



(19)
 Bundesrepublik Deutschland
 Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2008 021 248 A1** 2009.11.05

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2008 021 248.2**

(22) Anmeldetag: **28.04.2008**

(43) Offenlegungstag: **05.11.2009**

(51) Int Cl.⁸: **G01N 29/04** (2006.01)
G01N 29/44 (2006.01)

(71) Anmelder:
Universität Bremen, 28359 Bremen, DE

(74) Vertreter:
**von Ahsen, Nachtwey & Kollegen Anwaltskanzlei,
 28359 Bremen**

(72) Erfinder:
**Calomfirescu, Mircea, Dipl.-Ing., 28357 Bremen,
 DE; Hermann, Axel, Prof. Dr.-Ing., 21682 Stade, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
 gezogene Druckschriften:

US 73 33 898 B2

**Howard M. Matt: "Structural Diagnostics of CFRP
 Composite Aircraft Components by Ultrasonic
 Guided Waves and Built-In Piezoelectric
 Transducers". Thesis at University of
 California, San Diego, February 2007**

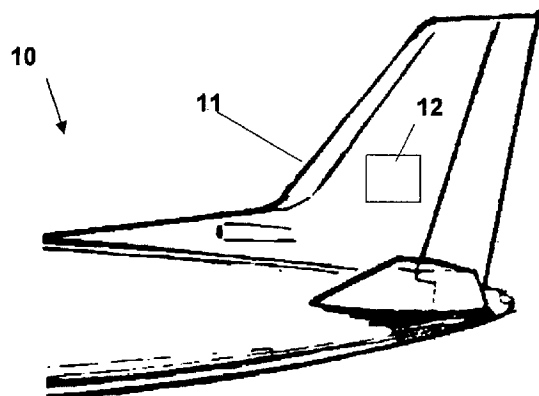
**Lei Wang, et al.: "Group velocity and
 characteristic wave curves of Lamb Waves in
 composites: Modeling and experiments".
 Composites Science and Technology
 67(2007)1370-1384**

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Bestimmen von viskoelastischen Kennwerten eines Faserverbundwerkstoffes**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Bestimmen eines Strukturzustandes eines, insbesondere unidirektional verstärkten Faserverbundwerkstoffes (13), bei dem der Faserverbundwerkstoff (13) zerstörungsfrei geprüft wird und bei dem Lamb-Wellen (15) in dem Faserverbundwerkstoff (13) angeregt und gemessen werden. Zum Bestimmen des Strukturzustandes des Faserverbundwerkstoffes während des vorgesehenen normalen Betriebes mittels geeigneter Kennwerte werden die viskoelastischen Materialkennwerte des Faserverbundwerkstoffes (13) bestimmt.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Bestimmen eines Strukturzustandes eines, insbesondere unidirektional verstärkten, Faserverbundwerkstoffes, bei dem der Faserverbundwerkstoff zerstörungsfrei geprüft wird, und bei dem Lamb-Wellen in dem Faserverbundwerkstoff angeregt und gemessen werden. Des Weiteren betrifft die Erfindung ein Verfahren zum Detektieren eines Fehlers und/oder Schadens in einem, insbesondere unidirektional verstärkten, Faserverbundwerkstoff, bei dem der Faserverbundwerkstoff zerstörungsfrei geprüft wird, und bei dem Lamb-Wellen in dem Faserverbundwerkstoff angeregt und gemessen werden. Ferner betrifft die Erfindung eine Vorrichtung zur Durchführung der beiden vorgenannten Verfahren mit mindestens einem Sender, mit mindestens einem Empfänger, wobei der Sender und der Empfänger am und/oder in dem Faserverbundwerkstoff angeordnet sind.

[0002] Derartige Verfahren und eine solche Vorrichtung sind aus der DE 102 14 984 bekannt. Hierbei wird unter Verwendung von Lamb-Wellen eine integrierte Strukturüberwachung durchgeführt.

[0003] Es ist bekannt, die elastischen Materialkennwerte von Faserverbundwerkstoffen mittels zerstörender Prüfverfahren, beispielsweise mittels Zug-, Druck- und/oder Biegeversuchen, zu bestimmen. Weiter sind auch zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Bestimmung der viskoelastischen Materialkennwerte bekannt. Hierbei ist jedoch von Nachteil, dass die zu untersuchenden Bauteile in ein Wasserbad eingebracht werden müssen, um beispielsweise mit Hilfe von Ultraschall die viskoelastischen Materialkennwerte bestimmen zu können. Hierzu ist es notwendig die zu untersuchenden Teile aus der Gesamtkonstruktion auszubauen. Dazu muss der normale Betrieb unterbrochen werden.

[0004] Aufgrund des zunehmenden Einsatzes von Faserverbundwerkstoffen in Bereichen wie beispielsweise der Luft- und Raumfahrt, dem Automobilbau, Windenergieanlagen, Druckbehältern oder Ölpipelines kommt der Überwachung der Faserverbundstrukturen auf Materialfehler und Materialeigenschaften eine immer größer werdende Bedeutung zu. Gerade in sicherheitsrelevanten Bereichen müssen die Faserverbundstrukturen regelmäßig geprüft oder ausgetauscht werden. Die Wartungsintervalle sind oftmals kurz und/oder die Faserverbundstrukturen sind mit hohen Sicherheitsbeiwerten, beispielsweise hinsichtlich eines Aufschlages für die Materialstärke, versehen. Nachteilig ist hierbei der hohe Personal- und Kostenaufwand für die notwendigen, zumeist manuell durchgeführten, Prüfungen sowie die hohen Materialkosten für die Herstellung und den Austausch der Bauteile aus Faserverbundwerkstoffen.

[0005] Es ist daher das der Erfindung zugrunde liegende Problem, ein Verfahren zum Bestimmen eines Strukturzustandes eines Faserverbundwerkstoffes der eingangs genannten Art derart weiterzuentwickeln, dass der Strukturzustand des Faserverbundwerkstoffes während des vorgesehenen normalen Betriebes mittels geeigneter Kennwerte auf eindeutige Weise bestimmbar ist.

[0006] Das der Erfindung zugrunde liegende Problem wird mit den Verfahren der eingangs genannten Art dadurch gelöst, dass viskoelastische Materialkennwerte des Faserverbundwerkstoffes bestimmt werden. Des Weiteren wird das Problem mittels einer Vorrichtung der eingangs genannten Art dadurch gelöst, dass eine Auswerteeinheit zum Bestimmen der viskoelastischen Materialkennwerte ausgebildet ist.

