



(10) DE 10 2021 002 090 A1 2022.10.27

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2021 002 090.1**  
(22) Anmeldetag: **21.04.2021**  
(43) Offenlegungstag: **27.10.2022**

(51) Int Cl.: **G01N 29/265** (2006.01)  
**G01N 29/04** (2006.01)  
**G01N 29/34** (2006.01)  
**G01B 11/24** (2006.01)  
**G01H 9/00** (2006.01)  
**B64C 39/00** (2006.01)

(71) Anmelder:  
**BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH, 28359 Bremen, DE**

(74) Vertreter:  
**BOEHMERT & BOEHMERT Anwaltspartnerschaft mbB - Patentanwälte Rechtsanwälte, 28209 Bremen, DE**

(72) Erfinder:  
**Denhof, Dimitri, M.Sc., 28325 Bremen, DE; Lütjen, Michael, Dr.-Ing., 28857 Syke, DE; Staar, Benjamin, M. Sc., 28759 Bremen, DE; Freitag, Michael, Prof. Dr.-Ing., 28719 Bremen, DE; Rohde, Ann-Kathrin, Dr.-Ing., 28355 Bremen, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:  
**siehe Folgeseiten**

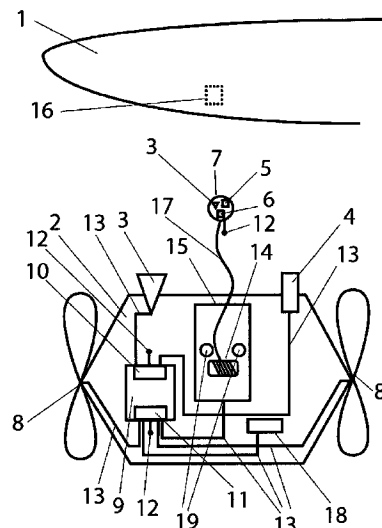
Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Rechercheantrag gemäß § 43 PatG ist gestellt.

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

(54) Bezeichnung: **Luftfahrzeug-basiertes Verfahren zur Detektion einer Schadstelle mittels mechanischer und/oder akustischer Impulsanregung bei einem zu untersuchenden Strukturelement, sowie Impulsball, Luftfahrzeug und System zur Durchführung derselben**

(57) Zusammenfassung: Luftfahrzeug-basiertes Verfahren zur Detektion einer Schadstelle mittels mechanischer und/oder akustischer Impulsanregung bei einem zu untersuchenden Strukturelement umfassend: Bereitstellen eines bemannten und unbemannten Luftfahrzeugs, wobei das Luftfahrzeug eine mechanische und/oder akustische Impulserzeugungseinrichtung zur mechanischen und/oder akustischen Anregung eines zu untersuchenden Strukturelements und eine Reaktionsermittlungseinrichtung zur Ermittlung einer Reaktion des Strukturelements auf ein Anregen des Strukturelements mittels eines mechanischen und/oder akustischen Impulses umfasst, mit oder ohne Eingriffe eines Piloten gesteuertes Abfliegen zumindest eines Bereiches des Strukturelements mittels des Luftfahrzeugs, wobei das Abfliegen zumindest ein Einnehmen einer ersten vordefinierten Position in einem Abstand zu einer zweiten vordefinierten Position an dem Strukturelement umfasst, Aufbringen eines mechanischen und/oder akustischen Impulses mittels der Impulserzeugungseinrichtung auf die zweite Position an dem Strukturelement, Ermitteln einer Reaktion des Strukturelements auf das Aufbringen des erzeugten Impulses auf die zweite vordefinierte Position mittels der Reaktionsermittlungseinrichtung, Vergleichen der ermittelten Reaktion mit einer vordefinierten Referenzreaktion und Ermitteln einer Abweichung der ermittelten Reaktion von der vordefinierten Referenzreaktion, und Ausgeben eines Signals, dass eine Schadstelle ermittelt wurde, in Abhängigkeit von der ermittelten Abweichung.



(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	10 2016 214 655	A1
US	2019 / 0 391 059	A1
US	2020 / 0 363 822	A1
JP	2019- 196 973	A
JP	2021- 1 823	A
JP	2020- 12 676	A

Norm VDI 4550 Blatt 1 2017-04-00.  
Schwingungsanalysen - Verfahren und  
Darstellung der Ergebnisse - Begriffe und  
grundlegende Verfahren  
Richtlinie US 6: Akustische  
Resonanzverfahren zur Zerstörungsfreien  
Prüfung - Prinzip, Vorgehensweise, Merkmale,  
Validierung. Berlin : DGZfP, 2009. 28 S. - ISBN  
978-3-940283-23-8

## Beschreibung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Luftfahrzeug-basiertes Verfahren zur Detektion von Schadstellen mittels mechanischer und/oder akustischer Impulsanregung bei einem zu untersuchenden Strukturelement, insbesondere einem Strukturelement aus Laminaten, wie zum Beispiel einem Rotorblatt und einem Turm einer Windkraftanlage, oder insbesondere einem großen und/oder schwer zugänglichen Strukturelement, wie zum Beispiel einer Windkraftanlage, einer Brückenstruktur und einem Flugzeug, und wie zum Beispiel einem Wasserfahrzeug, einen Impulsball zum Erzeugen eines Kraftimpulses zur mechanischen Anregung eines zu untersuchenden Strukturelements, insbesondere eines Strukturelements aus Laminaten, wie zum Beispiel eines Rotorblatts oder eines Turms einer Windkraftanlage, insbesondere eines großen und/oder schwer zugänglichen Strukturelements, wie zum Beispiel einer Windkraftanlage, einer Brückenstruktur oder eines Flugzeugs, und wie zum Beispiel eines Wasserfahrzeugs, ein bemanntes oder unbemanntes Luftfahrzeug, insbesondere Drehflügler, insbesondere Drohne, und ein System zur Detektion einer Schadstelle mittels mechanischer und/oder akustischer Impulsanregung bei einem zu untersuchenden Strukturelement, insbesondere einem Strukturelement aus Laminaten, wie zum Beispiel einem Rotorblatt und einem Turm einer Windkraftanlage, oder insbesondere einem großen und/oder schwer zugänglichen Strukturelement, wie zum Beispiel einer Windkraftanlage, einer Brückenstruktur und einem Flugzeug, und wie zum Beispiel einem Wasserfahrzeug. Als technische Gebiete sind insbesondere die Oberflächeninspektion, die Materialprüfung und die Instandhaltung zu nennen. Mit dem Begriff „Luftfahrzeug“ sollen insbesondere Luftfahrzeuge mit Kraftantrieb, wie zum Beispiel ein Luftschiff, gemeint sein.

