



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2015 114 855.2**

(22) Anmeldetag: **04.09.2015**

(43) Offenlegungstag: **09.03.2017**

(51) Int Cl.: **G01N 29/07 (2006.01)**

**G01N 29/11 (2006.01)**

**G01N 29/265 (2006.01)**

(71) Anmelder:

**Dr. Ing. h.c. F. Porsche Aktiengesellschaft, 70435  
Stuttgart, DE**

(72) Erfinder:

**Schmitt, Stephan, Dr., 70195 Stuttgart, DE;  
Reimann, Tim, 04655 Kohren-Sahlis, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

**DE 196 40 859 A1**

**US 2010 / 0 312 493 A1**

**EP 1 890 140 A1**

Rechercheantrag gemäß § 43 Abs. 1 Satz 1 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Erfassung von Schädigungen eines Kunststoff-Metall- oder Metall-Metall-Verbundbauteils**

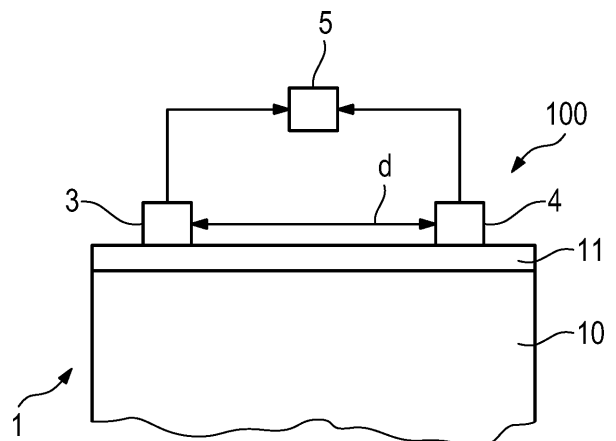
(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Erfassung von Schädigungen eines Kunststoff-Metall- oder Metall-Metall-Verbundbauteils (1), umfassend die Schritte

a) Anordnen eines Ultraschallsendermittels (3) und eines davon beabstandeten Ultraschallempfängermittels (4) auf einer Oberflächenschicht (11) des Verbundbauteils (1),

b) Erzeugen von gepulsten Ultraschalloberflächenwellen in der Oberflächenschicht des Verbundbauteils (1) mittels des Ultraschallsendermittels (3),

c) Erfassen der Laufzeiten der gepulsten Ultraschalloberflächenwellen von dem Ultraschallsendermittel (3) zu dem Ultraschallempfängermittel (4),

d) Vergleichen der erfassten Laufzeiten mit einer Referenzlaufzeit der gepulsten Ultraschalloberflächenwellen in einer Oberflächenschicht (11) eines ungeschädigten Verbundbauteils (1).



**Beschreibung**

**[0001]** Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Erfassung von Schädigungen eines Kunststoff-Metall- oder Metall-Metall-Verbundbauteils.

**[0002]** Kunststoff-Metall-Verbundbauteile und Metall-Metall-Verbundbauteile werden zum Beispiel durch Verbundgießen hergestellt. Dabei wird ein Kunststoff- oder Metallsubstrat mit einer metallischen Schmelze umgossen, so dass sich eine Oberflächenschicht bildet. Durch die Einwirkung der Gießhitze kann es infolge einer thermischen Überlastung zu einer Schädigung beziehungsweise zu einer Veränderung der Eigenschaften der temperatursensitiven Werkstoffkomponenten derartiger Kunststoff-Metall-Verbundbauteile oder Metall-Metall-Verbundbauteile kommen. Dabei ändern sich infolge einer fortschreitenden Vernetzung bei Kunststoffen sowie einer Zersetzung oder strukturellen Änderung bei Kunststoffen und Metallen die mechanischen Eigenschaften dieser Werkstoffe. Daraus resultiert ebenfalls eine Änderung der mechanischen Eigenschaften der Kunststoff-Metall-Verbundbauteile beziehungsweise Metall-Metall-Verbundbauteile.

**[0003]** Die Qualität von Kunststoff-Metall-Verbundbauteilen oder Metall-Metall-Verbundbauteilen kann zum Beispiel mit Hilfe so genannter metallographischer Schliffe beurteilt werden. Dabei handelt es sich nicht um ein zerstörungsfreies Prüfverfahren. Überdies hat sich die Auswertung metallographischer Schliffe häufig als schwierig und ungenau erwiesen. Ringversuche zeigen, dass die Ergebnisse häufig weder reproduzierbar, noch unmittelbar miteinander vergleichbar sind.

**[0004]** Weitere gängige Untersuchungsverfahren, mittels derer Schädigungen eines Kunststoff-Metall-Verbundbauteils oder Metall-Metall-Verbundbauteils untersucht werden können, sind die dynamische Differenzkalometrie, bei der Schmelz-, Umwandlungs-, Zersetzungs- und Vernetzungsenthalpien gemessen werden oder dynamisch mechanische Analysen. Im Rahmen dynamisch mechanischer Analysen wird das mechanische Antwortverhalten eines Verbundbauteils unter dem Einfluss einer sich zeitlich ändernden sinusförmigen mechanischen Belastung zeit-, temperatur- und/oder frequenzabhängig erfasst.

**[0005]** Aus der US 2006/0201252 A1 ist ein Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Faserverbundbauteilen, Metallen oder Polymeren bekannt, bei dem die zu untersuchenden Werkstücke mittels Ultraschallwellen durchstrahlt werden.