[0007] Die Anregung und Messung von Lamb-Wellen ist hierbei von Vorteil, da somit die bekannten Techniken zur Erzeugung und Messung von Lamb-Wellen in dem zu untersuchenden Bauteil aus Faserverbundwerkstoff nutzbar sind. Hierdurch ist ein kosteneffizienter Einsatz von bereits erprobten und bewährten Elementen zur Anregung und Messung der Lamb-Wellen realisierbar. Während jedoch bisher lediglich Schäden und/oder Fehler in Faserverbundstrukturen mit Hilfe von Lamb-Wellen erkannt werden konnten, sind nun die viskoelastischen Materialkennwerte des Faserverbundwerkstoffes mittels Lamb-Wellen bestimmbar. Somit lässt sich die Schadenserkennung mit der erfindungsgemäßen Bestimmung der viskoelastischen Materialkennwerte mittels derselben eingesetzten Technik zum Erzeugen und Messen von Lamb-Wellen durchführen. Es ist möglich, die notwendige Anregung und Messung der Lamb-Wellen auch während des für den Faserverbundwerkstoff vorgesehenen normalen Betriebes, insbesondere kontinuierlich und/oder regelmäßig, durchzuführen. Die ständige Überwachung der viskoelastischen Materialkennwerte im ständigen Betrieb ermöglicht eine deutliche Kostenminderung, da Stillstandszeiten, Personal- und Materialkosten erheblich reduziert werden. Zum Bestimmen der viskoelastischen Materialkennwerte verbleiben die Bauteile aus Faserverbundstrukturen innerhalb der vorgesehenen Konstruktion. Dennoch sind die tatsächlichen viskoelastischen Kennwerte jederzeit bestimmbar.

[0008] Nach einer Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens werden die Lamb-Wellen mittels mindestens eines, insbesondere auf die Oberfläche des Faserverbundwerkstoffes applizierten und/oder in den Faserverbundwerkstoff integrierten, Senders angeregt. Hierdurch ist eine kostengünstige Umsetzung des erfindungsgemäßen Verfahrens realisierbar. Vorzugsweise werden die angeregten Lamb-Wellen mittels mindestens eines, insbesondere auf die Oberfläche des Faserverbundwerkstoffes applizierten und/oder in den Faserverbundwerkstoff

integrierten, Empfängers gemessen. Durch den Einsatz von bewährten und erprobten Sendern und Empfängern zur Erzeugung von Lamb-Wellen ist eine lange Betriebsdauer gewährleistet.

[0009] Entsprechend einer weiteren Ausführungsform werden Lamb-Wellen Modi S_0 , und/oder A_0 , und/oder SH_0 mittels einer Signalanalyse bestimmt. Hierbei beschreiben die Schwingungsmodi S_0 die symmetrischen Lamb-Wellen, die Schwingungsmodi A_0 die asymmetrischen Lamb-Wellen und SH_0 die Schubmodi für die jeweils betrachtete Frequenz. Die Bestimmung dieser unterschiedlichen Modi hat sich zum Detektieren von Fehlern und/oder Schäden in Faserverbundstrukturen, insbesondere im Rahmen einer Strukturzustandsüberwachung (SHM Structural Health Monitoring), bewährt. Hierbei ist von Vorteil, dass nun auf der Basis dieser Modi die tatsächlichen viskoelastischen Materialkennwerte bestimmbar sind. Somit können gleichzeitig und/oder alternierend auf der Basis der bestimmten Lamb-Wellen Modi Fehler und/oder Schäden sowie die viskoelastischen Materialkennwerte bestimmt werden.

[0010] Gemäß einer Weiterbildung werden die viskoelastischen Materialkennwerte aus dem Dispersionsverhalten der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Lamb-Wellen Modi S_0 , und/oder A_0 , und/oder SH_0 bestimmt. Während im Rahmen einer so genannten direkten Lösung das Dispersionsverhalten mittels der viskoelastischen Materialkennwerte bestimmt wird, werden hier erfindungsgemäß die viskoelastischen Materialkennwerte mittels einer so genannten inversen Lösung aufgrund des experimentell bestimmten Dispersionsverhaltens bestimmt. Auf diese Weise sind die viskoelastischen Materialkennwerte des Faserverbundwerkstoffes zerstörungsfrei und/oder während des normalen Betriebes bzw. Einsatzes des Bauteils aus dem Faserverbundwerkstoff bestimmbar.

[0011] Vorzugsweise wird als viskoelastischer Materialkennwert mindestens ein Elastizitätskoeffizient, insbesondere ein Realteil und/oder ein Imaginärteil des Elastizitätskoeffizienten, bestimmt. Ein solcher Elastizitätskoeffizient C steht über das Hookesche Gesetz im Zusammenhang mit einer Spannung σ und einer Dehnung ϵ . Das Hookesche Gesetz lautet:

$$\sigma = C_{ij} \cdot \epsilon$$

[0012] In der Voigtschen Notation lässt sich das allgemeine Hookesche Gesetz in eine einfacher zu handhabende Matrixgleichung überführen, wobei die Elastizitätskoeffizienten in einer 6×6 -Matrix, sowie die Dehnung und die Spannung als sechskomponentige Vektoren dargestellt werden. Der Elastizitätskoeffizient C_{ij} lässt sich als komplexe Zahl mit einem Realteil und einem Imaginärteil in der folgenden Form darstellen:

$$C_{ij} = C'_{ij} + i \cdot C''_{ij}$$

[0013] Die 6×6 -Matrix kann unter der Annahme der transversalen Isotropie eines undirektionalen Faserverbundwerkstoffes derart vereinfacht werden, dass fünf Elastizitätskoeffizienten zur vollständigen Beschreibung der viskoelastischen Materialeigenschaften ausreichen.

[0014] Nach einer weiteren Ausführungsform wird der Realteil des Elastizitätskoeffizienten, insbesondere der Elastizitätskoeffizienten C'_{11} , C'_{22} , C'_{55} , C'_{44} , C'_{23} , bestimmt. Zum Bestimmen des Elastizitätskoeffizienten C_{ij} wird der Realteil bestimmt, wobei es mit den Realteilen C'_{11} , C'_{22} , C'_{55} , C'_{44} , C'_{23} ausreichend ist, lediglich fünf Realteile der insgesamt 36 Elastizitätskoeffizienten aus der 6×6 -Matrix zu bestimmen.

[0015] Gemäß einer Weiterbildung werden die viskoelastischen Materialkennwerte aus dem Abklingverhalten des Dispersionsverhaltens der Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Lamb-Wellen Modi S_0 , und/oder A_0 , und/oder SH_0 bestimmt. Vorzugsweise wird der Imaginärteil des Elastizitätskoeffizienten, insbesondere der Elastizitätskoeffizienten C''_{11} , C''_{55} , C''_{22} , C''_{23} , bestimmt. Hierbei ist es zur Bestimmung der viskoelastischen Materialkennwerte ausreichend, dass mit den Imaginärteilen von C''_{11} , C''_{55} , C''_{22} , C''_{23} lediglich 4 der insgesamt 36 Imaginärteile bestimmt werden. Sofern im theoretischen Fall $C''_{ij} = 0$ gilt, beschreibt der Imaginärteil bzw. der sich hierfür ergebende Elastizitätskoeffizient C_{ij} die rein elastischen Eigenschaften des Faserverbundwerkstoffes. Im realen Falle zusätzlich dämpfender Eigenschaften gilt $C''_{ij} \neq 0$ und der Imaginärteil bzw. der sich hierfür ergebende Elastizitätskoeffizient C_{ij} beschreiben die viskoelastischen Materialeigenschaften des Faserverbundwerkstoffes.