**[0002]** Das der vorliegenden Erfindung zugrundeliegende Problem wird lediglich beispielhaft an Rotorblättern für Windenergieanlagen erläutert. Es ist jedoch darauf nicht beschränkt.

**[0003]** Aktuell werden Industriekletterer eingesetzt, um Rotorblätter von Windenergieanlagen optisch und akustisch zu überprüfen. Hierzu erfolgt eine Sichtprüfung des gesamten Rotorblattes und im Bedarfsfall eine manuelle akustische Anregung/Detektion der möglichen Schadstelle zur Erkennung von Materialfehlern. Bei den sogenannten Gurt-Steg-Verklebungen und Beam-Strukturen wird der gesamte Bereich auch unabhängig von einer Sichtprüfung vollständig akustisch angeregt und überprüft, um nicht sichtbare Schadstellen zu erkennen.

**[0004]** Der Einsatz von Industriekletterern stellt einen wirtschaftlichen Aufwand, eine mangelnde Verfügbarkeit sowie eine Personengefährdung bzw.

ergonomische Beeinträchtigung dar. Zudem kommen menschliche Fehler bei der Schadstellenerkennung zum Tragen, weil sowohl die Sichtprüfung als auch die akustische Anregung/Detektion subjektiv und personenindividuell durchgeführt werden. Gegebenenfalls können auch relevante Prüfbereiche beispielsweise bei Schlechtwetter nur oberflächlich begutachtet werden.

**[0005]** Der Einsatz von Drohnen (Flugdrohnen) zur automatischen optischen Oberflächeninspektion von Windenergieanlagen ist Stand der Forschung. Als Stand der Technik ist seit ca. 2 bis 3 Jahren die vollständige optische Erfassung der Windenergieanlagen bekannt, welche um eine nachträgliche manuelle Sichtprüfung und ggf. manuelle Schallprüfung zuvor als relevant ermittelter Bereiche ergänzt wird.

**[0006]** Der vorliegenden Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine automatisierte Erkennung von Schadstellen an, insbesondere großen und/oder schwer zugänglichen, Strukturelementen, insbesondere aus Faserverbundwerkstoffen, zu ermöglichen.

**[0007]** Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe gemäß einem ersten Aspekt gelöst durch ein Luftfahrzeug-basiertes Verfahren zur Detektion von Schadstellen mittels mechanischer und/oder akustischer Impulsanregung bei einem zu untersuchenden Strukturelement, insbesondere einem Strukturelement aus Laminaten, wie zum Beispiel einem Rotorblatt und einem Turm einer Windkraftanlage, insbesondere einem großen und/oder schwer zugänglichen Strukturelement, wie zum Beispiel einer Windkraftanlage, einer Brückenstruktur und einem Flugzeug, und wie zum Beispiel einem Wasserfahrzeug, umfassend:

- Bereitstellen eines bemannten und unbemannten Luftfahrzeugs, insbesondere eines Drehflüglers, insbesondere einer Drohne, wobei das Luftfahrzeug eine mechanische und/oder akustische Impulserzeugungseinrichtung zur mechanischen und/oder akustischen Anregung eines zu untersuchenden Strukturelements, insbesondere eines Strukturelements aus Laminaten, wie zum Beispiel eines Rotorblatts und eines Turms einer Windkraftanlage, oder insbesondere eines großen und/oder schwer zugänglichen Strukturelements, wie zum Beispiel einer Windkraftanlage, einer Brückenstruktur und eines Flugzeugs, und wie zum Beispiel eines Wasserfahrzeugs, und eine Reaktionsermittlungseinrichtung zur Ermittlung einer Reaktion des Strukturelements auf ein Anregen des Strukturelements mittels eines mechanischen und/oder akustischen Impulses umfasst,
- mit oder ohne Eingriffe eines Piloten gesteuertes Abfliegen zumindest eines Bereiches des

Strukturelements mittels des Luftfahrzeugs, vorzugsweise gemäß einer vorab festgelegten Systematik, wobei das Abfliegen zumindest ein Einnehmen einer ersten vordefinierten Position in einem Abstand zu einer zweiten vordefinierten Position auf dem Strukturelement umfasst,

- Aufbringen eines mechanischen und/oder akustischen Impulses mittels der Impulserzeugungseinrichtung auf die zweite Position an dem Strukturelement,
- Ermitteln einer Reaktion des Strukturelements auf das Aufbringen des erzeugten Impulses auf die zweite vordefinierte Position mittels der Reaktionsermittlungseinrichtung,
- Vergleichen der ermittelten Reaktion mit einer vordefinierten Referenzreaktion und Ermitteln einer Abweichung der ermittelten Reaktion von der vordefinierten Referenzreaktion, und
- Ausgeben eines Signals, dass eine Schadstelle ermittelt wurde, in Abhängigkeit von der ermittelten Abweichung.

