

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 50440/2022
(22) Anmeldetag: 20.06.2022
(43) Veröffentlicht am: 15.09.2023

(51) Int. Cl.: **G01N 29/04** (2006.01)
G01N 29/07 (2006.01)
G01N 29/12 (2006.01)
G01B 17/02 (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
WO 2020159385 A9
EP 3497402 B1
US 7798000 B1

(71) Patentanmelder:
Research Center for Non Destructive Testing
GmbH
4040 Linz (AT)

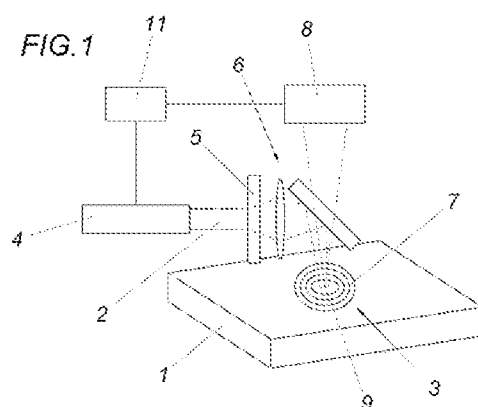
(72) Erfinder:
Grünsteidl Clemens
4040 Linz (AT)
Watzl Georg
4040 Linz (AT)

(74) Vertreter:
Hübscher & Partner Patentanwälte GmbH
4020 Linz (AT)

(54) **Verfahren zum berührungs- und zerstörungsfreien simultanen Bestimmen der Dicke, der longitudinalen und der transversalen Schallgeschwindigkeit einer Platte**

(57) Es wird ein Verfahren zum berührungs- und zerstörungsfreien simultanen Bestimmen der Dicke, der longitudinalen und der transversalen Schallgeschwindigkeit einer Platte (1) beschrieben, bei der mit einem Anregungssignal (2) an einem Oberflächensegment (3) der Platte an periodisch beabstandeten Anregungsstellen (7) Schallwellen in der Platte (1) erzeugt und für mehrere Zeitschritte die aus der Anregung resultierende Auslenkung der Platte (1) in einem Detektionssignal (10) an einem Detektionspunkt (9) gemessen wird, wobei die zu dieser Periodizität proportionale Wellenzahl als akustische Oberflächenwellenzahl bestimmt und aus dem transienten Teil des Detektionssignals (10) für diese Wellenzahl die Frequenz dem lokalen Amplitudenmaximum (12) als akustische Oberflächenwellenfrequenz ermittelt wird. Um ein Verfahren der eingangs geschilderten Art durchzuführen, wird vorgeschlagen, dass die Schallwellen Rayleigh- Lamb-Wellen sind, die der akustischen Oberflächenwellenfrequenz korrespondierende Mode und deren Symmetrie bestimmt wird, aus einem Detektionssignal zwei weitere lokale Amplitudenmaxima (13, 14), deren zugehörige Frequenzen kleiner sind als die akustische Oberflächenwellenfrequenz und die

Symmetrie der zu diesen zugehörigen Frequenzen korrespondierenden Mode ausgewählt und diese zugehörigen Frequenzen als je eine Resonanzfrequenz und dazugehörige Modensymmetrie bestimmt werden.



Zusammenfassung

Es wird ein Verfahren zum berührungs- und zerstörungsfreien simultanen Bestimmen der Dicke, der longitudinalen und der transversalen Schallgeschwindigkeit einer Platte (1) beschrieben, bei der mit einem Anregungssignal (2) an einem Oberflächensegment (3) der Platte an periodisch beabstandeten Anregungsstellen (7) Schallwellen in der Platte (1) erzeugt und für mehrere Zeitschritte die aus der Anregung resultierende Auslenkung der Platte (1) in einem Detektionssignal (10) an einem Detektionspunkt (9) gemessen wird, wobei die zu dieser Periodizität proportionale Wellenzahl als akustische Oberflächenwellenzahl bestimmt und aus dem transienten Teil des Detektionssignals (10) für diese Wellenzahl die Frequenz dem lokalen Amplitudenmaximum (12) als akustische Oberflächenwellenfrequenz ermittelt wird. Um ein Verfahren der eingangs geschilderten Art so auszugestalten, dass Dicke, longitudinale und transversale Schallgeschwindigkeit einer Platte simultan berührungs- und zerstörungsfrei in einem Messbereich bestimmt werden können, wird vorgeschlagen, dass die Schallwellen Rayleigh-Lamb-Wellen sind, die der akustischen Oberflächenwellenfrequenz korrespondierende Mode und deren Symmetrie bestimmt wird, aus einem Detektionssignal zwei weitere lokale Amplitudenmaxima (13, 14), deren zugehörige Frequenzen kleiner sind als die akustische Oberflächenwellenfrequenz und die Symmetrie der zu diesen zugehörigen Frequenzen korrespondierenden Mode ausgewählt und diese zugehörigen Frequenzen als je eine Resonanzfrequenz und dazugehörige Modensymmetrie bestimmt werden und aus akustischer Oberflächenwellenzahl, akustischer Oberflächenwellenfrequenz, den beiden Resonanzfrequenzen und ihren dazugehörigen Modensymmetrien die Dicke und die transversale, sowie die longitudinale Schallgeschwindigkeit der Platte (1) aus den Dispersionsbeziehungen für Rayleigh-Lamb-Wellen bestimmt wird.

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zum berührungs- und zerstörungsfreien simultanen Bestimmen der Dicke, der longitudinalen und der transversalen Schallgeschwindigkeit einer Platte bei der mit einem Anregungssignal an einem Oberflächensegment der Platte an periodisch beabstandeten Anregungsstellen Schallwellen in der Platte erzeugt und für mehrere Zeitschritte die aus der Anregung resultierende Auslenkung der Platte in einem Detektionssignal an einem Detektionspunkt gemessen wird, wobei die zu dieser Periodizität proportionale Wellenzahl als akustische Oberflächenwellenzahl bestimmt und aus dem transienten Teil des Detektionssignal für diese Wellenzahl die Frequenz mit der größten Amplitude als akustische Oberflächenwellenfrequenz ermittelt wird.

Aus dem Stand der Technik ist es bekannt, an periodisch beabstandeten Anregungsstellen akustische Wellen in einer Platte, also einem Gegenstand mit zwei näherungsweise parallelen Oberflächen, dessen Dicke deutlich geringer als seine Breite oder Länge ist, zu erzeugen (EP1910815A2). Die Materialeigenschaften der Platte variieren dabei lokal. An einem Detektionspunkt werden die daraus resultierenden Schwingungen der Platte gemessen und daraus die lokale Schallgeschwindigkeit bestimmt, wobei die Messung an anderen Anregungsstellen wiederholt werden kann, um eine lokale Auflösung der Materialeigenschaften bzw. Schallgeschwindigkeiten der Platte zu erhalten. Durch die periodische Beabstandung wird eine Wellenzahl vorgegeben und die Amplitude des Signals für verschiedene Frequenzen gemessen, wobei die größte gemessene Amplitude zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in der Platte herangezogen wird.