[0016] Vorzugsweise werden die viskoelastischen Materialkennwerte, insbesondere der Realteil und/oder der Imaginärteil des Elastizitätskoeffizienten, mittels eines in einer Auswerteeinheit integrierten Moduls bestimmt. Die Verwendung einer Auswerteeinheit zur Auswertung der Lamb-Wellen Modi ist bewährt und gewährleistet einen zuverlässigen Betrieb. Hierbei ist das integrierte Modul zum Bestimmen der viskoelastischen Materialkennwerte ausgebildet.

[0017] Entsprechend einer weiteren Ausführungsform wird innerhalb des Moduls ein Strukturmodell mittels eines auf einer Plattentheorie höherer Ordnung basierenden Optimierungsverfahrens, insbesondere unter Berücksichtigung einer anisotropen Materialdämpfung, betrieben. Hierdurch ist es möglich mittels Lamb-Wellen zerstörungsfrei und während des normalen Betriebes die viskoelastischen Materialkennwerte zu bestimmen. Vorzugsweise verwendet das Optimierungsverfahren einen Nel-

der-Mead-Simplex-Algorithmus, um theoretisch bestimmte Dispersionskurven den experimentell bestimmten Dispersionskurven anzupassen.

[0018] Nach einer Weiterbildung wird das Dispersionsverhalten für eine oder mehrere Richtungen in Bezug auf die Faserausrichtung des Faserverbundwerkstoffes, insbesondere mit einem Winkel von 0° , 45° und/oder 90° zur Faserausrichtung, bestimmt. Hierdurch lässt sich die anisotrope Materialdämpfung von, insbesondere unidirektional verstärkten, Faserverbundwerkstoffen, hinreichend berücksichtigen. Vorzugsweise werden jeweils für jede Richtung mehrere, insbesondere drei, Empfänger in einer Reihe hintereinander angeordnet.

[0019] Vorzugsweise werden die viskoelastischen Materialkennwerte im Rahmen einer Strukturzustandsüberwachung (SHM Structural Health Monitoring) bestimmt. Der Einsatz und die Verwendung einer derartigen Strukturzustandsüberwachung hat sich, insbesondere während des Betriebes, zum Feststellen von Schäden und/oder Fehlern in Faserverbundwerkstoffen bewährt. Mittels einer solchen Strukturzustandsüberwachung ist nun alternativ und/oder ergänzend die Bestimmung der tatsächlichen viskoelastischen Materialkennwerte des Faserverbundwerkstoffes durchführbar.

[0020] Von besonderem Vorteil ist ein Verfahren zum Detektieren eines Fehlers und/oder Schadens in einem, insbesondere unidirektional verstärkten, Faserverbundwerkstoff, bei dem der Faserverbundwerkstoff zerstörungsfrei geprüft wird, und bei dem Lamb-Wellen in dem Faserverbundwerkstoff angeregt und gemessen werden, wobei viskoelastische Materialkennwerte des Faserverbundwerkstoffes mittels des erfindungsgemäßen Verfahrens bestimmt werden. Demnach kann anhand der kontinuierlichen und/oder regelmäßigen Bestimmung der viskoelastischen Materialkennwerte zunächst festgestellt werden, ob in dem Faserverbundwerkstoff ein Schaden und/oder Fehler entstanden ist. Vorzugsweise ist mittels einer geeigneten Anordnung des Senders und/oder Empfängers und einer entsprechenden Auswertung der Lamb-Wellen der Bereich, in dem sich der Schaden und/oder Fehler befindet, möglichst genau bestimmbar. Dies kann beispielsweise mittels der bereits bekannten Strukturzustandsüberwachung unter Verwendung von Lamb-Wellen erfolgen. Vorzugsweise wird erst nach der erfolgten Detektion eines Schadens und/oder Fehlers der normale Betrieb unterbrochen und eine genauere Schadensdiagnose und gegebenenfalls Behebung des Schadens durchgeführt. Hierdurch lassen sich die festen Wartungsintervalle vergrößern und die Kosten für Personal, Stillstandszeiten und Material, beispielsweise aufgrund geringerer Materialdicken unter Vermeidung unnötig hoher Sicherheitsbeiwerte, erheblich reduzieren.

[0021] Des Weiteren ist bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung von Vorteil, dass diese bewährt ist und somit eine lange Betriebsdauer gewährleistet ist. Andererseits kann diese Vorrichtung mehrfach genutzt werden. So kann auf die an sich bekannte Weise ein Schaden und/oder ein Fehler im Faserverbundwerkstoff bestimmt werden. Weiter kann der Bereich des Schadens und/oder Fehlers lokalisiert werden. Darüber hinaus ist es mit derselben Vorrichtung möglich, die viskoelastischen Materialkennwerte zerstörungsfrei und während des normalen Betriebes kontinuierlich und/oder regelmäßig zu bestimmen.

[0022] Nach einer Weiterbildung der Vorrichtung weist die Auswerteeinheit ein, insbesondere nachrüstbares, Modul zum Bestimmen der viskoelastischen Materialkennwerte auf. Somit sind bewährte Auswerteeinheiten auf einfache Weise derart nachrüstbar, dass die viskoelastischen Materialkennwerte bestimmbar sind. Vorzugsweise ist der Sender als ein, insbesondere dünner, piezoelektrischer Aktuator ausgebildet ist. Derartige Aktuatoren sind im langfristigen Einsatz bewährt und kostengünstig in der Beschaffung. In diesem Sinne ist vorzugsweise der Empfänger als ein, insbesondere dünner, piezoelektronischer Sensor ausgebildet. Der Sender und/oder der Empfänger können für einen Frequenzbereich zwischen 10 kHz und 500 kHz ausgelegt sein. Dies ist ein für die Verwendung von Lamb-Wellen in Faserverbundwerkstoffen üblicher Frequenzbereich, so dass die hier bestehenden Erfahrungen im Sinne der Erfindung nutzbar sind.

[0023] Von besonderem Vorteil ist die Verwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens und/oder der Vorrichtung zum Ermitteln von viskoelastischen Materialkennwerten und/oder zum Detektieren eines Fehlers und/oder Schadens in einem, insbesondere unidirektional verstärkten, Faserverbundwerkstoff im Bereich der Luft- und Raumfahrt, dem Automobilbau, dem Windkraftanlagenbau und/oder anderen Faserverbundwerkstoffe nutzende Bereiche.

[0024] Nachfolgend wird die Erfindung anhand von Ausführungsbeispielen mittels der Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

[0025] Fig. 1 eine Seitenansicht einer Vorrichtung zum Durchführen des erfindungsgemäßen Verfahrens,

[0026] Fig. 2 eine Detailansicht eines Ausschnittes aus Fig. 1,

[0027] Fig. 3 ein Flussdiagramm zur Veranschaulichung einer Vorgehensweise zur Bestimmung des Realteiles von Elastizitätskoeffizienten, und

[0028] Fig. 4 ein weiteres Flussdiagramm zur Veranschaulichung einer Vorgehensweise zur Bestim-

mung des Imaginärteiles von Elastizitätskoeffizienten.