**[0006]** Aus der EP 2 551 658 A2 ist ein bildgebendes Verfahren zur Untersuchung von Turbinenschaufeln mittels Ultraschall, Computertomographie oder Lami-

nographie bekannt. Durch eine schichtweise Abtastung erfolgt eine Fehlerdetektion und Aufbauanalyse.

**[0007]** Die vorliegende Erfindung macht es sich zur Aufgabe, ein Verfahren zur Erfassung von Schädigungen eines Kunststoff-Metall- oder Metall-Metall-Verbundbauteils bereitzustellen, das eine schnelle, kostengünstige und zerstörungsfreie Analyse unterschiedlicher Schädigungsarten des Verbundbauteils ermöglicht.

**[0008]** Die Lösung dieser Aufgabe liefert ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1. Eine alternative Lösung dieser Aufgabe ist Gegenstand des Anspruchs 6. Die Unteransprüche betreffen vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung.

**[0009]** Gemäß Anspruch 1 umfasst ein Verfahren zur Detektion von Schädigungen eines Kunststoff-Metall- oder Metall-Metall-Verbundbauteils gemäß einer ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung die Schritte

- a) Anordnen eines Ultraschallsendermittels und eines davon beabstandeten Ultraschallempfängermittels auf einer Oberflächenschicht des Verbundbauteils,
- b) Erzeugen von gepulsten Ultraschalloberflächenwellen in der Oberflächenschicht des Verbundbauteils mittels des Ultraschallsendermittels,
- c) Erfassen der Laufzeiten der gepulsten Ultraschalloberflächenwellen von dem Ultraschallsendermittel zu dem Ultraschallempfängermittel,
- d) Vergleichen der erfassten Laufzeiten mit einer Referenzlaufzeit der gepulsten Ultraschalloberflächenwellen in einer Oberflächenschicht eines ungeschädigten Verbundbauteils.

**[0010]** Dem erfindungsgemäßen Verfahren liegt die Idee zugrunde, dass zum Beispiel Delaminationen der Oberflächenschicht, Veränderungen des Vernetzungsgrades, thermische Zersetzungen, Risse sowie andere Formen thermischer und/oder mechanischer Schädigungen einen unmittelbaren Einfluss auf die Ausbreitung und damit auch auf die Laufzeit der gepulsten Ultraschalloberflächenwellen innerhalb des Verbundbauteils haben. Durch einen Vergleich der erfassten Laufzeiten mit einer Referenzlaufzeit der gepulsten Ultraschalloberflächenwellen in einer idealen, ungeschädigten Oberflächenschicht eines Kunststoff-Metall- oder Metall-Metall-Verbundbauteils lassen sich Rückschlüsse darauf ziehen, ob Schädigungen in dem Verbundbauteil vorhanden sind oder nicht. Das Ausmaß der Änderungen der Laufzeiten ermöglicht ebenfalls eine Abschätzung des Ausmaßes der Schädigungen. Das erfindungsgemäße Verfahren lässt sich relativ einfach und mit einem geringen Zeit- und Kostenaufwand durchführen. Vorteilhaft ist ferner, dass es sich um ein zerstörungsfreies Prüfverfahren handelt, welches das zu untersuchende Verbundbauteil

nicht beschädigt. Das Verfahren ist für die Untersuchung von Kunststoff-Metall-Verbundbauteilen oder Metall-Metall-Verbundbauteilen in unterschiedlichen Formen und Größen geeignet. Überdies ist es unabhängig von der chemischen Zusammensetzung der Verbundbauteile einsetzbar. Untersucht werden können Kunststoffe, verstärkte Kunststoffe (zum Beispiel kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe oder glasfaserverstärkte Kunststoffe) sowie Metalle und deren Legierungen. Ein stationärer Messaufbau ist für die Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens nicht erforderlich, so dass auch Vor-Ort-Messungen durchgeführt werden können.

**[0011]** Um Tiefeninformationen erhalten zu können, wird in einer bevorzugten Ausführungsform vorgeschlagen, dass Laufzeitmessungen bei unterschiedlichen Frequenzen der gepulsten Ultraschalloberflächenwellen durchgeführt werden. Da durch eine Änderung der Frequenz auch die Eindringtiefe der gepulsten Ultraschalloberflächenwellen verändert wird, ist es mittels des hier beschriebenen Verfahrens möglich festzustellen, in welcher Tiefe Störungen vorhanden sind und wie weit sie sich in das Innere des Verbundbauteils fortpflanzen. Ferner können dadurch auch Delaminationen der Oberflächenschicht von dem Substrat erfasst werden. Vorzugsweise wird dabei so vorgegangen, dass die Frequenzen der gepulsten Ultraschalloberflächenwellen sukzessive verringert werden. Dadurch wird die Eindringtiefe von der Oberflächenschicht des Verbundbauteils aus betrachtet sukzessive erhöht.

**[0012]** In einer besonders vorteilhaften Ausführungsform wird vorgeschlagen, dass die Verfahrensschritte c) und d) mit einer Messeinrichtung automatisiert durchgeführt werden. Diese Verfahrensschritte können somit vorteilhaft ohne einen Eingriff eines Bedienpersonals ausgeführt werden.