**[0008]** Beispielsweise kann eine vorab festgelegte Systematik darin bestehen, dass lediglich diejenigen Stellen bzw. Bereiche angesteuert werden, die beispielsweise aufgrund einer Vorabprüfung, insbesondere eine optische Prüfung, als potentielle Schadstellen bzw. Schadbereiche eingestuft werden.

**[0009]** Der Pilot kann sich in dem Luftfahrzeug befinden oder aber das Luftfahrzeug mittels einer Fernsteuerung steuern. Das Luftfahrzeug kann aber auch ohne einen Eingriff eines Piloten und damit autonom fliegen.

**[0010]** Strukturelemente können z. B. auf Grund ihrer Position schwer zugänglich sein, beispielsweise von Wasser umgeben bei Offshore-Windkraftanlagen oder Wasserfahrzeugen oder Brückenbauwerken. Zudem können sie zusätzlich oder alternativ auf Grund ihrer Größe (insb. Höhe) schwerer zugänglich sein. D. h., dass man nicht mit herkömmlichen bzw. einfachen Mitteln, wie z. B. einer Hebebühne, eine Position erreichen kann, in der man die Prüfungen durchführen muss.

**[0011]** Prinzipiell könnte man auch zeitgleich oder zur Verifikation eines ersten Ergebnisses ein zweites Messverfahren einsetzen.

**[0012]** Gemäß einem zweiten Aspekt wird diese Aufgabe gelöst durch einen Impulsball zum Erzeugen eines Kraftimpulses zur mechanischen Anregung eines zu untersuchenden Strukturelements, insbesondere eines Strukturelements aus Laminaten, wie zum Beispiel eines Rotorblatts und eines Turms einer Windkraftanlage, insbesondere eines großen und/oder schwer zugänglichen Strukturele-

ments, wie zum Beispiel einer Windkraftanlage, einer Brückenstruktur oder eines Flugzeugs, und wie zum Beispiel eines Wasserfahrzeugs, insbesondere zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 10, umfassend

- einen ballartigen Körper,
- mindestens eine in dem ballartigen Körper befindliche Messeinrichtung, insbesondere einen Kraftsensor und/oder einen Beschleunigungssensor, zum Messen eines mit dem Impulsball erzeugten Kraftimpulses,
- mindestens eine Reaktionsermittlungseinrichtung, insbesondere ein Mikrofon und/oder ein Laservibrometer, zum Messen einer Reaktion des Strukturelements, und
- eine in dem ballartigen Körper befindliche kabellose und/oder kabelgebundene Datenübertragungseinrichtung, die mit der mindestens einen Messeinrichtung zum Messen eines mit dem Impulsball erzeugten Kraftimpulses sowie mit der mindestens einen Reaktionsermittlungseinrichtung zum Messen einer Reaktion des Strukturelements eines mit dem Impulsball datentechnisch in Verbindung steht und konfiguriert ist, um Messdaten von der mindestens einen Messeinrichtung sowie der mindestens einen Reaktionsermittlungseinrichtung an eine außerhalb des Impulsballes befindliche Auswerteeinheit weiterzuleiten,

wobei der Impulsball ferner ein längliches, vorzugsweise aufwickelbares, Verbindungselement, welches an dem der ballartige Körper befestigt oder befestigbar ist, aufweist und/oder wobei der ballartige Körper konfiguriert ist, um an einem länglichen, vorzugsweise aufwickelbaren, Verbindungselement befestigt zu werden.

**[0013]** In der Auswerteeinheit werden vorzugsweise die mit der Messeinrichtung ermittelten Daten sowie die mit der Reaktionsermittlungseinrichtung ermittelten Daten zur Auswertung einer auf einen Kraftimpuls bezogenen vordefinierten Reaktion im Vergleich zu einer auf einen Kraftimpuls bezogenen gemessenen Reaktion herangezogen. Eine vordefinierte oder vordefinierbare Mindestabweichung entspricht einer Detektion einer eventuellen Schadstelle.

**[0014]** Weiterhin wird diese Aufgabe gemäß einem dritten Aspekt gelöst durch ein bemanntes oder unbemanntes Luftfahrzeug, insbesondere Drehflügler, insbesondere Drohne, insbesondere zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 10, umfassend:

- einen Impulsball nach einem der Ansprüche 11 bis 14,

- eine Impulsballabschusseinrichtung zum Abschießen des Impulsballs, wobei der Impulsball über sein Verbindungselement oder ein Verbindungselement mit der Impulsballabschusseinrichtung zum Zurückholen des Impulsballes nach einem Abschuss verbunden ist,

- eine Kommunikationseinrichtung zur Kommunikation mit der Datenübertragungseinrichtung des Impulsballes.

**[0015]** Darüber hinaus wird diese Aufgabe gemäß einem weiteren Aspekt gelöst durch ein bemanntes oder unbemanntes Luftfahrzeug, insbesondere Drehflügler, insbesondere Drohne, insbesondere zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 10, umfassend:

- einen Lautsprecher zur Erzeugung eines akustischen Impulses, und

- eine, vorzugsweise optische, Reaktionsermittlungseinrichtung, insbesondere eine Körperschallmesseinrichtung, insbesondere wobei die Körperschallmesseinrichtung ein Laservibrometer umfasst, und/oder eine, vorzugsweise akustische, Reaktionsermittlungseinrichtung, insbesondere eine Luftschallmesseinrichtung, insbesondere wobei die Luftschallmesseinrichtung ein Mikrophon umfasst.

