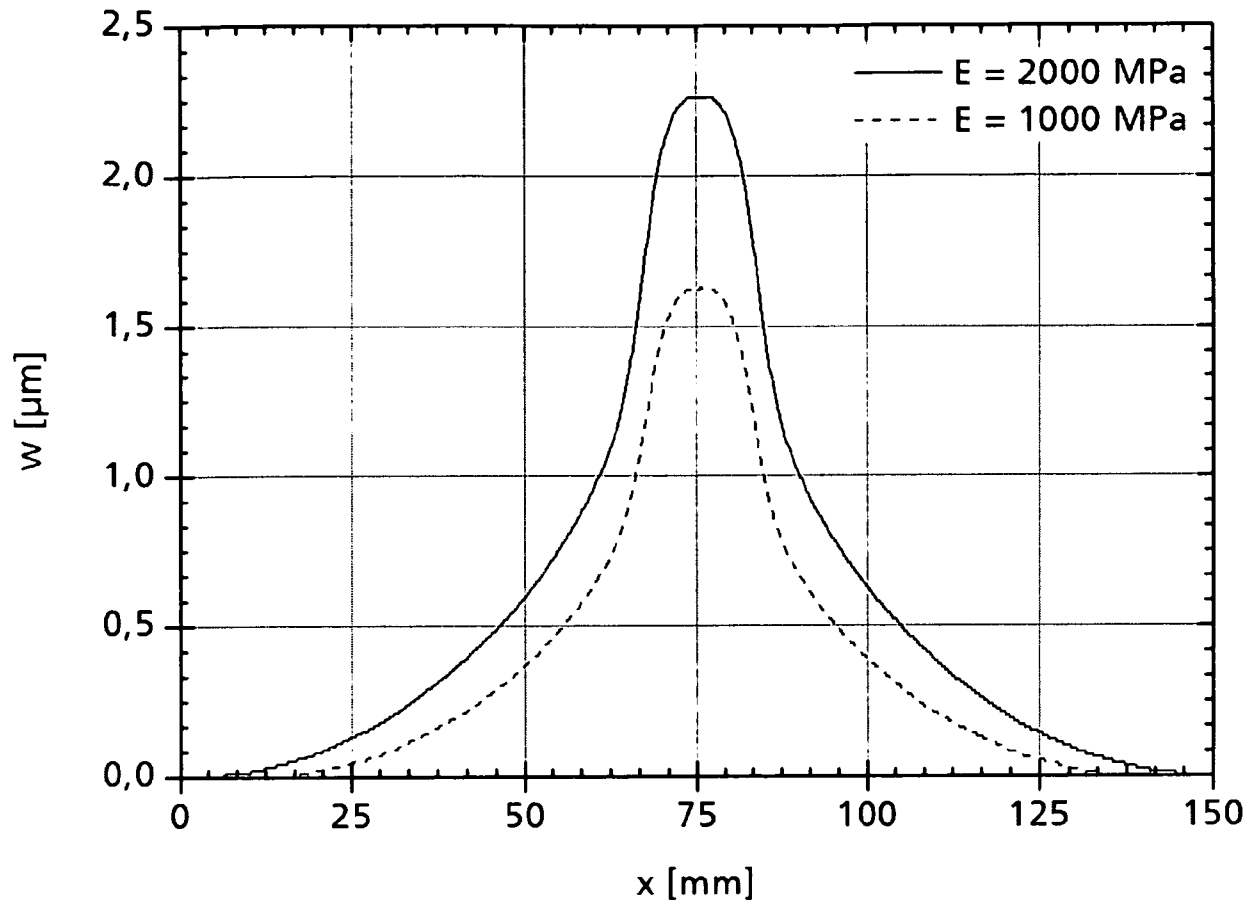


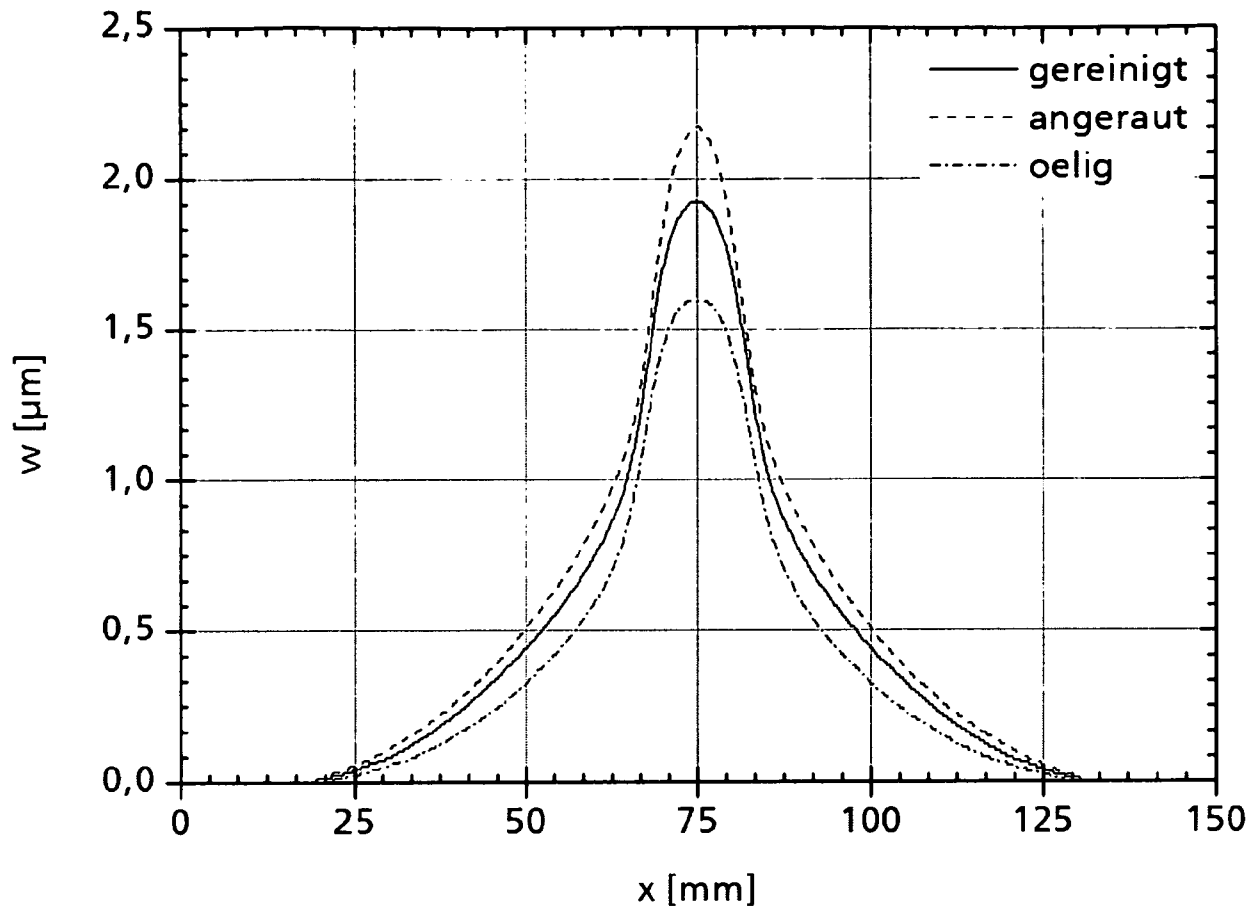
Fig. 2



ERSATZBLATT (REGEL 26)

Fig. 3

**Fig. 4**

**Fig. 5**