Nachteilig am Stand der Technik ist allerdings, dass mit der Schallgeschwindigkeit nicht simultan die Dicke der Platte bestimmt werden kann. Zwar ist es bekannt, Rayleigh-Lamb-Wellen in einer Platte zu erzeugen und mit diesen an Nullgruppengeschwindigkeitspunkten Variationen in der Plattendicke zu messen (US7798000B1), allerdings lassen sich mit diesem Verfahren nur Variationen aber keine absoluten Dicken der Platte bestimmen. Beiden Verfahren ist somit gemein, dass an mehreren, räumlich voneinander getrennten Messbereichen Messungen durchgeführt werden, um die jeweils gewünschten Parameter zu erhalten und selbst dann keine Dickenbestimmung der Platte möglich ist.

Der Erfindung liegt somit die Aufgabe zugrunde, Dicke, longitudinale und transversale Schallgeschwindigkeit einer Platte simultan berührungs- und zerstörungsfrei in einem Messbereich zu bestimmen.

Die Erfindung löst die gestellte Aufgabe dadurch, dass die Schallwellen Rayleigh-Lamb-Wellen sind, die der akustischen Oberflächenwellenfrequenz korrespondierende Mode und deren Symmetrie bestimmt wird aus einem Detektionssignal zwei weitere lokale Amplitudenmaxima, deren zugehörige Frequenzen kleiner sind als die akustische Oberflächenwellenfrequenz und die Symmetrie der zu diesen zugehörigen Frequenzen korrespondierenden Mode ausgewählt und diese zugehörigen Frequenzen als je eine Resonanzfrequenz und dazugehörige Modensymmetrie bestimmt werden und aus akustischer Oberflächenwellenzahl, akustischer Oberflächenwellenfrequenz, den beiden Resonanzfrequenzen und ihren dazugehörigen Modensymmetrien die Dicke und die transversale, sowie die longitudinale Schallgeschwindigkeit der Platte aus den Dispersionsbeziehungen für Rayleigh-Lamb-Wellen bestimmt wird. Der Erfindung liegt dabei die Idee zugrunde, dass zur Bestimmung der gesuchten Parameter, also der Dicke, sowie der longitudinalen und der transversalen Schallgeschwindigkeit, nicht eine Vielzahl an durch die Dispersionsrelation vorgegebenen Dispersionskurven für die durch das Anregungssignal in der Platte entstehenden Moden bestimmt werden müssen, sondern drei charakteristische Punkte der Dispersionsrelation an drei verschiedenen Moden dazu ausreichen. Die

Dispersionsrelation für Rayleigh-Lamb-Wellen ist weiters mit den Rayleigh-Lamb-Gleichungen

$$\Omega_{symm}(\omega, k, h, c_L, c_T) = \frac{\tan(hq)}{\tan(hp)} + \frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} = 0 \quad (1)$$

bzw.

$$\Omega_{asymm}(\omega, k, h, c_L, c_T) = \frac{\tan(hq)}{\tan(hp)} + \frac{(q^2 - k^2)^2}{4k^2 pq} = 0 \quad (2)$$

mit

$$p = \sqrt{\left(\frac{\omega}{c_T}\right)^2 - k^2}, \quad q = \sqrt{\left(\frac{\omega}{c_L}\right)^2 - k^2}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{und} \quad \omega = 2\pi f$$

gegeben, wobei (1) symmetrische und (2) asymmetrische Moden beschreibt. h ist dabei die halbe Dicke der Platte, ω die Kreisfrequenz, k ist die Kreiswellenzahl, c_L bzw. c_T ist die longitudinale bzw. transversale Schallgeschwindigkeit. Diese Gleichungen weisen Kreisfrequenz, Wellenzahl, Dicke der Platte, sowie longitudinale und transversale Schallgeschwindigkeit als Unbekannte auf. Mit dem Detektionssignal wird die Auslenkung an der Detektionsstelle im zeitlichen Verlauf gemessen. Durch gängige Transformationsverfahren, wie beispielsweise einer Fast-Fourier-Transformation (FFT), kann aus der zeitlich abhängigen Auslenkung am Detektionspunkt ein Frequenzspektrum erstellt werden, bei dem die Amplitude der Auslenkung für die jeweilige Frequenzkomponente des Detektionssignals bestimmt wird. In diesem Frequenzspektrum werden nun zwei lokale Maxima gewählt, also Frequenzen, bei denen die Auslenkung lokal am höchsten ist. Diese lokalen Maxima liefern nämlich nicht nur ein gutes Signal-zu-Rausch-Verhältnis, sondern sind auch diejenigen Frequenzen, bei denen weitere Parameter der Rayleigh-Lamb-Gleichungen bekannt sind. So ist bei Nullgruppengeschwindigkeitsfrequenzen beispielsweise die Gruppengeschwindigkeit c_g der Rayleigh-Lamb-Welle in der Platte Null, wodurch sich Resonanzen in der Platte ausbilden, weswegen Sie als

Resonanzfrequenzen bestimmt werden und ermittelt wird, ob die dazugehörige Mode symmetrisch oder asymmetrisch ist. Da die Gruppengeschwindigkeit c_g bei diesen Frequenzen Null ist und die Gruppengeschwindigkeit mit

$$c_g = \frac{d\omega}{dk}$$

gegeben ist, kann c_g implizit aus (1) oder (2) bestimmt und Null gesetzt werden:

$$c_g(\omega, k, h, c_L, c_T) = \frac{d\omega}{dk} = -\frac{d\Omega}{dk} \left(\frac{d\Omega}{d\omega} \right)^{-1} = 0 \quad (3)$$