**[0016]** Schließlich wird diese Aufgabe gemäß einem weiteren Aspekt auch gelöst durch ein System zur Detektion einer Schadstelle mittels mechanischer und/oder akustischer Impulsanregung bei einem zu untersuchenden Strukturelement, insbesondere einem Strukturelement aus Laminaten, wie zum Beispiel einem Rotorblatt und einem Turm einer Windkraftanlage, oder insbesondere einem großen und/oder schwer zugänglichen, Strukturelement, wie zum Beispiel einer Windkraftanlage, einer Brückenstruktur und einem Flugzeug, und wie zum Beispiel einem Wasserfahrzeug, umfassend:

- ein bemanntes oder unbemanntes Luftfahrzeug nach einem der Ansprüche 15 oder 19 und

- eine Auswerteeinheit, die auf oder an dem Luftfahrzeug oder davon separat, z. B. am Boden, angeordnet ist.

**[0017]** Bei dem Verfahren kann vorgesehen sein, dass während des Abfliegens die absolute Position des Luftfahrzeugs in Bezug auf das zu untersuchende Strukturelement oder einen Bereich desselben kontinuierlich oder diskontinuierlich, zum Beispiel in gleichen oder ungleichen Zeitintervallen, ermittelt wird.

**[0018]** Beispielsweise kann die absolute Position jedes Mal bei Einnehmen einer vordefinierten Position bestimmt werden.

**[0019]** Vorteilhafterweise wird die Position mittels Sensorfusion, zum Beispiel aus globaler Positionsbestimmung, Höhenmessung und/oder Foto- oder Videoaufnahmen vom zu untersuchenden Strukturelement, ermittelt.

**[0020]** Zweckmäßigerweise erfolgt vor der Detektion von Schadstellen mittels mechanischer und/oder akustischer Impulsanregung eine optische Prüfung auf Schadstellen.

**[0021]** Insbesondere kann dabei vorgesehen sein, dass das Aufbringen eines mechanischen und/oder akustischen Impulses im Anschluss an die optische Prüfung, während derselben oder während eines späteren Fluges erfolgt. Beispielsweise kann direkt im Anschluss an eine optische Prüfung einer Stelle oder eines Bereiches oder aber direkt nach einer vollständigen optischen Prüfung des Strukturelements im Rahmen desselben Fluges das Aufbringen eines mechanischen und/oder akustischen Impulses erfolgen.

**[0022]** Günstigerweise umfasst die optische Prüfung eine Inspektion einer Oberfläche des zu untersuchenden Strukturelementes mittels einer Kamera, vorzugsweise einer Zoomkamera.

**[0023]** Gemäß einer besonderen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung kann vorgesehen sein, dass, wenn ein mechanischer Impuls aufgebracht wird, das Ermitteln einer Reaktion eine, vorzugsweise optische, Körperschallmessung und/oder eine, vorzugsweise akustische, Luftschallmessung zur Messung von durch den mechanischen Impuls hervorgerufenen Eigenfrequenzen des zu untersuchenden Strukturelements umfasst.

**[0024]** Insbesondere kann dabei vorgesehen sein, dass die Luftschallmessung eine lokale akustische Resonanzspektroskopie, vorzugsweise nach Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, DGZfP, - US o6, umfasst.

**[0025]** Gemäß einer weiteren besonderen Ausführungsform kann vorgesehen sein, dass, wenn ein akustischer Impuls aufgebracht wird, das Ermitteln einer Reaktion eine Messung von durch den akustischen Impuls hervorgerufenen Eigenfrequenzen des zu untersuchenden Strukturelements mittels einer, vorzugsweise optischen, Körperschallmessung und/oder eine, vorzugsweise akustische, Luftschallmessung umfasst.

**[0026]** Insbesondere kann dabei vorgesehen sein, dass die Körperschallmessung eine experimentelle Modalanalyse, vorzugsweise mittels eines Laservibrometers, umfasst.

**[0027]** Insbesondere kann dabei vorgesehen sein, dass die Luftschallmessung eine lokale akustische Resonanzspektroskopie, vorzugsweise nach Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, DGZfP, - US o6, umfasst.

**[0028]** Bei dem Impulsball kann vorgesehen sein, dass der ballartige Körper aus Stahl und/oder Aluminium und/oder Kunststoff und/oder Gummi besteht.

**[0029]** Günstigerweise umfasst die kabelgebundene Datenübertragungseinrichtung ein Datenkabel, das sich innerhalb des Verbindungselements erstreckt.

**[0030]** Vorteilhafterweise ist das mindestens eine oder mindestens ein Mikrofon in der Hülle des ballartigen Körpers angeordnet.

**[0031]** Bei dem Luftfahrzeug nach Anspruch 15 kann vorgesehen sein, dass die Impulsballabschussrichtung eine Seilwinde umfasst.

**[0032]** Gemäß einer besonderen Ausführungsform umfasst das Luftfahrzeug ferner eine Auswerteeinheit, die über die Kommunikationseinrichtung und die Datenübertragungseinrichtung des Impulsballes mit dem mindestens einen Kraftsensor des Impulsballes datentechnisch verbunden ist.

**[0033]** Darüber hinaus kann vorgesehen sein, dass die mindestens eine Reaktionsermittlungseinrichtung umfasst: eine, vorzugsweise optische, Reaktionsermittlungseinrichtung, insbesondere eine Körperschallmesseinrichtung, insbesondere wobei die Körperschallmesseinrichtung ein Laservibrometer umfasst, zur Ermittlung einer Eigenfrequenz des Strukturelements als Reaktion auf den aufgebrachten akustischen Impuls, und/oder eine, vorzugsweise akustische, Reaktionsermittlungseinrichtung, insbesondere eine Luftschallmesseinrichtung, zur Ermittlung eines durch vom Strukturelement ausgehenden Luftschalls als Reaktion auf den aufgebrachten akustischen Impuls, insbesondere wobei die Luftschallmesseinrichtung ein Mikrofon umfasst.

**[0034]** Bei dem Luftfahrzeug gemäß Anspruch 19 kann vorgesehen sein, dass es ferner eine Auswerteeinheit, die mit der Körperschallmesseinrichtung und/oder der Luftschallmesseinrichtung datentechnisch verbunden ist, umfasst.