**[0013]** Vorzugsweise kann eine Mehrzahl von Referenzlaufzeiten in Speichermitteln der Messeinrichtung abrufbar gespeichert werden. Eine automatisierte Auswertung der Messergebnisse wird auf diese Weise erleichtert. Insbesondere können in den Speichermitteln Referenzlaufzeiten für unterschiedliche Werkstoffe abrufbar gespeichert werden.

**[0014]** Gemäß Anspruch 6 umfasst ein Verfahren zur Detektion von Schädigungen eines Kunststoff-Metall- oder Metall-Metall-Verbundbauteils gemäß einer zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung die Schritte

- a) Anordnen eines Ultraschallsendermittels und eines davon beabstandeten Ultraschallempfängermittels auf einer Oberflächenschicht des Verbundbauteils,
- b) Erzeugen einer kontinuierlichen Ultraschalloberflächenwelle in der Oberflächenschicht des

Verbundbauteils mittels des Ultraschallsendermittels,

c) Erfassen der Schwingung der kontinuierlichen Ultraschalloberflächenwelle mittels des Ultraschallempfängermittels,

d) Ändern und Erfassen eines Abstands zwischen dem Ultraschallsendermittel und dem Ultraschallempfängermittel,

e) Bestimmen einer Phasenverschiebung zwischen einer kontinuierlichen Erregerschwingung des Ultraschallsendermittels und einer mittels des Ultraschallempfängermittels erfassten Schwingung der kontinuierlichen Ultraschalloberflächenwelle,

f) Berechnen einer Schallgeschwindigkeit aus dem erfassten Abstand zwischen dem Ultraschallsendermittel und dem Ultraschallempfängermittel, der Phasenverschiebung und einer Frequenz der kontinuierlichen Ultraschalloberflächenwelle,

g) Vergleichen der berechneten Schallgeschwindigkeit mit einer Referenzschallgeschwindigkeit der kontinuierlichen Ultraschalloberflächenwelle in einer Oberflächenschicht eines ungeschädigten Verbundbauteils.

**[0015]** Diese zweite Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens geht ebenfalls von der Erkenntnis aus, dass zum Beispiel Delaminationen der Oberflächenschicht, Veränderungen des Vernetzungsgrades, thermische Zersetzungen, Risse sowie andere Formen thermischer und/oder mechanischer Schädigungen einen unmittelbaren Einfluss auf die Ausbreitung und damit auch auf die Schallgeschwindigkeit einer kontinuierlichen Ultraschalloberflächenwelle haben. Anders als bei dem Verfahren gemäß Anspruch 1 wird die Oberflächenschicht des Verbundbauteils nunmehr mit einer kontinuierlichen Ultraschalloberflächenwelle und nicht mit gepulsten Ultraschalloberflächenwellen beaufschlagt. Dem Verfahren liegt darüber hinaus die Erkenntnis zugrunde, dass eine Änderung des Abstands zwischen dem Ultraschallsendermittel und dem Ultraschallempfängermittel durch Verschieben des Ultraschallempfängermittels oder alternativ durch Verschieben des Ultraschallsendermittels die Phasenverschiebung zwischen den Schwingungen des Ultraschallsendermittels und des Ultraschallempfängermittels verändert. Dabei entspricht eine Phasenverschiebung von  $2\pi$  (d.h. ein kompletter Phasenumlauf) einer Verschiebung um eine Wellenlänge  $\lambda$  der Ultraschalloberflächenwelle. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit wird der Abstand zwischen dem Ultraschallsendermittel und dem Ultraschallempfängermittel vorzugsweise so weit verändert, bis die gesamte Phasenverschiebung einem Vielfachen eines kompletten Phasenumlaufs entspricht. Indem die gesamte gemessene Verschiebestrecke des Ultraschallempfängermittels beziehungsweise des Ultraschallsendermittels durch die Anzahl der Phasenumläufe dividiert wird, wird ein Mittelwert der Wellenlänge der kontinuierlichen Ultra-

schalloberflächenwelle erhalten. Der auf diese Weise erhaltene Mittelwert der Wellenlänge  $\lambda$  kann dann zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit  $c$  nach der bekannten mathematischen Beziehung

$$c = \lambda \cdot f$$

verwendet werden, wobei  $f$  die Frequenz der kontinuierlichen Ultraschalloberflächenwelle ist. Durch einen Vergleich der erfassten Schallgeschwindigkeit mit einer Referenzschallgeschwindigkeit einer idealen, ungeschädigten Oberflächenschicht des Kunststoff-Metall- oder Metall-Metall-Verbundbauteils lässt sich auch mittels dieses Verfahrens darauf schließen, dass Schädigungen innerhalb der Oberflächenschicht des Verbundbauteils vorhanden sind. Das Ausmaß der Änderungen der Schallgeschwindigkeit ermöglicht ebenfalls eine Abschätzung des Ausmaßes der Schädigungen. Auch diese Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens lässt sich relativ einfach mit einem geringen Zeit- und Kostenaufwand durchführen. Vorteilhaft ist ferner, dass es sich auch hierbei um ein zerstörungsfreies Prüfverfahren handelt, das das Verbundbauteil nicht beschädigt. Die zweite Variante des Verfahrens ist ebenfalls für die Untersuchung von Kunststoff-Metall- oder Metall-Metall-Verbundbauteilen in unterschiedlicher Form und Größe geeignet. Überdies ist es unabhängig von der chemischen Zusammensetzung des Verbundbauteils anwendbar. Untersucht werden können Kunststoffe, verstärkte Kunststoffe (zum Beispiel kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe oder glasfaserverstärkte Kunststoffe) sowie Metalle und deren Legierungen. Ein stationärer Messaufbau ist nicht erforderlich, so dass auch Vor-Ort-Messungen durchgeführt werden können.