Alternativ können beispielsweise diejenigen Frequenzen als Resonanzfrequenz herangezogen werden, bei denen der Wellenvektor k gleich Null ist, was bei Dickenresonanzen der Fall ist. Je nach Symmetrie der Mode ist Ω dabei Ω_{symm} oder Ω_{asymm} . Die beiden Resonanzfrequenzen genügen also nicht nur, je nach Modensymmetrie, der Gleichung (1) oder (2), sondern auch der Gleichung (3). Da es sich um ein Gleichungssystem mit 5 Unbekannten handelt und für die zwei bestimmten Frequenzen mit den Gleichungen (1) oder (2) und (3) vier Gleichungen aufgestellt werden können, würde eine weitere Frequenz ausreichen, um das Gleichungssystem zu lösen und Dicke, sowie longitudinale und transversale Schallgeschwindigkeiten zu bestimmen. Da allerdings das Verhältnis zweier gemessener Frequenzen von der Poisson-Zahl der Platte abhängt, liefert das Bestimmen einer dritten Resonanzfrequenz keine weitere Information, um die Parameter zu bestimmen. Als dritte Frequenz, die eben keine Resonanzfrequenz ist und demnach nicht über die Poisson-Zahl der Platte von den bereits bestimmten Resonanzfrequenzen abhängt, wird daher erfindungsgemäß eine akustische Oberflächenwelle erzeugt und deren akustische Oberflächenwellenfrequenz bestimmt. Für diese gilt Gleichung (3) nicht, da ja die Gruppengeschwindigkeit am Messpunkt nicht zwangsweise null sein muss. Allerdings wird durch die periodisch beabstandeten Anregungsstellen eine Wellenzahl für diese Frequenz vorgegeben, da durch die periodisch beabstandeten Anregungsstellen nur bei dieser Wellenzahl, die proportional zum Abstand der Anregungsstellen ist, konstruktive Interferenz in

der Platte auftritt. Die Schärfe des dabei erzeugten lokalen Maximums, also die möglichst gute Unterscheidbarkeit dieser Oberflächenwellenfrequenz im Frequenzspektrum von den anderen lokalen Maxima, ist dabei proportional zur Anzahl der erzeugten Anregungsstellen, da durch mehr Anregungsstellen die konstruktive Interferenz stärker auftritt. Der Abstand Δ zwischen zwei der periodisch beabstandeten Anregungsstellen gibt dabei die Wellenzahl mit folgender Gleichung vor und kann demzufolge aus dieser bestimmt werden:

$$\Delta = 2\pi / k_{\text{Oberflächenwelle}}$$

Analog zur Resonanzfrequenz kann auch hier aus dem Detektionssignal für diese Kreiswellenzahl $k_{\text{Oberflächenwelle}}$ die Kreisfrequenz mit der größten Amplitude als akustische Oberflächenwellenfrequenz ermittelt werden. Auch die Oberflächenwellenfrequenz muss je nach Modensymmetrie Gleichung (1) oder (2) genügen. Zwar genügt die Oberflächenwellenfrequenz nicht Gleichung (3), allerdings sind ja neben der Oberflächenwellenfrequenz selbst auch die vorgegebene Wellenzahl bekannt, wodurch sich nun mit der Oberflächenwellenfrequenz und den beiden Resonanzfrequenzen aus Gleichungen (1), (2) und (3) ein Gleichungssystem aus fünf Gleichungen mit fünf unbekannten aufstellen und lösen lässt, womit durch das erfindungsgemäße Ermitteln der akustischen Oberflächenwellenfrequenz und der beiden Resonanzfrequenzen Dicke, longitudinale und transversale Schallgeschwindigkeit bestimmt wird. Kreisfrequenz bzw. Kreiswellenzahl sind bekannter Weise zu Frequenz und Wellenzahl mit dem Faktor 2π proportional. Sowohl die Oberflächenwellenfrequenz als auch die Resonanzfrequenzen können aus demselben Spektrum bestimmt werden. Um zu unterscheiden, ob ein lokales Amplitudenmaximum einer Oberflächenwellenfrequenz oder einer Resonanzfrequenz zugeordnet wird, kann berücksichtigt werden, in welchem Zeitraum das jeweilige lokale Amplitudenmaximum nachweisbar ist: Oberflächenwellenfrequenzen werden den Amplitudenmaxima zugeordnet, die im transienten Teil des Detektionssignals detektiert werden. Der transiente Teil des Detektionssignals ist der Teil der nach der Anregung der Schallwellen gemessen wird. Nach der Anregung flacht eine

akustische Oberflächenwelle nämlich schnell ab. Bei der Resonanzfrequenz ist die Amplitude aufgrund des längeren Nachschwingens auch länger als die der Oberflächenwellenfrequenz zugeordnete Amplitude nachweisbar und kann so von dieser unterschieden werden. Die Anregungsstellen, an denen die Schallwellen in der Platte erzeugt werden, müssen so gewählt werden, dass die obig beschriebene konstruktive Interferenz erzeugt und anschließend am Detektionspunkt gemessen werden kann. Ist dies erfüllt, sind mehrere Geometrien für die Anregungsstellen möglich: Es kann sich also beispielsweise um mehrere, auf einer Geraden liegende Anregungspunkte, mehrere, parallel zueinander verlaufende Linien, oder konzentrische Kreise handeln. Um die Symmetrie einer Mode zu bestimmen, kann vor der Messung beispielsweise eine Simulation durchgeführt oder sich an bereits bekannten Dispersionskurven ähnlicher Platten orientiert werden. Beispielsweise kann die Nullgruppengeschwindigkeitsfrequenz mit dem ersten lokalen Minimum, also der niedrigsten Frequenz, die S1S2 Mode, die zweite entweder die A2A3 Mode bei ca. der doppelten Frequenz, oder die S3S6 Mode, bei ca. der dreifachen Frequenz sein. Bei den Resonanzfrequenzen kann es sich beispielsweise um die Frequenzen einer Nullgruppengeschwindigkeitsmode oder einer Dickenresonanzmode handeln. Das erfindungsmäßige Verfahren lässt sich durch einen räumlich angepassten Versuchsaufbau auch beispielsweise für Platten aus anisotropem Material nutzen, bei denen die Schallgeschwindigkeit richtungsabhängig variiert, um diese unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten zu messen. Bei diesen anisotropen Materialien kann es sich beispielsweise um Siliziumwafer oder (Komposit-)Fasermaterialien handeln.

Um die benötigten Schallwellen trotz berührungs- und zerstörungsfreier Messung örtlich und zeitlich präzise zu erzeugen und zu detektieren, wird vorgeschlagen, dass das Anregungssignal mit einem gepulsten Laser erzeugt wird. Zusage dieser Maßnahmen kann die Anregung und Detektion mittels Laserultraschall geschehen, bei der durch den Laserpuls eine genau definierte Menge Energie räumlich und zeitlich präzise an den Anregungsstellen eingebracht wird. Diese Energie heizt die Platte lokal auf. Dies resultiert in einer wärmebedingten lokalen Ausdehnung, welche durch die Platte laufende Ultraschallwellen erzeugt. Die durch diese

Ultraschallwellen hervorgerufenen Auslenkungen der Platte können ebenso optisch detektiert werden.