[0029] **Fig. 1** zeigt eine Seitenansicht einer Vorrichtung zum Durchführen des erfindungsgemäßen Verfahrens. Hierbei ist die Vorrichtung in ein Flugzeug **10** integriert, wobei nur ein Teil des Flugzeuges **10** dargestellt ist. Das Flugzeug **10** weist ein Seitenleitwerk **11** auf, welches aus Faserverbundwerkstoffen hergestellt ist. In einem mittleren Bereich des Seitenleitwerkes **11** befindet sich ein Ausschnitt **12**, in dem sich Aktuatoren und Sensoren befinden, wie anhand der nachfolgenden **Fig. 2** näher erläutert wird.

[0030] **Fig. 2** zeigt eine Detailansicht des Ausschnitts **12** gemäß **Fig. 1**. Auf einem Faserverbundwerkstoff **13** ist ein Sender **14** aufgebracht. Der Sender **14** ist hier als ein dünner piezoelektrischer Aktuator **14** ausgebildet. Von dem Aktuator **14** werden Lamb-Wellen **15** in dem Faserverbundwerkstoff **13** angeregt. Des Weiteren ist eine Auswerteeinheit **16** innerhalb des Flugzeuges **10** angeordnet. Die Auswerteeinheit **16** beinhaltet ein Modul **17**. Das Modul **17** ist als ein Strukturmodell ausgebildet und in der Auswerteeinheit **16** integriert. Das Modul **17** weist eine interne Schaltung auf, wobei mittels der Schaltung ein auf einer Plattentheorie höherer Ordnung basierendes Optimierungsverfahren betrieben wird. Der Ausschnitt **12** weist weiter mehrere Empfänger **18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26** auf, wobei die Empfänger **18..26** als dünne piezoelektrische Sensoren **18..26** ausgebildet sind. Alternativ oder zusätzlich zu der hier dargestellten oberflächigen Befestigung auf dem Faserverbundwerkstoff **13** können der Aktuator **14** und die Sensoren **18..26** in den Faserverbundwerkstoff integriert sein.

[0031] Die Sensoren **18, 19** und **20** sind in Längsrichtung bzw. mit einem Winkel von 0° zur Faserausrichtung des Faserverbundwerkstoffes in einer Reihe hintereinander und in einer Linie mit dem Aktuator **14** angeordnet. Somit sind die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Lamb-Wellen Modi S_0 , und/oder A_0 , und/oder SH_0 mittels einer Analyse der Laufzeitunterschiede bei bekannter Startzeit am Aktuator **14** ermittelbar. Die Sensoren **21, 22** und **23** sind zum Bestimmen der Ausbreitungsgeschwindigkeiten unter einem Winkel von 90° zur Faserausrichtung entsprechend rechtwinklig zur Faserausrichtung und in einer Linie mit dem Aktuator **14** angeordnet. Des Weiteren sind die Sensoren **24, 25, 26** unter einem Winkel von 45° zur Faserausrichtung hintereinander und in einer Linie mit dem Aktuator **14** angeordnet.

[0032] Der Aktuator **14** und die Sensoren **18..26** sind mit der Auswerteeinheit **16** mittels Leitungen **28, 29** verbunden. Die Auswerteeinheit **16** dient einerseits als Steuerung zum Ansteuern des Aktuators **14** und der Leitung **27**, um über den Aktuator **14** in dem Faserverbundwerkstoff **13** Lamb-Wellen **15** zu erzeugen.

Andererseits werden die von den Sensoren **18..26** gemessenen Lamb-Wellen **15** an die Auswerteeinheit **16** weitergeleitet und hier zum Bestimmen der viskoelastischen Materialkennwerte mittels des Moduls **17** weiterverarbeitet. Neben der Bestimmung der viskoelastischen Materialkennwerte kann die Anordnung aus Aktuator **14**, Sensoren **18..26** und Auswerteeinheit **16** zusätzlich oder alternativ dazu verwendet werden, Schäden und/oder Fehler in dem Faserverbundwerkstoff **13** zu detektieren und/oder zu lokalisieren.

[0033] **Fig. 3** zeigt ein Flussdiagramm zur Veranschaulichung einer Vorgehensweise zur Bestimmung des Realteiles von Elastizitätskoeffizienten. In einem Schritt S10 werden die Eingangsdaten für das Strukturmodell zum Bestimmen der Realteile zur Verfügung gestellt. Hierbei handelt es sich einerseits um Angaben zum Lagenaufbau des Laminats des Faserverbundwerkstoffes **13** hinsichtlich der Anzahl der Lagen und der Orientierung der einzelnen Lagen zueinander. Weiter beinhalten die Eingangsdaten Angaben über die Dicke des Laminats, die Dichte des Faserverbundwerkstoffes **13** sowie Startwerte zum Bestimmen des theoretischen Dispersionsverhaltens. Hiernach folgt in einem Schritt S11 das Hinzufügen der per Messung bestimmten Ausbreitungsgeschwindigkeiten der symmetrischen Schwingungsmodi S_0 für eine Ausbreitungsrichtung längs der Faserausrichtung. Hierzu werden die Laufzeitunterschiede der Sensoren **18, 19** und **20** unter Berücksichtigung der Startzeit der Lamb-Wellen **15** am Aktuator **14** mittels der Auswerteeinheit **16** analysiert. Sodann erfolgt in einem Schritt S12 die Bestimmung des Realteils C'_{11} mittels des Moduls **17**, wobei der Realteil C'_{11} mittels des experimentell bestimmten Dispersionsverhaltens für die symmetrischen Schwingungsmodi S_0 für eine Ausbreitungsrichtung längs der Faserausrichtung ermittelt wird. Anschließend werden in einem Schritt S13 die per Messung bestimmten Ausbreitungsgeschwindigkeiten der symmetrischen Schwingungsmodi S_0 für eine Ausbreitungsrichtung in einem Winkel 90° zu der Faserausrichtung für die Verarbeitung, in dem Strukturmodell bereitgestellt. Hierzu erfolgt eine Analyse der Laufzeitunterschiede der Sensoren **21, 22** und **23** unter Berücksichtigung der Startzeit der Lamb-Wellen **15** am Aktuator **14** mittels der Auswerteeinheit **16**. Mittels des Moduls **17** folgt hierauf und unter Verwendung des experimentell bestimmten Dispersionsverhaltens für die symmetrischen Schwingungsmodi S_0 für eine Ausbreitungsrichtung in einem Winkel von 90° zur Faserausrichtung im Schritt S14 die Bestimmung des Realteiles C'_{22} . Nachfolgend werden in einem Schritt S15 die per Messung bestimmten Ausbreitungsgeschwindigkeiten der asymmetrischen Schwingungsmodi A_0 für eine Ausbreitungsrichtung längs der Faserausrichtung eingebracht, wobei hierzu erneut die Laufzeitunterschiede der Sensoren **18, 19, 20** bezüglich der am Aktuator **14** gestarteten

Lamb-Wellen **15** mittels der Auswerteeinheit **16** ausgewertet werden. Sodann wird im Schritt S16 der Realteil C'_{55} mittels des Moduls **17** auf der Basis des experimentell bestimmten Dispersionsverhaltens für die asymmetrischen Schwingungsmodi A_0 für eine Ausbreitungsrichtung längs der Faserausrichtung bestimmt.