**[0016]** Um auch bei dieser zweiten Verfahrensvariante Tiefeninformationen über mögliche Schädigungen erhalten zu können, wird in einer bevorzugten Ausführungsform vorgeschlagen, dass die Frequenz der kontinuierlichen Ultraschalloberflächenwelle variiert wird. Wie oben bereits erläutert, führt eine Änderung der Frequenz auch zu einer veränderten Eindringtiefe der Ultraschalloberflächenwelle in das Verbundbauteil. Daher kann mittels des hier beschriebenen Verfahrens durch einfache Frequenz- und damit Wellenlängenänderungen festgestellt werden, in welcher Tiefe Störungen vorhanden sind und wie weit sich diese innerhalb des Verbundbauteils fortpflanzen. Das Verfahren ermöglicht ebenfalls die Erfassung von Delaminationen der Oberflächenschicht von dem Substrat.

**[0017]** Vorzugsweise kann die Frequenz der kontinuierlichen Ultraschalloberflächenwelle sukzessive verringert werden. Dadurch wird eine systematische Untersuchung des Verbundbauteils von außen nach innen ermöglicht.

**[0018]** In einer besonders bevorzugten Ausführungsform wird vorgeschlagen, dass zumindest die Verfahrensschritte e) bis g) mit einer Messeinrichtung automatisiert durchgeführt werden. Dadurch kann der Messaufwand für das Bedienpersonal in vorteilhafter Weise verringert werden. Vorzugsweise kann der Abstand zwischen dem Ultraschallempfängeremittel und dem Ultraschallsenderemittel automatisiert verändert und zum Beispiel mittels einer Wegmessvorrichtung automatisiert bestimmt werden.

**[0019]** Vorzugsweise kann eine Mehrzahl von Referenzschallgeschwindigkeiten in Speichermitteln der Messeinrichtung abrufbar gespeichert werden. Dadurch kann die Auswertung der Messergebnisse weiter vereinfacht werden. Insbesondere können in den Speichermitteln Referenzschallgeschwindigkeiten für unterschiedliche Materialien abrufbar gespeichert werden.

**[0020]** Weitere Merkmale und Vorteile der vorliegenden Erfindung werden deutlich anhand der nachfolgenden Beschreibung bevorzugter Ausführungsbeispiele unter Bezugnahme auf die beiliegenden Abbildungen. Dabei zeigen

**[0021]** Fig. 1 eine schematisch stark vereinfachte Darstellung eines Messaufbaus, der zur Durchführung eines Verfahrens zur Erfassung von Schädigungen eines Kunststoff-Metall- oder Metall-Metall-Verbundbauteils gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung eingerichtet ist,

**[0022]** Fig. 2 eine schematisch stark vereinfachte Darstellung eines Messaufbaus, der zur Durchführung eines Verfahrens zur Erfassung von Schädigungen eines Kunststoff-Metall- oder Metall-Metall-Verbundbauteils gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung eingerichtet ist.

**[0023]** Ein Kunststoff-Metall- oder Metall-Metall-Verbundbauteil **1**, das mittels der in Fig. 1 und Fig. 2 dargestellten Messaufbauten **100**, **200** untersucht werden kann, weist ein Substrat **10** aus Kunststoff oder Metall auf, welches zum Beispiel durch Verbundgießen mit einer metallischen Schmelze umgossen wird, so dass eine Oberflächenschicht **11** aus Metall auf dem Substrat **10** erhalten wird.

**[0024]** Unter Bezugnahme auf Fig. 1 umfasst ein erster Messaufbau **100** zur Erfassung von Schädigungen des Kunststoff-Metall- oder Metall-Metall-Verbundbauteils **1** ein Ultraschallsenderemittel **3** und ein Ultraschallempfängeremittel **4**. Das Ultraschallsenderemittel **3** ist an einer ersten Position auf der Oberflächenschicht **11** des Verbundbauteils **1** angeordnet. Das Ultraschallempfängeremittel **4** ist an einer zweiten Position auf der Oberflächenschicht **11** des Verbundbauteils **1** angeordnet. Ein Abstand  $d$  zwischen dem Ultraschallsenderemittel **3** und dem Ultraschall-

empfängermittel **4** ist dabei fest und wird während der Durchführung des Verfahrens nicht verändert.