Zwar können im Frequenzspektrum mehrere lokale Maxima detektiert und ihre zugehörigen Frequenzen als Resonanzfrequenzen zur Bestimmung der Parameter herangezogen werden, um ein besseres Signal-zu-Rauschen-Verhältnis zu erreichen, empfiehlt es sich aber, dass die zwei lokalen Amplitudenmaxima mit der größten Amplitude als weitere lokale Maxima zur Bestimmung der Resonanzfrequenz und dazugehörigen Modensymmetrie ausgewählt werden. Zufolge dieser Maßnahmen kann die Bestimmung der lokalen Maxima außerdem am einfachsten erfolgen, da diese sich am stärksten vom Hintergrundrauschen, also den Auslenkungen bei den weiteren Frequenzen, abheben.

Um die Messung zu vereinfachen und die Qualität der Messwerte zu erhöhen, wird vorgeschlagen, dass akustische Oberflächenwellenzahl, akustische Oberflächenwellenfrequenz und beide Resonanzfrequenzen aus demselben Anregungssignal bestimmt werden. Da sich manche Messparameter, wie beispielsweise Position der Anregungsstelle und/oder des Detektionspunkts, Materialeigenschaften der zu messenden Platte, etc. bei zeitlich aufeinanderfolgenden Messungen nicht vollständig exakt reproduzieren lassen, kann bei einer Veränderung dieser Messparameter die Aussagekraft der Messwerte beeinträchtigt sein. So können aber alle zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens benötigten Frequenzen und Moden in einer Messung bestimmt werden, wodurch automatisch dieselben Messparameter für alle diese Werte gelten. Da die Wellenzahl ohnehin über den Abstand der Anregungsstellen bestimmt wird, ist dieser unabhängig von den Messparametern. Die Oberflächenwellenfrequenzen können durch geeignete Filter von den Resonanzfrequenzen aus dem Frequenzspektrum einer Messung unterschieden werden: Da bei den Resonanzfrequenzen die Platte länger nachschwingt, können diese beispielsweise auch später als die transiente Oberflächenwellenfrequenz detektiert werden, wodurch also eine Unterscheidung über den Detektionszeitpunkt getroffen werden kann.

Um die Qualität der Messungen zu verbessern und diese zu vereinfachen, können die erwarteten zugehörigen Frequenzen der zwei weiteren lokalen Maxima, wenigstens um den Faktor 4 kleiner sein als die akustische Oberflächenwellenfrequenz. Zuzufolge dieser Maßnahmen kann vor der Bestimmung der Dicke, der longitudinalen und der transversalen Schallgeschwindigkeit einer Platte eine Simulation des Messaufbaus durchgeführt werden, um die Eingangswerte für das Anregungssignal, beispielsweise die Periodizität der Anregungssignale, zu optimieren und erste Simulationsergebnisse zu erhalten. Auf Basis dieser Simulationsergebnisse können die erwarteten Messergebnisse und Parameter zumindest abgeschätzt werden. Alternativ oder zusätzlich dazu können weitere Einschränkungen der Wertebereiche vorgenommen werden. So ist dem Fachmann beispielsweise der ungefähre Zusammenhang zwischen der den Resonanzfrequenzen entsprechenden Wellenlängen und der ungefähren Plattendicke bekannt. Bei Wolfram entspricht diese Wellenlänge beispielsweise ungefähr dem Dreifachen der Plattendicke. So kann die erwartete Frequenz, also beispielsweise das Simulationsergebnis für die beiden Resonanzfrequenzen, der zwei weiteren lokalen Maxima als Grundlage für die optimierte Beabstandung der Anregungssignale dienen. Die akustische Oberflächenwellenfrequenz ist, wie oben beschrieben, über den Abstand der Anregungssignale einstellbar, wobei sich durch Versuche herausgestellt hat, dass die Messergebnisse aussagekräftiger sind, wenn erfindungsgemäß die erwarteten zugehörigen Frequenzen der zwei weiteren lokalen Maxima, wenigstens um den Faktor 4 kleiner sind als die akustische Oberflächenwellenfrequenz. Bei diesem Verhältnis ist nämlich die Periodizität der Anregungssignale groß genug, um nicht nur sehr lokale Materialeigenschaften der Platte zu messen, aber klein genug damit durch einen einfachen Messaufbau ausreichend Anregungsstellen erzeugt werden können, um, wie oben bereits erwähnt, ein scharfes lokales Maximum im Frequenzspektrum zu erzeugen.

Um insbesondere dann, eine gute Signalqualität zu gewährleisten, wenn akustische Oberflächenwellenzahl, akustische Oberflächenwellenfrequenz, beide Resonanzfrequenzen und ihre zugehörigen Modensymmetrien aus demselben Anregungssignal bestimmt werden, kann der maximale Normalabstand zweier

Anregungsstellen kleiner als die halbe erwartete Wellenlänge der beiden, je einer Resonanzfrequenz korrespondierenden Moden sein. Wie bereits oben erwähnt, wird durch die periodischen Anregungsstellen und der daraus resultierenden konstruktiven Interferenz die Wellenlänge, und damit die Wellenzahl, der der Oberflächenwellenfrequenz korrespondierenden Oberflächenwelle vorgegeben. Da die periodischen Anregungsstellen aber nicht nur für die Oberflächenwelle Interferenz erzeugen, sondern auch für die den Resonanzfrequenzen korrespondierenden Moden, kann sich die Interferenz nachteilig auf die Signalqualität der den Resonanzfrequenzen entsprechenden lokalen Maxima im Frequenzspektrum auswirken. Die den Resonanzfrequenzen korrespondierenden Moden weisen allerdings in der Regel Wellenlängen auf, die um ein Vielfaches höher sind als die Wellenlängen der Oberflächenwellen, wodurch nachteilige Interferenzeffekte deutlich verringert werden, wenn der maximale Normalabstand zweier Anregungsstellen, also insbesondere beiden am weitesten voneinander entfernten Anregungsstellen, kleiner als die halbe erwartete Wellenlänge der beiden, je einer Resonanzfrequenz korrespondierenden Moden ist. Bei diesen Abständen treten die Interferenzeffekte dann nämlich nur in einem kleinen Teilbereich der Wellenlänge auf, wodurch sich die Auswirkungen auf das Signal über die gesamte Wellenlänge in Grenzen hält. Versuche haben dabei gezeigt, dass bei der halben erwarteten Wellenlänge als maximalem Normalabstand nach wie vor zuverlässige Messergebnisse erreicht werden. Zwar ist die Wellenlänge der den Resonanzfrequenzen entsprechenden Moden nicht bekannt, allerdings können diese ungefähr, wie oben bereits beschrieben, beispielsweise durch Simulationen, bestimmt werden.