[0034] Hiernach folgt in einem Schritt S17 eine Überprüfung der Genauigkeit. Hierbei wird die experimentell bestimmte Dispersionskurve mit der theoretischen Dispersionskurve mittels einer Fehleranalyse, beispielsweise mittels der Bestimmung der mittleren quadratischen Abweichung, verglichen. Sofern die hierbei festgestellte Übereinstimmung nicht hinreichend ist, da beispielsweise die mittlere quadratische Abweichung größer als ein bestimmter Schwellwert ist, wird ein Nelder-Mead-Simplex-Algorithmus durchlaufen. Aufgrund des Nelder-Mead-Simplex-Algorithmus wird der Verlauf der theoretischen Dispersionskurve verändert, um eine bessere Übereinstimmung mit der experimentell bestimmten Dispersionskurve zu erreichen. Um dies zu prüfen, wird zu Schritt S15 zurückgesprungen und die Schritte S16 und S17 werden erneut durchlaufen. Wird in Schritt S17 eine hinreichende Genauigkeit festgestellt, wenn beispielsweise die ermittelte mittlere quadratische Abweichung geringer als der Schwellwert ist, werden in einem Schritt S18 die per Messung bestimmten Ausbreitungsgeschwindigkeiten der asymmetrischen Schwingungsmodi A_0 für eine Ausbreitungsrichtung in einem Winkel von 90° zu der Faserausrichtung unter Verwendung der Sensoren **21**, **22** und **23** und der Auswerteeinheit **16** eingebracht, um sodann mittels des somit experimentell bestimmten Dispersionsverhaltens in einem Schritt S19 den Realteil C'_{44} mittels des Moduls **17** zu bestimmen. Hierauf erfolgt im Schritt S20 analog zu Vorgehensweise in Schritt S17 eine Überprüfung der Genauigkeit. Ist die Übereinstimmung der experimentell bestimmten Dispersionskurve für C'_{44} im Vergleich zu der theoretischen Dispersionskurve nicht hinreichend, wird erneut ein Nelder-Mead-Simplex-Algorithmus zur Anpassung der theoretischen Dispersionskurve durchlaufen und zu Schritt S18 zurückgesprungen. Sodann werden die Schritte S19 und S20 erneut durchlaufen. Wird in Schritt S20 aufgrund der Fehleranalyse eine hinreichende Genauigkeit festgestellt wird in einem Schritt S21 der Realteil C'_{23} mittels des Moduls **17** bestimmt. Es erfolgt in einem Schritt S22 erneut eine Überprüfung der Genauigkeit, um bei nicht hinreichender Genauigkeit zu Schritt S11 zurückzuspringen. Sodann werden die folgenden Schritte S12 bis S22 erneut durchlaufen, wobei jedoch als Startwerte die nun bereits bestimmten C'_{ij} verwendet werden. Sobald in Schritt S22 eine hinreichende Übereinstimmung der theoretisch und experimentell bestimmten Dispersionskurven festgestellt wird, werden die Realteile C'_{11} , C'_{22} , C'_{55} , C'_{44} , C'_{23} in einem Schritt S23 ausgegeben, um sodann zur Bestimmung der Imaginärteile verwendet

zu werden.

[0035] **Fig. 4** zeigt ein weiteres Flussdiagramm zur Veranschaulichung einer Vorgehensweise zur Bestimmung des Imaginärteils von Elastizitätskoeffizienten. In dem Schritt S24 werden die Eingangsdaten für das Strukturmodell zum Bestimmen der Imaginärteile zur Verfügung gestellt. Wie bei der Bestimmung des Realanteiles gemäß **Fig. 3** handelt es sich hierbei einerseits um Angaben zum Lageraufbau des Laminats des Faserverbundwerkstoffes **13** hinsichtlich der Anzahl der Lagen und der Orientierung der einzelnen Lagen zueinander sowie Angaben über die Dicke des Laminats, die Dichte des Faserverbundwerkstoffes **13** sowie Startwerte zum Bestimmen des theoretischen Dispersionsverhaltens. Zusätzlich beinhalten die Eingangsdaten die gemäß **Fig. 3** ermittelten Realanteile C'_{ij} . Somit stellt die Bestimmung der Realanteile C'_{ij} eine Voraussetzung zum Bestimmen der Imaginäranteile dar.

[0036] Es folgt in einem Schritt S25 das Hinzufügen des per Messung bestimmten Abklingverhaltens der symmetrischen Schwingungsmodi S_0 für eine Ausbreitungsrichtung längs der Faserausrichtung unter Verwendung der Auswerteeinheit **16**. Hieran schließt sich in einem Schritt S26 die Bestimmung des Imaginärteils C''_{11} mittels des Moduls **17** an, wobei hierzu die experimentell bestimmten Abklingverhalten der symmetrischen Schwingungsmodi S_0 für eine Ausbreitungsrichtung längs der Faserausrichtung verwendet werden. Sodann erfolgt in einem Schritt S27 eine Überprüfung der Genauigkeit, wobei der Verlauf des theoretischen Abklingverhaltens mit dem experimentell bestimmten Abklingverhalten mittels einer Fehleranalyse analog zu den Schritten S17, S20, S22 verglichen wird. Sofern die Übereinstimmung nicht hinreichend ist, wird ein Nelder-Mead-Simplex-Algorithmus durchlaufen, um die theoretische Abklingkurve zu verändern und eine bessere Übereinstimmung mit der experimentell bestimmte Abklingkurve zu erhalten. Um dies nach Durchlaufen des Nelder-Mead-Simplex-Algorithmus zu überprüfen, wird zu Schritt S25 zurückgesprungen und die Schritte S26 und S27 werden erneut durchlaufen.