**[0025]** Das Ultraschallsendermittel **3** ist so ausgebildet, dass es gepulste Ultraschalloberflächenwellen in der Oberflächenschicht **11** des Verbundbauteils **1** erzeugen kann. Diese gepulsten Ultraschalloberflächenwellen breiten sich durch die Oberflächenschicht **11** aus und werden von dem Ultraschallempfängermittel **4** empfangen. Die Laufzeiten  $t_{\text{Puls}}$  der gepulsten Ultraschalloberflächenwellen, die für die Ausbreitung vom Ultraschallsendermittel **3** zum Ultraschallempfängermittel **4** benötigt werden, werden mittels einer Messeinrichtung **5** bestimmt. Es zeigt sich, dass zum Beispiel Veränderungen des Vernetzungsgrades, thermische Zersetzungen, Risse sowie andere Formen thermischer und/oder mechanischer Schädigungen, die herstellungsbedingt in dem Verbundbauteil **1** vorhanden sein können, einen unmittelbaren Einfluss auf die Laufzeiten  $t_{\text{Puls}}$  der gepulsten Ultraschalloberflächenwellen haben. Entsprechendes gilt auch bei einer zumindest abschnittswisen Delamination der Oberflächenschicht **11** von dem Substrat **10**, die sich ebenfalls auf die Laufzeiten  $t_{\text{Puls}}$  der gepulsten Ultraschalloberflächenwellen auswirkt. Elastische und inelastische Eigenschaften des Verbundbauteils **1**, die zum Beispiel durch Veränderungen des Vernetzungsgrades, thermische Zersetzungen, Risse oder eine Delamination der Oberflächenschicht **11** verändert werden, haben einen messbaren Einfluss auf die Ausbreitung des Ultraschalls. Die Laufzeiten  $t_{\text{Puls}}$  der gepulsten Ultraschalloberflächenwellen ändern sich im Vergleich zu einem idealen, ungeschädigten Verbundbauteil **1**, dessen Oberflächenschicht **11** keinerlei Risse, thermische Zersetzungen, Delaminationen oder sonstige Störungen aufweist. Durch einen Vergleich der gemessenen Laufzeiten  $t_{\text{Puls}}$  der gepulsten Ultraschalloberflächenwellen mit einer Laufzeit, die in einer idealen Oberflächenschicht **11** zu erwarten ist, lässt sich darauf schließen, ob in der Oberflächenschicht **11** des Kunststoff-Metall- oder Metall-Metall-Verbundbauteils **1** Störungen vorhanden sind oder nicht. Ferner ist es möglich, eine zumindest abschnittsweise Delamination der Oberflächenschicht **11** von dem Substrat **10** zu erfassen.

**[0026]** Durch eine Änderung der Frequenz der gepulsten Ultraschalloberflächenwellen kann die Eindringtiefe variiert werden, da mit der Frequenzänderung auch eine Wellenlängenänderung einhergeht. Dadurch ist es möglich, die Oberflächenschicht **11** in unterschiedlichen Schichttiefen zu untersuchen und Änderungen der Laufzeiten  $t_{\text{Puls}}$  der gepulsten Ultraschalloberflächenwellen tiefenabhängig nachzuweisen. Auf diese Weise kann in vorteilhafter Weise festgestellt werden, in welcher Schichttiefe Störungen vorliegen und/oder wie weit sich diese in die Tiefe fortpflanzen. Bei Kenntnis der Dicke der Oberflächenschicht **11** kann durch eine geeignete Wahl der Frequenz die Grenzfläche zwischen der Oberflächen-

schicht **11** und dem Substrat **10** untersucht werden, um auf diese Weise eine mögliche Delamination der Oberflächenschicht **11** nachzuweisen.

**[0027]** Das vorstehend beschriebene Verfahren ermöglicht eine einfache und kostengünstige Überprüfung von Schichteigenschaften der Oberflächenschicht **11** des Kunststoff-Metall- oder Metall-Metall-Verbundbauteils **1**, insbesondere im Hinblick auf Schädigungen durch Veränderungen des Vernetzungsgrades, thermische Zersetzungen, Risse sowie andere Formen thermischer und/oder mechanischer Schädigungen oder durch eine Delamination der Oberflächenschicht **11** von dem Substrat **10**. Das Verfahren ist unabhängig von der Form und Größe des Kunststoff-Metall- oder Metall-Metall-Verbundbauteils **1** einsetzbar und hat den besonderen Vorteil, dass es zerstörungsfreie Untersuchungen ermöglicht. Ein stationärer Messaufbau **100** ist für die Durchführung des Verfahrens nicht erforderlich. Der Messaufbau eignet sich somit auch für Vor-Ort-Messungen. Für zahlreiche Anwendungszwecke liefert dieses Verfahren eine ausreichend hohe Messgenauigkeit. Die Messeinrichtung **5** kann vorzugsweise so ausgebildet sein, dass sie die Messungen automatisch durchführen und auswerten kann. Die Referenzlaufzeiten, mit denen die gemessenen Laufzeiten verglichen werden, sind vorzugsweise in Speichermiteln der Messeinrichtung **5** abrufbar gespeichert.

**[0028]** Unter Bezugnahme auf **Fig. 2** soll nachfolgend ein zweiter Messaufbau **200** näher erläutert werden, der zur Durchführung eines Verfahrens zur Erfassung von Schädigungen eines Kunststoff-Metall- oder Metall-Metall-Verbundbauteils **1** gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung eingerichtet ist. Dieses Verfahren zeichnet sich in erster Linie dadurch aus, dass zum Beispiel eine Delamination, Veränderungen des Vernetzungsgrades, thermische Zersetzungen, Risse sowie andere Formen thermischer und/oder mechanischer Schädigungen in der Oberflächenschicht **11** mit höherer Genauigkeit erfasst werden können.