In der Zeichnung ist der Erfindungsgegenstand beispielsweise dargestellt. Es zeigen

Fig. 1 einen Messaufbau zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens, Fig. 2 das Detektionssignal mit der Auslenkung der Platte über die Zeit am Detektionspunkt und die daraus folgenden Frequenzspektren für die akustische Oberflächenwellenfrequenz und die Resonanzfrequenzen,

Fig. 3 die Dispersionskurven der verschiedenen Moden der Schallwelle und deren Frequenzspektrum und

Fig. 4 einen Teilbereich der Dispersionskurven und deren Frequenzspektrum der Fig. 3 in einem größeren Maßstab.

Bei einem erfindungsgemäßen Verfahren zum berührungs- und zerstörungsfreien simultanen Bestimmen der Dicke, der longitudinalen und der transversalen Schallgeschwindigkeit einer Platte 1 wird ein Anregungssignal 2 an einem Oberflächensegment 3 der Platte 1 erzeugt. Im gezeigten Messaufbau ist das Anregungssignal 2 ein gepulster Laserstrahl, der von einem Anregungslaser 4 erzeugt wird. Der Laserstrahl trifft auf ein diffraktives optisches Element 5, welches den Laser in mehrere Strahlsegmente aufteilt, die über einen optischen Aufbau 6 auf das Oberflächensegment 3 der Platte 1 gerichtet werden. Die Strahlsegmente treffen so auf die Oberflächensegmente 3, dass periodisch beabstandete Anregungsstellen 7 entstehen, an denen durch das Anregungssignal 2 in der Platte 1 Schallwellen erzeugt werden, die sich in der Platte 1 ausbreiten. Diese periodisch beabstandeten Anregungsstellen 7 können beispielsweise, wie im Ausführungsbeispiel gezeigt, konzentrische Kreise sein. Über einen Detektor 8, beispielsweise einen Vibrometer, wird an einem von den Anregungsstellen 7 beabstandeten Detektionspunkt 9 die von den Schallwellen verursachte Auslenkung der Platte 1 für mehrere aufeinanderfolgende Zeitschritte gemessen und in ein Detektionssignal 10 umgewandelt, welches die Auslenkung der Platte 1 am Detektionspunkt 9 für mehrere Zeitschritte beinhaltet und von einer Recheneinheit 11, die auch den Anregungslaser 4 ansteuern kann, ausgewertet wird.

Ein solches Detektionssignal ist in der Fig. 2 gezeigt. Mittels bekannter Transformationsalgorithmen, wie beispielsweise der Fast-Fourier-Transformation (FFT) kann das Detektionssignal 10 vom Zeit- in den Frequenzraum transformiert werden, sodass die verschiedenen Frequenzanteile des Detektionssignals 10 visualisiert werden können. Der untere Teil der Fig. 2 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt aus dem transienten Teil des Detektionssignals 10 und dessen Frequenzspektrum. Durch die periodisch beabstandeten Anregungsstellen 7 wird

durch konstruktive Interferenz eine akustische Oberflächenwelle erzeugt, deren Wellenzahl zu den Abständen der Anregungsstellen 7 proportional ist. Diese Oberflächenwelle ist transient und deswegen am (zeitlichen) Anfang des Detektionssignals 10 klar erkenn- und vom späteren Signalverlauf unterscheidbar, da sich für sie ein lokales Amplitudenmaximum 12 ausbildet. Durch diese klare Unterscheidbarkeit lässt sich deren Frequenz als akustische Oberflächenwellenfrequenz auch leicht in im Frequenzspektrum des transienten Teils des Detektionssignals 10, zu sehen links unten in der Fig. 2, entnehmen. Weiters lassen sich durch diese einfache Unterscheidbarkeit alle zur Bestimmung der Dicke, der longitudinalen und der transversalen Schallgeschwindigkeit benötigten Werte aus demselben Anregungssignal 2 bestimmen. Im späteren Verlauf des Detektionssignals 10 klingt diese Oberflächenwelle ab, wobei die nun klar erkennbaren lokalen Maxima 13, 14 im Frequenzspektrum auf Resonanzen in der Platte 1 zurückzuführen sind, wie der Fig. 2 rechts unten entnommen werden kann.

Die in den Figs. 2-4 dargestellte Auslenkung $|u_z|$ (Y-Achse der Fig. 2, X-Achsen der Fig. 3 und 4 rechts) ist in zufälligen Einheiten angegeben. Die Frequenzen f (X-Achse der Fig. 2 unten, Y-Achse der Figs. 3 und 4) sind in Megahertz und die Zeit t der Fig. 2 (oben) ist in Mikrosekunden angegeben. Die Wellenzahl k (X-Achse Figs. 3 links und 4 links) ist in mm^{-1} angegeben.

Diese Resonanzen, bei denen es sich beispielsweise um Dickenresonanzen oder Resonanzen bei einer Nullgruppengeschwindigkeitsfrequenz handeln kann, lassen sich grafisch in den Dispersionsrelationen der verschiedenen, in der Platte 1 auftretenden Moden identifizieren, wie den Figs. 3 und 4 entnommen werden kann. Zusammen mit den oben ermittelten Informationen der akustischen Oberflächenwelle und zwei weiteren Resonanzfrequenzen können nun, wie oben beschrieben, die gesuchten Parameter Dicke, transversale und longitudinale Schallgeschwindigkeit, aus den Rayleigh-Lamb-Gleichungen bestimmt werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zum berührungs- und zerstörungsfreien simultanen Bestimmen der Dicke, der longitudinalen und der transversalen Schallgeschwindigkeit einer Platte (1) bei der mit einem Anregungssignal (2) an einem Oberflächensegment (3) der Platte an periodisch beabstandeten Anregungsstellen (7) Schallwellen in der Platte (1) erzeugt und für mehrere Zeitschritte die aus der Anregung resultierende Auslenkung der Platte (1) in einem Detektionssignal (10) an einem Detektionspunkt (9) gemessen wird, wobei die zu dieser Periodizität proportionale Wellenzahl als akustische Oberflächenwellenzahl bestimmt und aus dem transienten Teil des Detektionssignals (10) für diese Wellenzahl die Frequenz dem lokalen Amplitudenmaximum (12) als akustische Oberflächenwellenfrequenz ermittelt wird, dadurch gekennzeichnet, dass die Schallwellen Rayleigh-Lamb-Wellen sind, die der akustischen Oberflächenwellenfrequenz korrespondierende Mode und deren Symmetrie bestimmt wird, aus einem Detektionssignal zwei weitere lokale Amplitudenmaxima (13, 14), deren zugehörige Frequenzen kleiner sind als die akustische Oberflächenwellenfrequenz und die Symmetrie der zu diesen zugehörigen Frequenzen korrespondierenden Mode ausgewählt und diese zugehörigen Frequenzen als je eine Resonanzfrequenz und dazugehörige Modensymmetrie bestimmt werden und aus akustischer Oberflächenwellenzahl, akustischer Oberflächenwellenfrequenz, den beiden Resonanzfrequenzen und ihren dazugehörigen Modensymmetrien die Dicke und die transversale, sowie die longitudinale Schwallgeschwindigkeit der Platte (1) aus den Dispersionsbeziehungen für Rayleigh-Lamb-Wellen bestimmt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Anregungssignal (2) mit einem gepulsten Laser erzeugt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die zwei lokalen Amplitudenmaxima (13,14) mit der größten Amplitude als weitere lokale Maxima zur Bestimmung der Resonanzfrequenz und dazugehörigen Modensymmetrie ausgewählt werden.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass akustische Oberflächenwellenzahl, akustische Oberflächenwellenfrequenz, und beide Resonanzfrequenzen aus demselben Anregungssignal (2) bestimmt werden.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die erwarteten zugehörigen Resonanzfrequenzen der zwei weiteren lokalen Maxima (13, 14), wenigstens um den Faktor 4 kleiner ist als die akustische Oberflächenwellenfrequenz.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass der maximale Normalabstand zweier Anregungsstellen (7) kleiner als die halbe erwartete Wellenlänge der beiden, je einer Resonanzfrequenz korrespondierenden Moden ist.