**[0035]** Gemäß einer weiteren besonderen Ausführungsform umfasst das Luftfahrzeug ferner eine Kamera, insbesondere Weitwinkelkamera, zur Bestimmung der Messposition auf dem Strukturelement, und/oder eine Kamera, insbesondere eine Zoomkamera, zur optischen Prüfung der Oberfläche des Strukturelements.

**[0036]** Weiterhin kann vorgesehen sein, dass das Luftfahrzeug ferner eine Positionsbestimmungseinrichtung zur Bestimmung der Position des Luftfahrzeugs umfasst.

**[0037]** Insbesondere kann dabei vorgesehen sein, dass die Positionsbestimmungseinrichtung ein globales Positionsbestimmungssystem und/oder einen Höhenmesser umfasst.

**[0038]** Der vorliegenden Erfindung liegt die überraschende Erkenntnis zugrunde, dass durch die Verwendung eines Luftfahrzeugs in Kombination mit einer mechanischen und/oder akustischen Impulsanregung kein direkter Kontakt mit einem zu untersuchenden Strukturelement, beispielsweise einem Rotorblatt, hergestellt werden muss. Beispielsweise müsste sich ein Luftfahrzeug, insbesondere ein Drehflügler, insbesondere eine Drohne, nur auf ca. 10 cm einem Strukturelement nähern. Das Verfahren kann auch automatisiert ablaufen. Außerdem führt das Verfahren zu einheitlichen reproduzierbaren und nicht personenindividuellen Ergebnissen.

**[0039]** Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus den beigefügten Ansprüchen und aus der nachfolgenden Beschreibung von mehreren Ausführungsbeispielen anhand der schematischen Zeichnungen, in denen:

**Fig. 1:** eine schematische Darstellung eines Systems zur Detektion von Schadstellen mittels mechanischer und akustischer Impulsanregung bei einem zu untersuchenden Rotorblatt gemäß einer besonderen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zeigt; und

**Fig. 2** eine schematische Darstellung eines Systems zur Detektion von Schadstellen mittels mechanischer und akustischer Impulsanregung bei einem zu untersuchenden Rotorblatt gemäß einer weiteren besonderen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zeigt.

**[0040]** Nachfolgend werden Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung am Beispiel eines Rotorblatts von einer Windenergieanlage beschrieben. Die Erfindung ist aber auch auf andere Objekte und Strukturelemente, wie beispielsweise Brückenbauwerke, Türme, Schornsteine, Gebäude, aus Beton-/Stahlbeton übertragbar, die beispielsweise mittels Impakt-Echo-Methode geprüft werden können. Ganz allgemein ist das Ziel die Detektion von Schadstellen an einem zu untersuchenden Objekt bzw. Strukturelement, welches ein Rotorblatt, aber in anderen Beispielen auch zum Beispiel ein Turm oder ähnliches sein kann. In den beiden nachfolgend geschilderten Ausführungsbeispielen erfolgt eine automatisierte Erkennung von Schadstellen mittels einer Drohne. Im Zusammenhang mit einem Rotorblatt ist eine Schadstelle insbesondere ein Material-

fehler, zum Beispiel Delamination, Faserbruch oder ähnliches. Materialfehler, wie beispielsweise Kratzer, Materialausbrüche, Anlagerungen etc., können das Strukturelement schwächen und können potentiell Gefahrenstellen für Materialermüdungen oder Bauteilversagen sein. Insbesondere bei Faserverbundmaterialien (FVM) sind die krafttragenden Fasern für eine auslegungsgerechte Funktion des Bauteils wichtig.

**[0041]** In der **Fig. 1** umfasst das System 100 eine Drohne 2 und eine Auswerteeinheit 9 in einem Steuergerät auf der Drohne 2. Die Drohne 2 weist einen Impulsball 7 zum Erzeugen eines Kraftimpulses zur mechanischen Anregung des Rotorblatts 1 auf, wobei der Impulsball 7 einen ballartigen Körper sowie einen in dem ballartigen Körper befindlichen Kraftsensor (Kraftmesssensor) 6 zum Messen eines mit dem Impulsball 7 erzeugten Kraftimpulses auf das Rotorblatt 1 und einen in dem ballartigen Körper befindlichen Beschleunigungssensor 5 zum Messen einer auf den Impulsball 7 wirkenden Beschleunigung sowie ein Mikrofon 3 aufweist.

**[0042]** Ferner weist der Impulsball 7 eine Antenne 12 zur Datenübertragung und ein Seil 17 zur Verbindung des Impulsballs 7 mit der Drohne 2 auf.

**[0043]** Des Weiteren weist die Drohne 2 eine Impulsballabschusseinrichtung 15 zum Abschießen des Impulsballs 7 in Richtung auf das Rotorblatt 1 auf. Die Impulsballabschusseinrichtung 15 umfasst eine Seilwinde 14 und Werferbeschleunigungsrollen 19.

**[0044]** Bei dem in der **Fig. 1** gezeigten Beispiel bewegt sich die Drohne 2 durch Ansteuerung von flugmechanischen Elementen 8 systematisch auf einem vordefinierten Pfad entlang des zu untersuchenden Rotorblatts 1. Die Drohne 2 kann auch autonom fliegen. Hierzu würde man auf die im Stand der Technik bekannten flugmechanischen Systeme zurückgreifen.

**[0045]** Während des Fluges der Drohne 2 wird die absolute Position der Drohne 2 in Bezug auf das Rotorblatt 1 zu verschiedenen Zeitpunkten, beispielsweise im Abstand von zwei Sekunden, beispielsweise mittels Sensorfusion aus GPS, Höhenmesser (nicht dargestellt) und/oder Auswertung mittels einer Weitwinkelkamera (siehe Weitwinkelkamera 21 in **Fig. 2**) ermittelt.