**[0029]** Der Messaufbau **200** umfasst wiederum ein Ultraschallsendermittel **6** sowie ein Ultraschallempfängermittel **7**. Das Ultraschallsendermittel **6** ist ortsfest an einer ersten Position auf der Oberflächenschicht **11** angeordnet. Das Ultraschallempfängermittel **7** ist an einer zweiten Position auf der Oberflächenschicht **11** angeordnet. Anders als im ersten Ausführungsbeispiel kann der Abstand  $d$  zwischen dem Ultraschallsendermittel **6** und dem Ultraschallempfängermittel **7** jedoch variiert werden. Zu diesem Zweck ist das Ultraschallempfängermittel **7** an eine Verschiebeeinrichtung **8** angeschlossen, die so ausgebildet ist, dass sie das Ultraschallempfängermittel **7** entweder in Richtung des Ultraschallsendermittels **6** oder von dem Ultraschallsendermittel **6** weg verschieben kann. Ferner ist eine Wegmessvorrichtung

**9** vorgesehen, die dazu ausgebildet ist, die durch die Verschiebung des Ultraschallempfängermediums **7** hervorgerufene Änderung des Abstands  $d$  zwischen dem Ultraschallsendermedium **6** und dem Ultraschallempfängermedium **7** zu messen. Die Wegmessvorrichtung **9** ist vorliegend in die Verschiebeeinrichtung **8** integriert. Alternativ können die Wegmessvorrichtung **9** und die Verschiebeeinrichtung **8** auch zwei separate Komponenten des Messaufbaus **200** sein. Grundsätzlich ist es auch möglich, den Aufbau umzukehren und das Ultraschallempfängermedium **7** ortsfest auf der Oberflächenschicht **11** anzuordnen und das Ultraschallsendermedium **6** mittels der Verschiebeeinrichtung **8** verschiebbar zu gestalten.

**[0030]** Anders als im ersten Ausführungsbeispiel ist das Ultraschallsendermedium **6** so ausgebildet, dass es eine kontinuierliche Ultraschalloberflächenwelle in der Oberflächenschicht **11** erzeugen kann. Diese kontinuierliche Ultraschalloberflächenwelle breitet sich durch die Oberflächenschicht **11** aus und wird von dem Ultraschallempfängermedium **7** empfangen.

**[0031]** Der Messaufbau **200** weist eine Messeinrichtung **20** auf, die an das Ultraschallsendermedium **6** und an das Ultraschallempfängermedium **7** angeschlossen ist. Die Wegmessvorrichtung **9** ist an die Messeinrichtung **20** angeschlossen. Die Verschiebeeinrichtung **8** kann optional ebenfalls an die Messeinrichtung **20** angeschlossen sein, um insbesondere eine automatisierte Verschiebung des Ultraschallempfängermediums **7**, die vorteilhaft durch die Messeinrichtung **20** gesteuert werden kann, zu ermöglichen. Die Schwingungen des Ultraschallsendermediums **6** und des Ultraschallempfängermediums **7** bilden Eingangsgrößen für die Messeinrichtung **20** und werden in diese eingespeist. Die Messeinrichtung **20** ist so ausgebildet, dass die Phasenlage zwischen den Schwingungen des Ultraschallsendermediums **6** und des Ultraschallempfängermediums **7** erfasst werden kann. Durch eine Änderung des Abstands  $d$  zwischen dem Ultraschallsendermedium **6** und dem Ultraschallempfängermedium **7** durch Verschieben des Ultraschallempfängermediums **7** ändert sich die Phasenverschiebung zwischen den beiden Schwingungen. Dabei entspricht eine Phasenverschiebung von  $2\pi$  (d.h. ein kompletter Phasenumlauf) einer Verschiebung des Ultraschallempfängermediums **7**, die mit Hilfe der Wegmessvorrichtung **9** erfasst werden kann, um eine Wellenlänge  $\lambda$  der Ultraschalloberflächenwelle. Die Messeinrichtung **20** kann vorteilhaft ein Anzeigemittel **21** umfassen, um die Schwingungen des Ultraschallsendermediums **6** und des Ultraschallempfängermediums **7** für einen Benutzer zu visualisieren.

**[0032]** Zur Erhöhung der Messgenauigkeit wird das Ultraschallempfängermedium **7** vorzugsweise so weit verschoben, bis die gesamte Phasenverschiebung einem Vielfachen eines kompletten Phasenumlaufs entspricht. Indem die gesamte gemessene Verschie-

bestrecke des Ultraschallempfängermediums **7** durch die Anzahl der Phasenumläufe dividiert wird, wird ein Mittelwert der Wellenlänge der kontinuierlichen Ultraschalloberflächenwelle erhalten. Der auf diese Weise erhaltene Mittelwert der Wellenlänge  $\lambda$  kann zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit  $c$  nach der bekannten mathematischen Beziehung

$$c = \lambda \cdot f$$

verwendet werden, wobei  $f$  die Frequenz der kontinuierlichen Ultraschalloberflächenwelle ist.

**[0033]** Störungen innerhalb der Oberflächenschicht **11**, die zum Beispiel durch Veränderungen des Vernetzungsgrades, thermische Zersetzungen, Risse sowie andere Formen thermischer und/oder mechanischer Schädigungen oder durch eine zumindest abschnittsweise Delamination der Oberflächenschicht **11** von dem Substrat **10** hervorgerufen werden, haben einen unmittelbaren Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit der kontinuierlichen Ultraschalloberflächenwelle. Die experimentell bestimmte Schallgeschwindigkeit wird nun mit einer Referenzschallgeschwindigkeit verglichen, wie sie bei einer idealen Oberflächenschicht **11** ohne Delamination, Veränderungen des Vernetzungsgrades, thermische Zersetzungen, Risse sowie andere Formen thermischer und/oder mechanischer Schädigungen zu erwarten ist. Auf diese Weise lässt sich sehr einfach feststellen, ob in der Oberflächenschicht **11** entsprechende Störungen vorhanden sind.