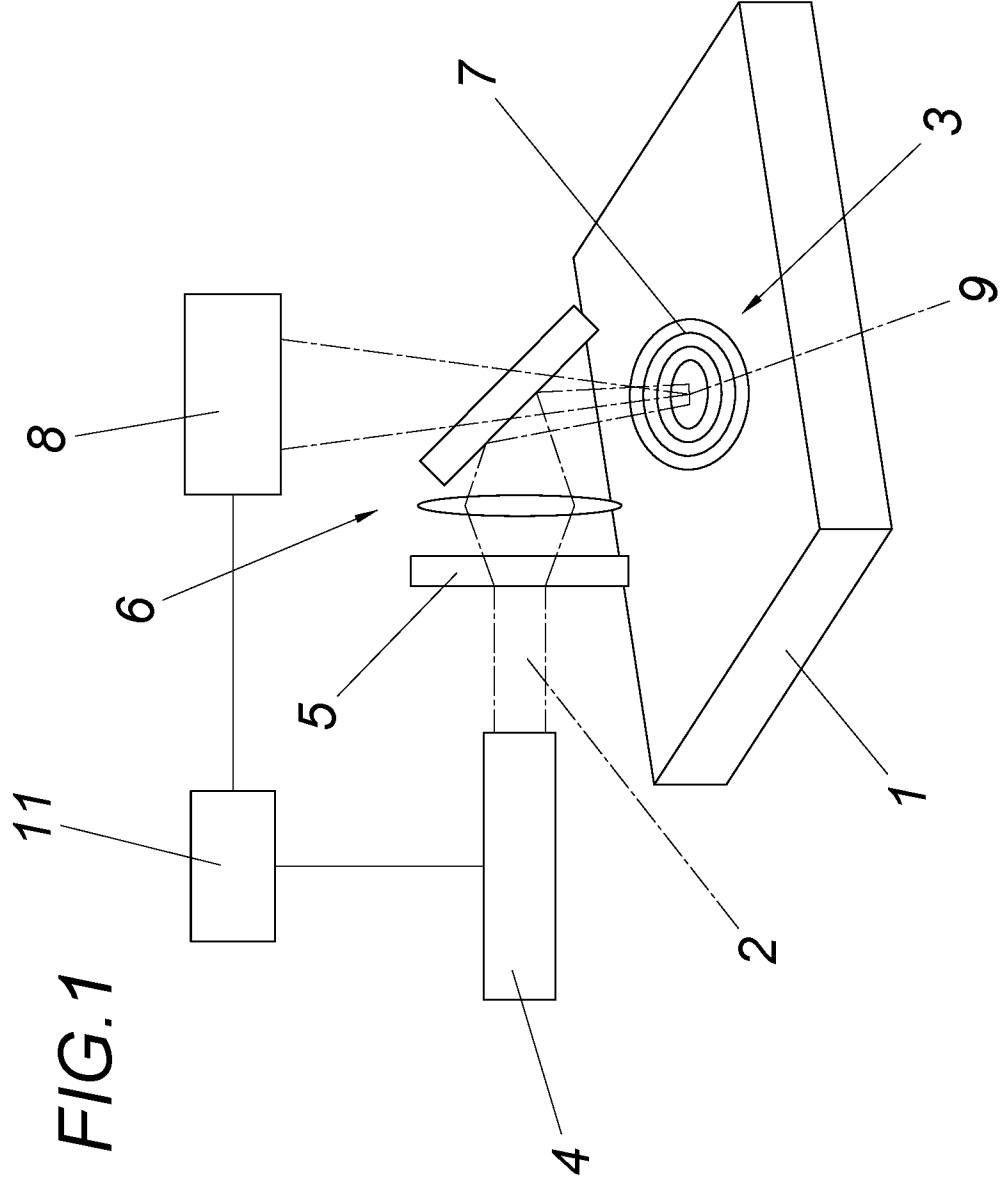


FIG.2

10

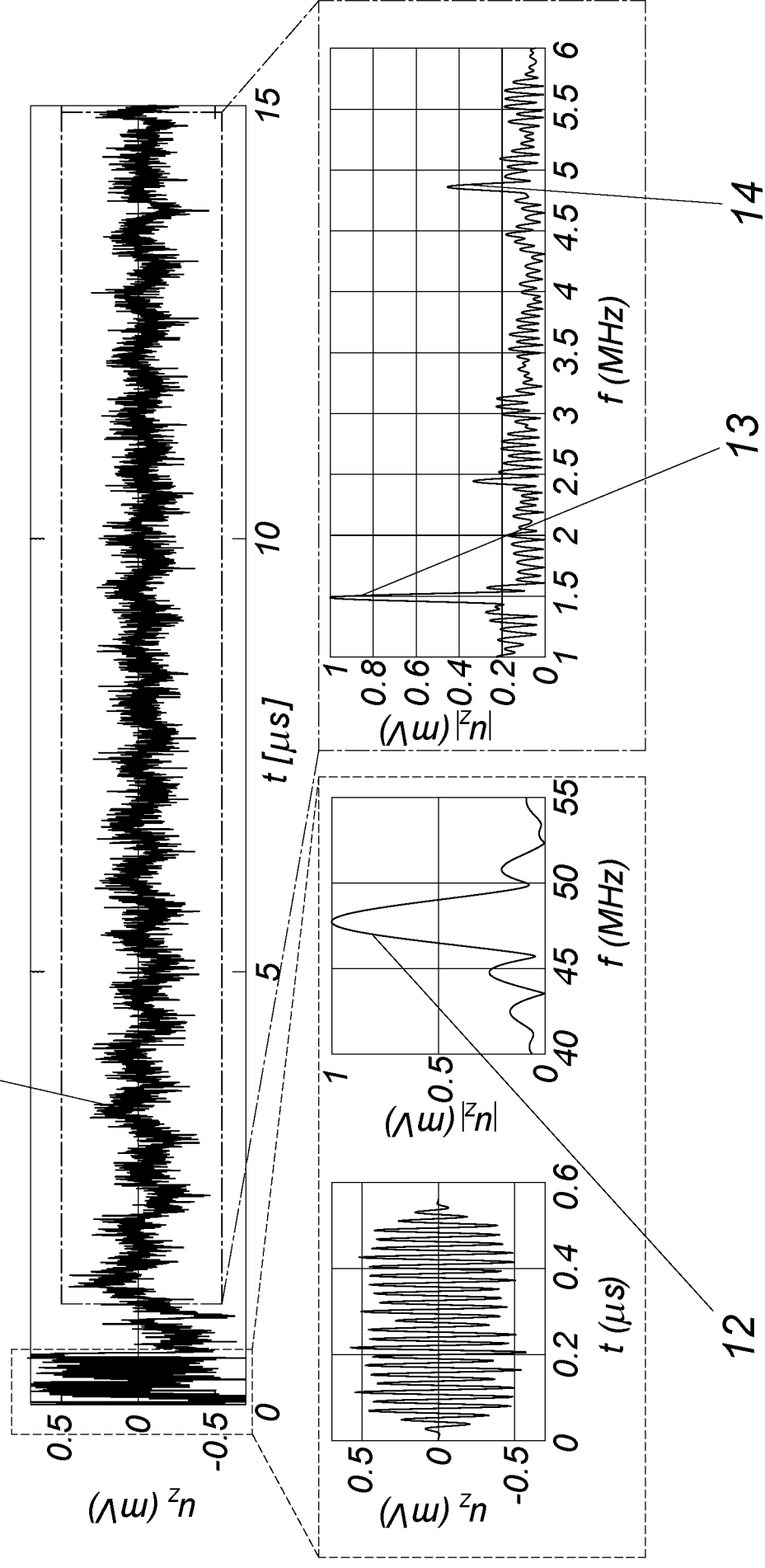