**[0046]** Zur Erkennung einer Schadstelle nimmt die Drohne 2 eine erste Position (im Raum) ein, die in einem Bezug zu einer zweiten Position 16 am Rotorblatt 1 steht. Die Erkennung der Schadstelle soll somit an der zweiten Position 16 erfolgen. Die zweite Position 16 (bzw. die Fläche bzw. Schadstelle) wird in diesem Beispiel nur durch einen mechanischen

Impuls, der von der Drohne 2 mittels des Impulsballs 7 ausgegeben wird, angeregt. Der ausgegebene Impuls könnte aber grundsätzlich mechanisch und/oder akustisch erfolgen. Bei der Nutzung eines mechanischen Impulses zur Schadstellenerkennung kann/können beispielsweise die experimentelle Modalanalyse nach VDI 4550 und/oder lokale akustische Resonanzspektroskopie nach DGZfP-USo6 angewendet werden.

**[0047]** Bei einem akustischen Impuls würde dieser über einen auf oder an der Drohne 2 befindlichen Lautsprecher (nicht gezeigt) erzeugt werden.

**[0048]** Die durch den mechanischen und/oder durch einen akustischen Impuls entstehende Vibration bzw. Eigenfrequenz des Rotorblatts 1 kann beispielsweise mittels eines Laservibrometers 4 (Körperschall) aufgenommen werden und der durch den mechanischen und/oder akustischen Impuls entstehende Luftschall kann beispielsweise mittels des Mikrofons 3 aufgenommen werden. Durch eine Analyse der Aufnahme(n), also der Eigenfrequenz bzw. des Körperschalls bzw. des Luftschalls, können Schadstellen am Rotorblatt 1 identifiziert werden.

**[0049]** Die zur Schadstellenerkennung genutzte Drohne 2 kann eine handelsübliche Drohne sein, die die notwendige Nutzlast aufweist. Die Drohne 2 ist dazu eingerichtet, das oben beschriebene Verfahren durchzuführen. Hierzu ist die Drohne 2 mit dem Impulsball 7 nebst Impulsballabschusseinrichtung 15 und einem Mikrofon 3 sowie einem Laservibrometer 4 als Reaktionsermittlungseinrichtungen sowie der Antenne 12 am Impulsball 7 und einer Antenne 12 an der Auswerteeinheit 9 und Signalkabeln 13 zur Kommunikation zwischen dem Impulsball 7 und dem Steuergerät mit der Auswerteeinheit 9 und zwischen dem Steuergerät und den übrigen Komponenten der Drohne 2 ausgestattet.

**[0050]** In diesem Ausführungsbeispiel findet die Datenauswertung direkt auf der Drohne 2 statt. Die Auswerteeinheit 9 ist dazu beispielsweise mit einem Dateneingang 10 und einem Datenausgang 11 ausgestattet und dazu eingerichtet, die Daten der Reaktionsermittlungseinrichtungen aufzunehmen und zu verarbeiten. Die Datenauswertung könnte auch an einem zentralen Punkt separat von der Drohne 2 erfolgen. Dafür würden die Daten beispielsweise über die Kommunikationseinrichtung (12,13) an eine von der Drohne 2 separate Auswerteeinheit übertragen.

**[0051]** Wenn eine Schadstelle erkannt wird, so wird der Datenwert der zweiten Position 16, an der die Schadstelle ermittelt wurde, datentechnisch beispielsweise in einem Speicher 18 auf oder an der Drohne 2 hinterlegt.

**[0052]** Ganz allgemein könnte das Verfahren zur Detektion von Schadstellen wie folgt ablaufen:

- Einnehmen einer ersten vordefinierten Position im Raum durch die Drohne 2, wobei die erste vordefinierte Position durch einen Abstand zu einer zweiten vordefinierten Position 16 an dem Rotorblatt 1 gekennzeichnet ist,
- Aufbringen eines Impulses durch die Drohne 2 auf die zweite vordefinierte Position 16 am Rotorblatt 1,
- Ermitteln einer Reaktion, die im Ansprechen auf das Aufbringen des Impulses auf die zweite vordefinierte Position 16 erfolgt, und
- Erkennen einer Abweichung einer Reaktion von einer vordefinierten Referenz und im Ansprechen darauf Ausgeben eines Signals.

**[0053]** Nachfolgend wird die Funktionsweise der Impulsballabschusseinrichtung 15 und seiner Elemente beispielhaft eingehender beschrieben: Die Drohne 2 ist über das Signalkabel 13 mit der Impulsballabschusseinrichtung 15 informationstechnisch verknüpft. Der Impulsball 7 kann in Analogie zu einem Impulshammer aus verschiedenen Materialien (zum Beispiel Stahl, Aluminium, Kunststoff, Gummi etc.) und Größen bestehen, mit denen sich der nutzbare Frequenzbereich einstellen lässt. Vorzugsweise wird in dieser Anwendung von einem Gummiball mit einem Durchmesser von beispielsweise ca. 2 bis 5 cm ausgegangen, welcher das Rotorblatt 1 beim Aufprall nicht beschädigt.

**[0054]** Der Kraftsensor 6, der Beschleunigungssensor 5 und das Mikrofon 3 innerhalb des Impulsballs 7 sind über die Antenne 12 datentechnisch mit der Auswerteeinheit 9 verbunden. Die Auswerteeinheit 9 kann sich an der Drohne 2 oder an einem anderen Ort, beispielsweise in einem Rechner am Boden, in der Nähe des Rotorblatts 1, befinden. Die datentechnische Verbindung zwischen dem Impulsball 7 und der Auswerteeinheit 9 ist in diesem Beispiel kabelgebunden (Signalkabel 13), aber könnte auch kabellos (beispielsweise WLAN, Bluetooth) über eine Antenne 12 erfolgen. Der Impulsball 7 ist mit dem Seil 17 mit der Seilwinde 14 in der Impulsballabschusseinrichtung 15 fest verbunden. Das Seil 17 könnte innenliegend mit einem Datenkabel ausgerüstet sein.