**[0034]** Um Tiefeninformationen zu erhalten, ist es zweckmäßig, die Messungen mit veränderten Frequenzen der kontinuierlichen Ultraschalloberflächenwelle zu wiederholen. Je kleiner die Frequenz gewählt ist, desto größer ist die Eindringtiefe der Ultraschalloberflächenwelle in das Innere der Oberflächenschicht **11**. So ist es zum Beispiel möglich, die Oberflächenschicht **11** durch sukzessives Verringern der Frequenz der kontinuierlichen Ultraschalloberflächenwelle von außen nach innen abzutasten. Dabei wird nach dem oben erläuterten Prinzip ein Mittelwert der Wellenlänge bestimmt und aus der Beziehung

$$c = \lambda \cdot f$$

wiederum die Schallgeschwindigkeit ermittelt. Auf diese Weise wird ein Tiefenprofil der Schallgeschwindigkeit erhalten, aus dem durch einen Vergleich mit einer Referenzgeschwindigkeit darauf geschlossen werden kann, wo die Oberflächenschicht **11** Schädigungen aufweist. So lässt sich zum Beispiel feststellen, wo Schädigungen ihren Ursprung haben und wie weit sich einzelne Schädigungen in die Tiefe der Oberflächenschicht **11** erstrecken. Das auf diese Weise erhaltene Tiefenprofil ermöglicht eine eindeutige Unterscheidung zwischen einer zumindest ab-

schnittweisen Delamination der Oberflächenschicht **11** von dem Substrat **10** und anderen Schädigungen.

**[0035]** Auch diese zweite Variante des Verfahrens zur Erfassung von Schädigungen eines Kunststoff-Metall- oder Metall-Metall-Verbundbauteils **1** ermöglicht eine zerstörungsfreie Untersuchung. Mittels des Verfahrens können mit einem geringen Zeit- und Kostenaufwand auch große Bereiche der Oberflächenschicht **11** untersucht werden. Das Verfahren kann unabhängig von der Größe und Form des Verbundbauteils **1** durchgeführt werden. Das Verfahren ermöglicht in vorteilhafter Weise auch eine Überprüfung des Verbundbauteils **1** vor Ort. Ein stationärer Messaufbau **200** ist nicht erforderlich.

**[0036]** Vorzugsweise ist die Messeinrichtung **20** so ausgebildet, dass sie die Messungen, insbesondere auch die Messungen der Tiefenprofile, automatisch durchführen und auswerten kann. Dann ist es erforderlich, dass die Wegmessvorrichtung **9** an die Messeinrichtung **20** angeschlossen ist, damit dieser Informationen über die Verschiebung des Ultraschallempfängermittels **7** relativ zum Ultraschallsendermittel **6** zur Verfügung gestellt werden können. Die Referenzschallgeschwindigkeiten, mit denen die gemessenen Schallgeschwindigkeiten verglichen werden, sind vorzugsweise in Speichermitteln der Messeinrichtung **20** abrufbar gespeichert.

**ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG**

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

**Zitierte Patentliteratur**

- US 2006/0201252 A1 [0005]
- EP 2551658 A2 [0006]



## Patentansprüche

1. Verfahren zur Erfassung von Schädigungen eines Kunststoff-Metall- oder Metall-Metall-Verbundbauteils (1), umfassend die Schritte

- a) Anordnen eines Ultraschallsendermittels (3) und eines davon beabstandeten Ultraschallempfängermittels (4) auf einer Oberflächenschicht (11) des Verbundbauteils (1),
- b) Erzeugen von gepulsten Ultraschalloberflächenwellen in der Oberflächenschicht (11) des Verbundbauteils (1) mittels des Ultraschallsendermittels (3),
- c) Erfassen der Laufzeiten der gepulsten Ultraschalloberflächenwellen von dem Ultraschallsendermittel (3) zu dem Ultraschallempfängermittel (4),
- d) Vergleichen der erfassten Laufzeiten mit einer Referenzlaufzeit der gepulsten Ultraschalloberflächenwellen in einer Oberflächenschicht (11) eines ungeschädigten Verbundbauteils (1).

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass Laufzeitmessungen bei unterschiedlichen Frequenzen der gepulsten Ultraschalloberflächenwellen durchgeführt werden.

3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Frequenzen der gepulsten Ultraschalloberflächenwellen sukzessive verringert werden.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Verfahrensschritte c) und d) mit einer Messeinrichtung (5) automatisiert durchgeführt werden.

5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Mehrzahl von Referenzlaufzeiten in Speichermitteln der Messeinrichtung (5) abrufbar gespeichert wird.