FIG.3

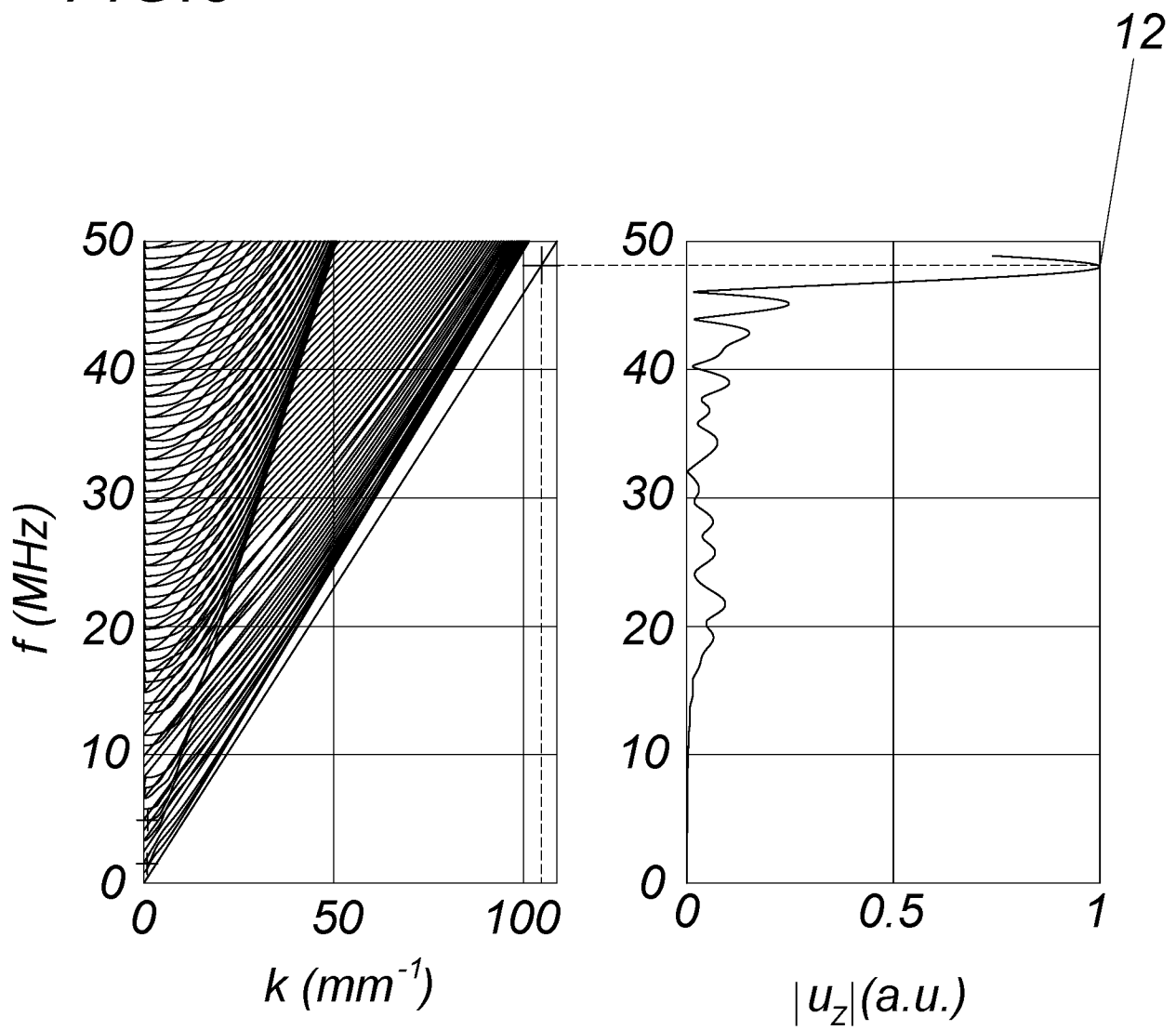
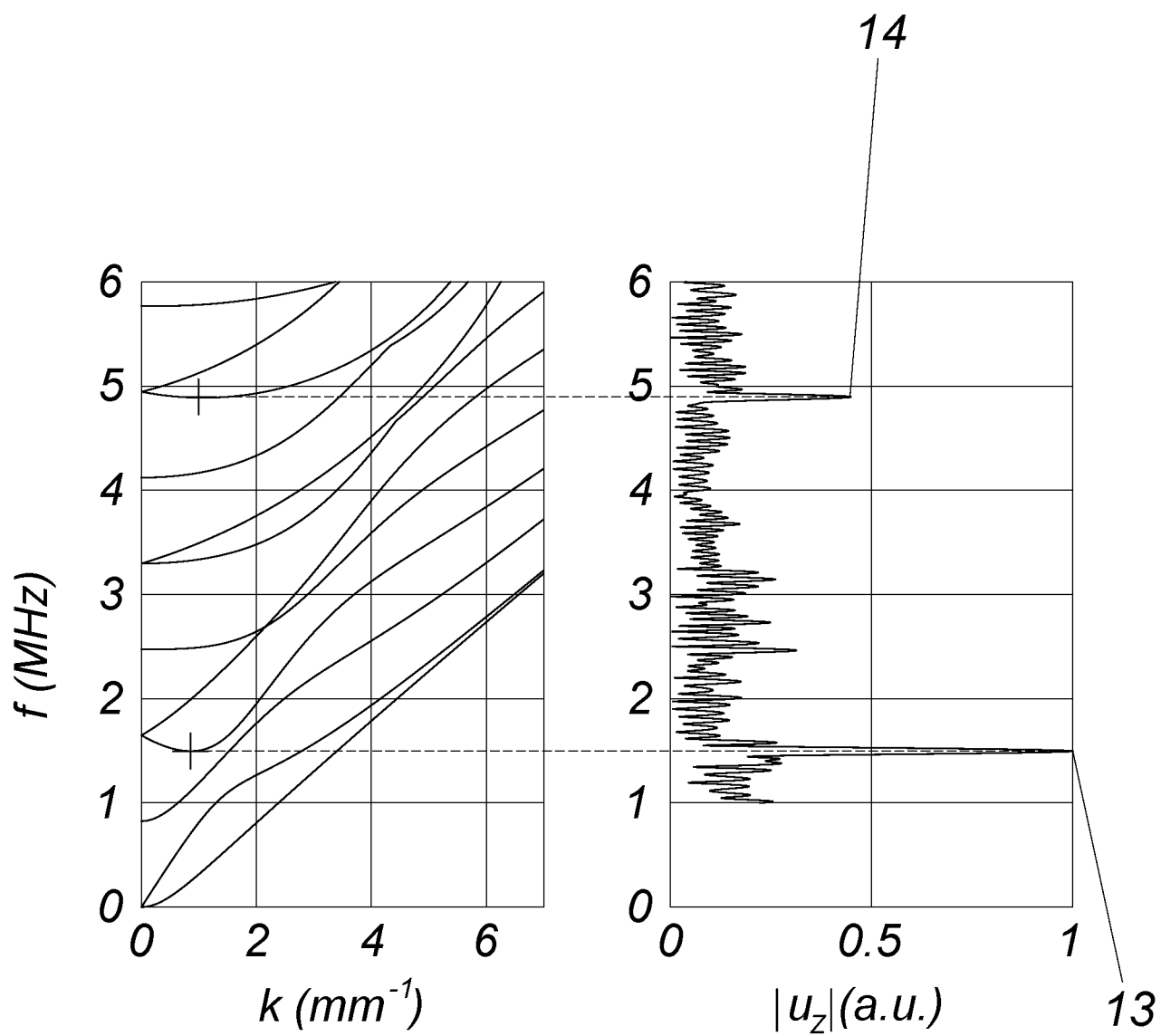