**[0055]** Wenn eine erste vordefinierte Position im Raum erreicht wurde, an der ein mechanischer Impuls ausgegeben werden soll, wird ein Signal von dem Steuergerät an die Impulsballabschusseinrichtung 15 ausgegeben. Wenn ein Signal zum Auswurf des Impulsballs 7 vorliegt, wird die Seilwinde 14 freigestellt und wird der Impulsball 7 über die Werferbeschleunigungsrollen 19 mit einer vordefinierten Geschwindigkeit beschleunigt und derart auf die

zweite vordefinierte Position 16 am Rotorblatt 1 „geschossen“. Mittels des Beschleunigungssensors 5 und des Kraftsensors 6 wird der auf das Rotorblatt 1 gegebene Impuls messtechnisch erfasst. Zusätzlich werden mit dem Laservibrometer 4 und/oder dem Mikrofon 3 Messdaten der Auswirkung des mechanischen Impulses aufgenommen. Die Messdaten werden informationstechnisch an die Auswerteeinheit 9 übermittelt. Die Auswerteeinheit 9 ist dazu eingerichtet, anhand der ermittelten Reaktion eine Schallprüfung durchzuführen. Je nach Ausführung kann hier eine Körperschallprüfung mit dem Laservibrometer 4 oder Luftschallprüfung mit dem Mikrofon 3 durchgeführt werden. Die Körperschallprüfung setzt voraus, dass sich sowohl die aktive Eigenfrequenz des Rotorblatts 1 als auch der Drohne 2 durch den Wind in anderen Frequenzen als die zu detektierenden Frequenzen bewegt. Bei der Luftschallprüfung müssen Windgeräusche kompensiert werden, was vorzugsweise mit klassischen Windschutz-Überziehen für Mikrofone und/oder dem Verbau der Mikrofone direkt im Impulsball 7 realisiert werden kann. Der Impulsball 7 wird danach durch die Seilwinde 14 unter Einziehen des Verbindungselementes (in diesem Beispiel Seil 17) wieder in die Impulsballabschusseinrichtung 15 eingezogen und kann dann erneut abgeschossen werden.

**[0056]** Das in der **Fig. 2** gezeigte Ausführungsbeispiel unterscheidet sich von dem in der **Fig. 1** gezeigten Ausführungsbeispiel darin, dass es zusätzlich eine Zoomkamera 20 und eine Weitwinkelkamera 21 aufweist. Die Weitwinkelkamera 21 dient zur Positionsdefinition der Drohne 2 in Bezug auf das Rotorblatt 1, während die Zoomkamera 20 zur optischen Erfassung der Rotorblattoberfläche dient.

**[0057]** Die Erkennung von Schadstellen kann in Kombination mit einer vorangehenden, optischen Schadstellenerkennung erfolgen (siehe **Fig. 2**). Wenn zuvor eine optische Prüfung mittels einer Drohne erfolgte, kann nachfolgende Erkennung der Schadstelle durch dieselbe Drohne, zum Beispiel Drohne 2, ergänzt werden, die zur optischen Erfassung der Schadstelle eingesetzt wurde. Die Messung kann direkt im Anschluss an die optische Ermittlung der Schadstelle oder zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt werden. Während des (Vorab-)Fluges kann die Oberfläche des Rotorblattes 1 optisch inspiziert werden. Die Oberflächeninspektion kann mittels einer optischen Erfassung der Rotorblattoberfläche durch die Zoomkamera 20 erfolgen. Die ermittelten Daten können an dieselbe Auswerteeinheit 9 gesendet und dort beispielsweise unter Verwendung eines Deep Machine Learning-Algorithmus hinsichtlich möglicher Schadstellen ausgewertet werden. Wird eine Schadstelle identifiziert, wird der Datenwert der absoluten zweiten Position 16, für die die Bilddaten ermittelt wurden, mit den

Informationen zur Schadstelle datentechnisch in dem Speicher 18 hinterlegt.

**[0058]** Die in der vorstehenden Beschreibung, in den Zeichnungen sowie in den Ansprüchen offenbarten Merkmale der Erfindung können sowohl einzeln als auch in den beliebigen Kombinationen für die Verwirklichung der Erfindung in ihren verschiedenen Ausführungsformen wesentlich sein.

#### Bezugszeichenliste

1	Rotorblatt
2	Drohne
3	Mikrofon
4	Laservibrometer
5	Beschleunigungssensor
6	Kraftsensor
7	Impulsball
8	flugmechanische Elemente
9	Auswerteeinheit
10	Dateneingang
11	Datenausgang
12	Antennen
13	Signalkabel
14	Seilwinde
15	Impulsabschusseinrichtung
16	zweite Position
17	Seil
18	Speicher
19	Werferbeschleunigungsrolle
20	Zoomkamera
21	Weitwinkelkamera

#### Patentansprüche

1. Luftfahrzeug-basiertes Verfahren zur Detektion einer Schadstelle mittels mechanischer und/oder akustischer Impulsanregung bei einem zu untersuchenden Strukturelement, insbesondere einem Strukturelement aus Laminaten, wie zum Beispiel einem Rotorblatt (1) und einem Turm einer Windkraftanlage, oder insbesondere einem großen und/oder schwer zugänglichen Strukturelement, wie zum Beispiel einer Windkraftanlage, einer Brückenstruktur und einem Flugzeug, und wie zum Beispiel einem Wasserfahrzeug, umfassend:  
- Bereitstellen eines bemannten und unbemannten Luftfahrzeugs, insbesondere eines Drehflüglers, insbesondere einer Drohne (2), wobei das Luftfahrzeug

eine mechanische und/oder akustische Impulserzeugungseinrichtung zur mechanischen und/oder akustischen Anregung eines zu untersuchenden Strukturelements, insbesondere eines Strukturelements aus Laminaten, wie zum Beispiel eines Rotorblatts (1) und eines Turms einer Windkraftanlage, oder insbesondere eines großen und/oder schwer zugänglichen Strukturelements, wie zum Beispiel einer Windkraftanlage, einer Brückenstruktur und eines Flugzeugs, und wie zum Beispiel eines Wasserfahrzeugs, und eine Reaktionsermittlungseinrichtung zur Ermittlung einer Reaktion des Strukturelements auf ein Anregen des Strukturelements mittels eines mechanischen und/oder akustischen Impulses umfasst,