[0037] Wird in Schritt S27 eine hinreichende Genauigkeit festgestellt, wird in einem Schritt S28 das per Messung bestimmte Abklingverhalten der asymmetrischen Schwingungsmodi A_0 für eine Ausbreitungsrichtung längs zu der Faserausrichtung, also mit einem Winkel von 0° , eingebracht, um sodann in einem Schritt S29 den Imaginärteil C''_{55} analog zu dem vorgenannten zu bestimmen. Hierauf erfolgt in einem Schritt S30 eine Überprüfung der Genauigkeit hinsichtlich der Übereinstimmung zwischen der theoretischen und experimentellen Abklingkurve für den Imaginärteil C''_{55} . Ist diese nicht hinreichend, wird ein Nelder-Mead-Simplex-Algorithmus durchlaufen und zu Schritt S28 zurückgesprungen. Sodann werden die

Schritte S29 und S30 erneut durchlaufen. Wird in Schritt S30 eine hinreichende Genauigkeit festgestellt, wird in einem Schritt S31 das per Messung bestimmte Abklingverhalten der symmetrischen Schwingungsmodi S_0 für eine Ausbreitungsrichtung in einem Winkel von 90° zu der Faserausrichtung für die Verarbeitung in dem Strukturmodell bereitgestellt. Hierauf folgt im Schritt S32 die Bestimmung der Imaginärteile C''_{22} und C''_{23} mittels des Moduls **17** und des experimentell bestimmten Abklingverhaltens der symmetrischen Schwingungsmodi S_0 für eine Ausbreitungsrichtung in einem Winkel von 90° zur Faserausrichtung. In einem Schritt S33 erfolgt mittels einer Fehleranalyse eine Prüfung der Genauigkeit bezüglich der Übereinstimmung zwischen den theoretischen und experimentell bestimmten Abklingkurven für die Imaginärteile C''_{22} und C''_{23} . Wird diese als nicht hinreichend bestimmt, wird ein Nelder-Mead-Simplex-Algorithmus durchlaufen und zu Schritt S31 zurückgesprungen, um dann die Schritte S32 und S33 erneut zu durchlaufen.

23	Empfänger
24	Empfänger
25	Empfänger
26	Empfänger
27	Leitung
28	Leitung
29	Leitung
S10..S35	Schritt

[0038] Wird in Schritt S33 eine hinreichende Genauigkeit bestimmt, wird in einem Schritt S34 erneut die Genauigkeit überprüft. Ergibt diese erneute Prüfung der Genauigkeit in Schritt S34 keine hinreichend gutes Ergebnis wird zu Schritt S25 zurückgesprungen, um die Schritte S26 bis S34 erneut zu durchlaufen. Hierbei werden anstelle der ursprünglichen Startwerte zur Berechnung der theoretischen Abklingkurven nun die bereits bestimmten Imaginärteile C''_{ij} verwendet. Sobald in Schritt S34 eine hinreichende Genauigkeit festgestellt wird, werden die Imaginärteile C''_{11} , C''_{55} , C''_{22} , C''_{23} ausgegeben.

[0039] Somit lassen sich die viskoelastischen Materialkennwerte des Faserverbundwerkstoffes **13** mittels Lamb-Wellen **15** bestimmen. Hierdurch ist es möglich, die tatsächlichen Materialkennwerte kontinuierlich und/oder regelmäßig zu bestimmen und zu kontrollieren. Hierzu kann der Faserverbundwerkstoff **13** in der Gesamtkonstruktion verbleiben und die viskoelastischen Materialkennwerte sind während des normalen Betriebes bestimmbar.

Bezugszeichenliste

10	Flugzeug
11	Seitenleitwerk
12	Ausschnitt
13	Faserverbundwerkstoff
14	Sender
15	Lamb-Wellen
16	Auswerteeinheit
17	Modul
18	Empfänger
19	Empfänger
20	Empfänger
21	Empfänger
22	Empfänger

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

- DE 10214984 **[0002]**

Patentansprüche

C''_{11} , C''_{55} , C''_{22} , C''_{23} , bestimmt wird.

1. Verfahren zum Bestimmen eines Strukturzustandes eines, insbesondere unidirektional verstärkten, Faserverbundwerkstoffes (13), bei dem der Faserverbundwerkstoff (13) zerstörungsfrei geprüft wird, und bei dem Lamb-Wellen (15) in dem Faserverbundwerkstoff (13) angeregt und gemessen werden, **dadurch gekennzeichnet**, dass viskoelastische Materialkennwerte des Faserverbundwerkstoffes (13) bestimmt werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Lamb-Wellen (15) mittels mindestens eines, insbesondere auf die Oberfläche des Faserverbundwerkstoffes (13) applizierten und/oder in den Faserverbundwerkstoff (13) integrierten, Senders (14) angeregt werden.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die angeregten Lamb-Wellen (15) mittels mindestens eines, insbesondere auf die Oberfläche des Faserverbundwerkstoffes (13) applizierten und/oder in den Faserverbundwerkstoff (13) integrierten, Empfängers (18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26) gemessen werden.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass Lamb-Wellen (15) Modi S_0 , und/oder A_0 , und/oder SH_0 mittels einer Signalanalyse bestimmt werden.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die viskoelastischen Materialkennwerte aus dem Dispersionsverhalten der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Lamb-Wellen (15) Modi S_0 , und/oder A_0 , und/oder SH_0 bestimmt werden.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass als Materialkennwert mindestens ein Elastizitätskoeffizient, insbesondere ein Realteil und/oder ein Imaginärteil des Elastizitätskoeffizienten, bestimmt wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Realteil des Elastizitätskoeffizienten, insbesondere der Elastizitätskoeffizienten C'_{11} , C'_{22} , C'_{55} , C'_{44} , C'_{23} , bestimmt wird.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die viskoelastischen Materialkennwerte aus dem Abklingverhalten des Dispersionsverhaltens der Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Lamb-Wellen (15) Modi S_0 , und/oder A_0 , und/oder SH_0 bestimmt werden.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass der Imaginärteil des Elastizitätskoeffizienten, insbesondere der Elastizitätskoeffizienten

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die viskoelastischen Materialkennwerte, insbesondere der Realteil und/oder der Imaginärteil des Elastizitätskoeffizienten, mittels eines in einer Auswerteeinheit (16) integrierten Moduls (17) bestimmt werden.

11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass innerhalb des Moduls (17) ein Strukturmodell mittels eines auf einer Plattentheorie höherer Ordnung basierenden Optimierungsverfahrens, insbesondere unter Berücksichtigung einer anisotropen Materialdämpfung, betrieben wird.

12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass das Optimierungsverfahren einen Nelder-Mead-Simplex-Algorithmus verwendet.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass das Dispersionsverhalten für eine oder mehrere Richtungen in Bezug auf die Faserausrichtung des Faserverbundwerkstoffes (13), insbesondere mit einem Winkel von 0° , 45° und/oder 90° zur Faserausrichtung, bestimmt wird.

14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die viskoelastischen Materialkennwerte im Rahmen einer Strukturzustandsüberwachung (SHM Structural Health Monitoring) bestimmt werden.

15. Verfahren zum Detektieren eines Fehlers und/oder Schadens in einem, insbesondere unidirektional verstärkten, Faserverbundwerkstoff (13), bei dem der Faserverbundwerkstoff (13) zerstörungsfrei geprüft wird, und bei dem Lamb-Wellen (15) in dem Faserverbundwerkstoff (13) angeregt und gemessen werden, dadurch gekennzeichnet, dass viskoelastische Materialkennwerte des Faserverbundwerkstoffes (13) nach dem Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 14 bestimmt werden.

16. Vorrichtung zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche mit mindestens einem Sender (14), und mit mindestens einem Empfänger (18..26), wobei der Sender (14) und der Empfänger (18..26) am und/oder in dem Faserverbundwerkstoff (13) angeordnet sind, dadurch gekennzeichnet, dass eine Auswerteeinheit (16) zum Bestimmen der viskoelastischen Materialkennwerte ausgebildet ist.