FIG.4



Patentansprüche

1. Verfahren zum berührungs- und zerstörungsfreien simultanen Bestimmen der Dicke, der longitudinalen und der transversalen Schallgeschwindigkeit einer Platte (1) bei der
 - mit einem Anregungssignal (2) an einem Oberflächensegment (3) der Platte an periodisch beabstandeten Anregungsstellen (7) Schallwellen in der Platte (1) erzeugt und für mehrere Zeitschritte die aus der Anregung resultierende Auslenkung der Platte (1) in einem Detektionssignal (10) an einem Detektionspunkt (9) gemessen wird,
 - wobei die zu dieser Periodizität proportionale Wellenzahl als akustische Oberflächenwellenzahl bestimmt und
 - aus dem transienten Teil des Detektionssignals (10) für diese Wellenzahl die Frequenz des lokalen Amplitudenmaximums (12) als akustische Oberflächenwellenfrequenz ermittelt wird, dadurch gekennzeichnet, dass
 - die Schallwellen Rayleigh-Lamb-Wellen sind,
 - die der akustischen Oberflächenwellenfrequenz korrespondierende Mode und deren Symmetrie bestimmt wird,
 - aus einem Detektionssignal zwei weitere lokale Amplitudenmaxima (13, 14), deren zugehörige Frequenzen kleiner sind als die akustische Oberflächenwellenfrequenz und die Symmetrie der zu diesen zugehörigen Frequenzen korrespondierenden Mode ausgewählt und diese zugehörigen Frequenzen als je eine Resonanzfrequenz und dazugehörige Modensymmetrie bestimmt werden und
 - aus akustischer Oberflächenwellenzahl, akustischer Oberflächenwellenfrequenz, den beiden Resonanzfrequenzen und ihren dazugehörigen Modensymmetrien die Dicke und die transversale, sowie die longitudinale Schwallgeschwindigkeit der

Platte (1) aus den Dispersionsbeziehungen für Rayleigh-Lamb-Wellen bestimmt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Anregungssignal (2) mit einem gepulsten Laser erzeugt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die zwei lokalen Amplitudenmaxima (13,14) mit der größten Amplitude als weitere lokale Maxima zur Bestimmung der Resonanzfrequenz und dazugehörigen Modensymmetrie ausgewählt werden.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass akustische Oberflächenwellenzahl, akustische Oberflächenwellenfrequenz, und beide Resonanzfrequenzen aus demselben Anregungssignal (2) bestimmt werden.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die erwarteten zugehörigen Resonanzfrequenzen der zwei weiteren lokalen Maxima (13, 14), wenigstens um den Faktor 4 kleiner ist als die akustische Oberflächenwellenfrequenz.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass der maximale Normalabstand zweier Anregungsstellen (7) kleiner als die halbe erwartete Wellenlänge der beiden, je einer Resonanzfrequenz korrespondierenden Moden ist.