6. Verfahren zur Erfassung von Schädigungen eines Kunststoff-Metall- oder Metall-Metall-Verbundbauteils (1), umfassend die Schritte

- a) Anordnen eines Ultraschallsendermittels (6) und eines davon beabstandeten Ultraschallempfängermittels (7) auf einer Oberflächenschicht (11) des Verbundbauteils (1),
- b) Erzeugen einer kontinuierlichen Ultraschalloberflächenwelle in der Oberflächenschicht (11) des Verbundbauteils (1) mittels des Ultraschallsendermittels (6),
- c) Erfassen der Schwingung der kontinuierlichen Ultraschalloberflächenwelle mittels des Ultraschallempfängermittels (7),
- d) Ändern und Erfassen eines Abstands zwischen dem Ultraschallsendermittel (6) und dem Ultraschallempfängermittel (7),
- e) Bestimmen einer Phasenverschiebung zwischen einer kontinuierlichen Erregerschwingung des Ultraschallsendermittels (6) und einer mittels des Ultra-

schallempfängermittels (7) erfassten Schwingung der kontinuierlichen Ultraschalloberflächenwelle,

- f) Berechnen einer Schallgeschwindigkeit aus dem erfassten Abstand zwischen dem Ultraschallsendermittel (3) und dem Ultraschallempfängermittel (7), der Phasenverschiebung und einer Frequenz der kontinuierlichen Ultraschalloberflächenwelle,
- g) Vergleichen der berechneten Schallgeschwindigkeit mit einer Referenzschallgeschwindigkeit der kontinuierlichen Ultraschalloberflächenwelle in einer Oberflächenschicht (11) eines ungeschädigten Verbundbauteils (1).

7. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Frequenz der kontinuierlichen Ultraschalloberflächenwelle variiert wird.

8. Verfahren nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Frequenz der kontinuierlichen Ultraschalloberflächenwelle sukzessive verringert wird.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass zumindest die Verfahrensschritte e) bis g) mit einer Messeinrichtung (20) automatisiert durchgeführt werden.

10. Verfahren nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Mehrzahl von Referenzschallgeschwindigkeiten in Speichermitteln der Messeinrichtung (20) abrufbar gespeichert wird.

Es folgt eine Seite Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

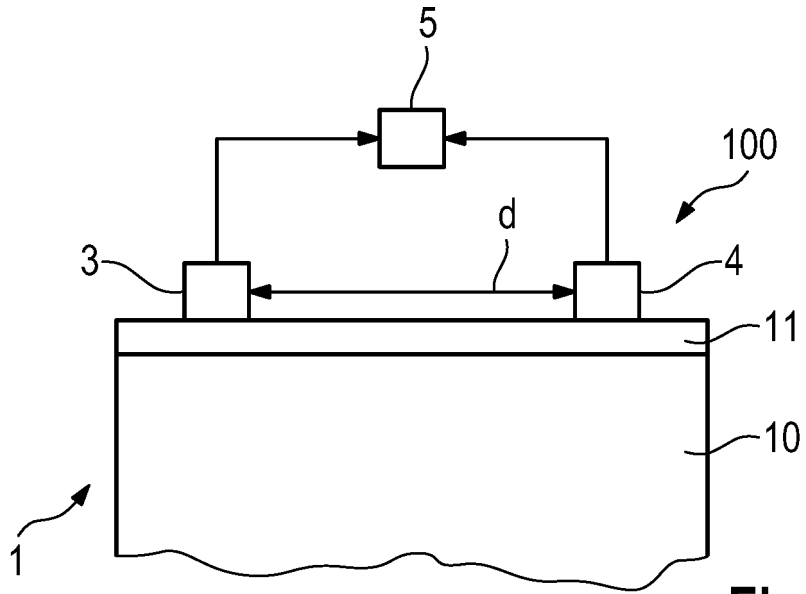


Fig. 1

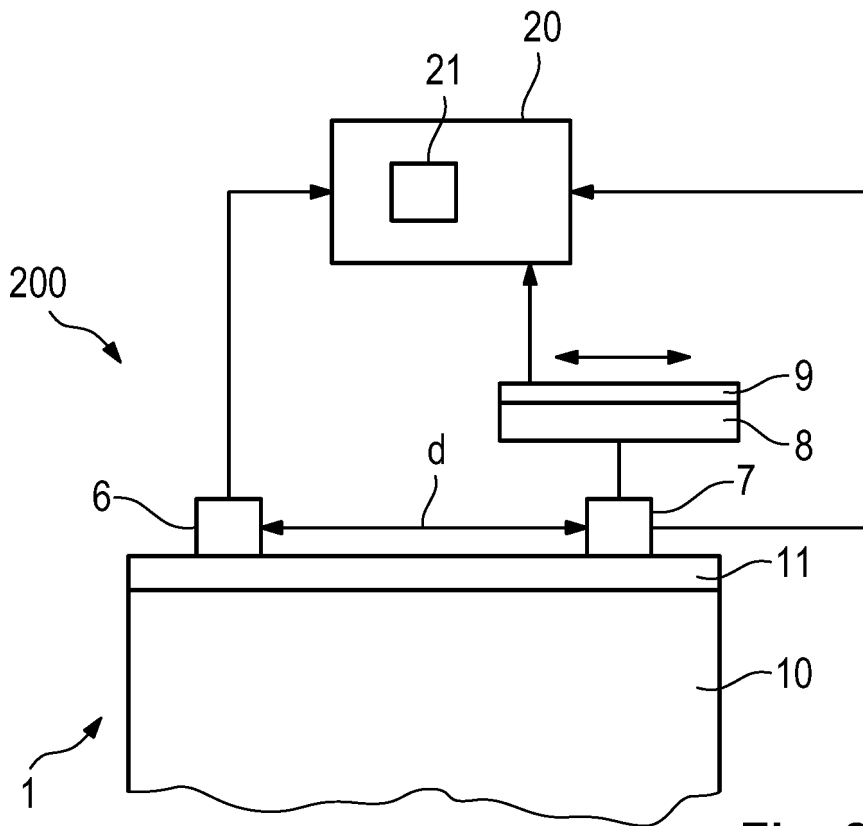


Fig. 2