17. Vorrichtung nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass die Auswerteeinheit (16) ein, insbesondere nachrüstbares, Modul (17) zum Bestimmen der viskoelastischen Materialkennwerte aufweist.

18. Vorrichtung nach Anspruch 16 oder 17, dadurch gekennzeichnet, dass der Sender (**14**) als ein, insbesondere dünner, piezoelektrischer Aktuator ausgebildet ist.

19. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 16 bis 18, dadurch gekennzeichnet, dass der Empfänger (**18..26**) als ein, insbesondere dünner, piezoelektronischer Sensor ausgebildet ist.

20. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 16 bis 19, dadurch gekennzeichnet, dass der Sender (**14**) und/oder der Empfänger (**18..26**) für einen Frequenzbereich zwischen 10 kHz und 500 kHz ausgelegt sind.

21. Verwendung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 15 und/oder einer Vorrichtung nach einem der Ansprüche 16 bis 20 zum Ermitteln von viskoelastischen Materialkennwerten und/oder zum Detektieren eines Fehlers und/oder Schadens in einem, insbesondere unidirektional verstärkten, Faserverbundwerkstoff (**13**) im Bereich der Luft- und Raumfahrt, dem Automobilbau, dem Windkraftanlagenbau und/oder anderen Faserverbundwerkstoffe (**13**) nutzende Bereiche.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

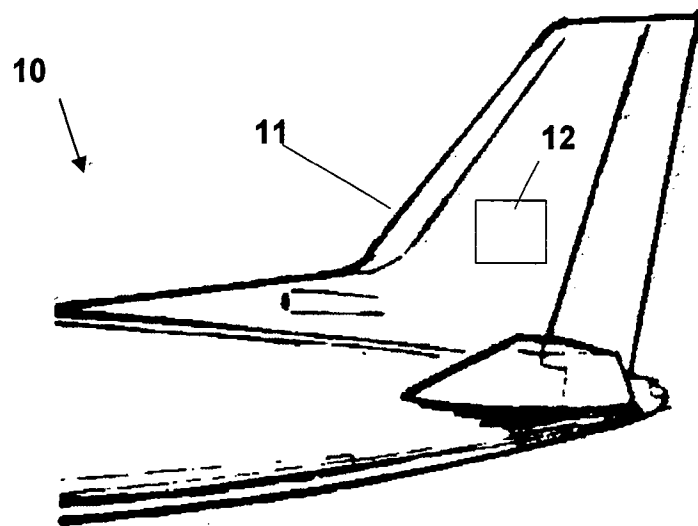


Fig. 1

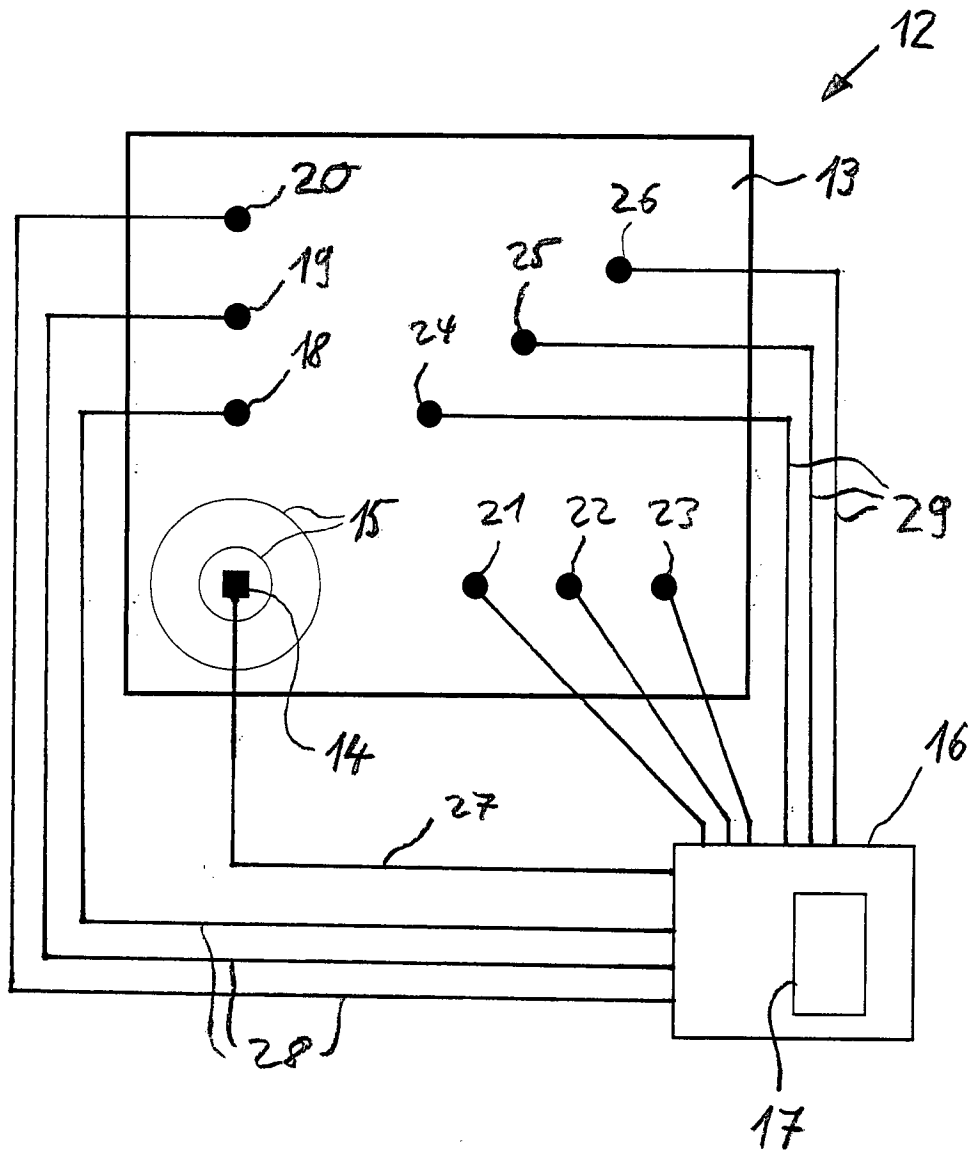


Fig. 2

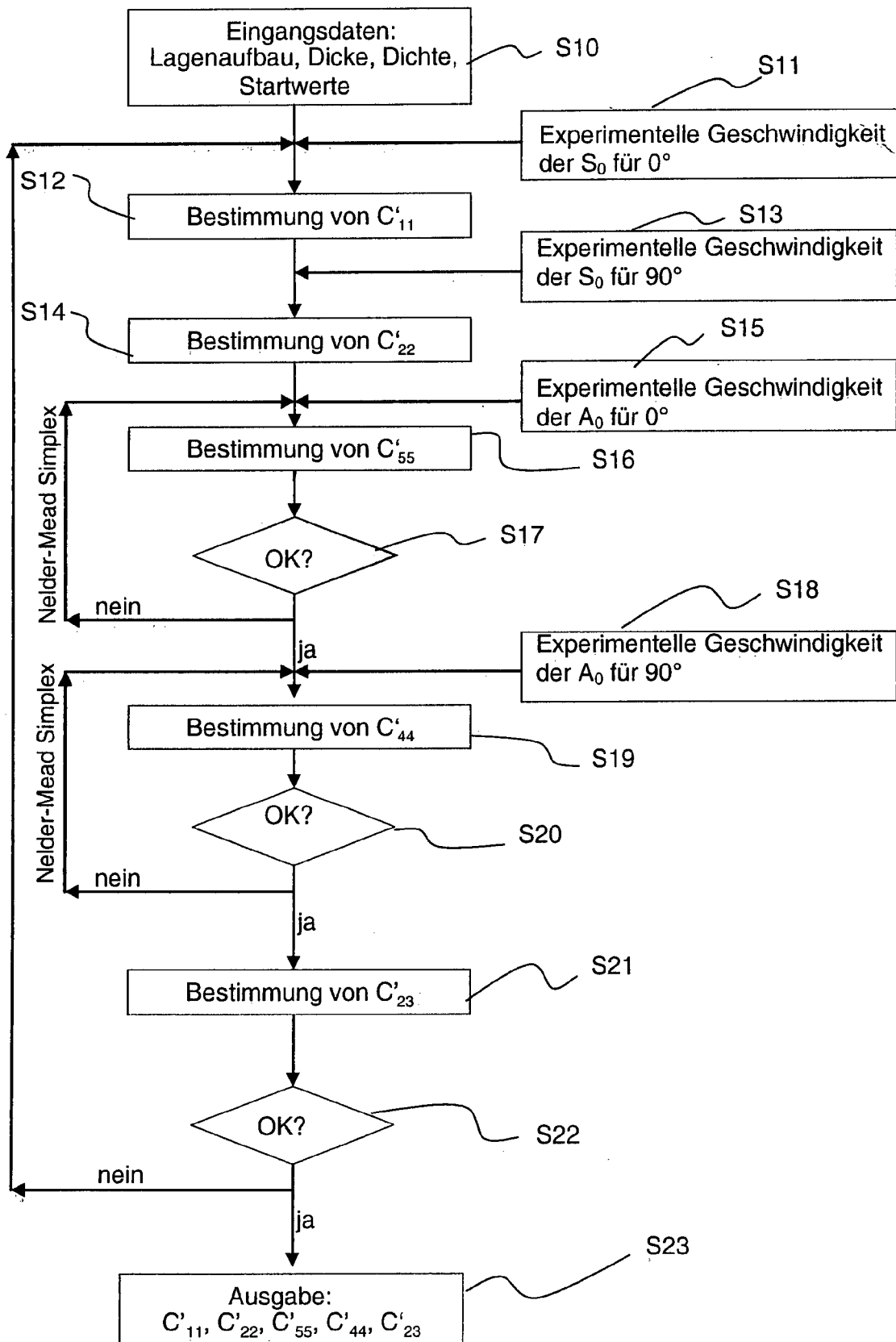


Fig. 3

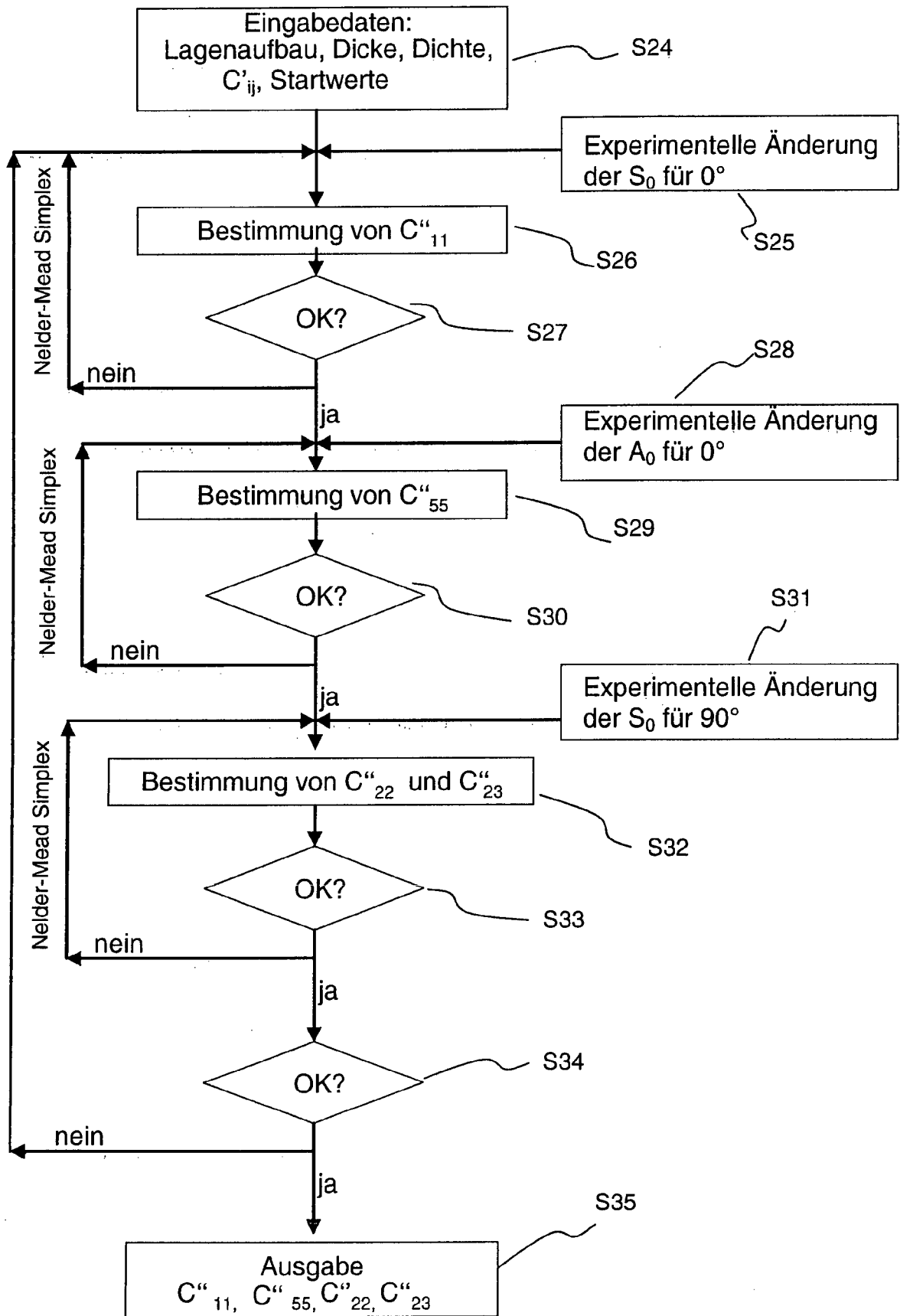


Fig. 4