- mit oder ohne Eingriffe eines Piloten gesteuertes Abfliegen zumindest eines Bereiches des Strukturelements mittels des Luftfahrzeugs, vorzugsweise gemäß einer vorab festgelegten Systematik, wobei das Abfliegen zumindest ein Einnehmen einer ersten vordefinierten Position in einem Abstand zu einer zweiten vordefinierten Position an dem Strukturelement umfasst,  
- Aufbringen eines mechanischen und/oder akustischen Impulses mittels der Impulserzeugungseinrichtung auf die zweite Position an dem Strukturelement,  
- Ermitteln einer Reaktion des Strukturelements auf das Aufbringen des erzeugten Impulses auf die zweite vordefinierte Position mittels der Reaktionsermittlungseinrichtung,  
- Vergleichen der ermittelten Reaktion mit einer vordefinierten Referenzreaktion und Ermitteln einer Abweichung der ermittelten Reaktion von der vordefinierten Referenzreaktion, und  
- Ausgeben eines Signals, dass eine Schadstelle ermittelt wurde, in Abhängigkeit von der ermittelten Abweichung.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei während des Abfliegens die absolute Position des Luftfahrzeugs in Bezug auf das zu untersuchende Strukturelement oder einen Bereich desselben kontinuierlich oder diskontinuierlich, zum Beispiel in gleichen oder ungleichen Zeitintervallen, ermittelt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei die Position mittels Sensorfusion, zum Beispiel aus globaler Positionsbestimmung, Höhenmessung und/oder Foto- oder Videoaufnahmen vom zu untersuchenden Strukturelement, ermittelt wird.

4. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei vor der Detektion von Schadstellen mittels mechanischer und/oder akustischer Impulsanregung eine optische Prüfung auf Schadstellen erfolgt.

5. Verfahren nach Anspruch 4, wobei das Aufbringen eines mechanischen und/oder akustischen

Impulses im Anschluss an die optische Prüfung während desselben oder während eines späteren Fluges erfolgt.

6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, wobei die optische Prüfung eine Inspektion einer Oberfläche des zu untersuchenden Strukturelements mittels einer Kamera, vorzugsweise einer Zoomkamera, umfasst.

7. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei, wenn ein mechanischer Impuls aufgebracht wird, das Ermitteln einer Reaktion eine, vorzugsweise optische, Körperschallmessung und/oder eine, vorzugsweise akustische, Luftschallmessung zur Messung von durch den mechanischen Impuls hervorgerufenen Eigenfrequenzen des zu untersuchenden Strukturelements umfasst.

8. Verfahren nach Anspruch 7, wobei die Luftschallmessung eine lokale akustische Resonanzspektroskopie, vorzugsweise nach Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, DGZfP, - US o6, umfasst.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei, wenn ein akustischer Impuls aufgebracht wird, das Ermitteln einer Reaktion eine Messung von durch den akustischen Impuls hervorgerufenen Eigenfrequenzen des zu untersuchenden Strukturelements mittels einer, vorzugsweise optischen, Körperschallmessung und/oder einer, vorzugsweise akustischen, Luftschallmessung umfasst.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 9, wobei die Körperschallmessung eine experimentelle Modalanalyse, vorzugsweise mittels eines Laservibrometers (4), umfasst.

11. Impulsball (7) zum Erzeugen eines Kraftimpulses zur mechanischen Anregung eines zu untersuchenden Strukturelements, insbesondere eines Strukturelements aus Laminaten, wie zum Beispiel eines Rotorblatts und eines Turms einer Windkraftanlage, oder insbesondere eines großen und/oder schwer zugänglichen Strukturelements, wie zum Beispiel einer Windkraftanlage, einer Brückenstruktur und eines Flugzeugs, und wie zum Beispiel eines Wasserfahrzeugs, insbesondere zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 10, umfassend

- einen ballartigen Körper,
- mindestens eine in dem ballartigen Körper befindliche Messeinrichtung, insbesondere einen Kraftsensor und/oder einen Beschleunigungssensor, zum Messen eines mit dem Impulsball erzeugten Kraftimpulses,
- mindestens eine Reaktionsermittlungseinrichtung, insbesondere ein Mikrofon und/oder ein Laservibrometer, zum Messen einer Reaktion des Strukturele-

ments, und

- eine in dem ballartigen Körper befindliche kabellose und/oder kabelgebundene Datenübertragungseinrichtung, die mit der mindestens einen Messeinrichtung zum Messen eines mit dem Impulsball erzeugten Kraftimpulses sowie mit der mindestens einen Reaktionsermittlungseinrichtung zum Messen einer Reaktion des Strukturelements datentechnisch in Verbindung steht und konfiguriert ist, um Messdaten von der mindestens einen von der mindestens einen Messeinrichtung sowie der mindestens einen Reaktionsermittlungseinrichtung an eine außerhalb des Impulsballes befindliche Auswerteeinheit weiterzuleiten, wobei der Impulsball ferner ein längliches, vorzugsweise aufwickelbares, Verbindungselement, welches an dem der ballartige Körper befestigt oder befestigbar ist, aufweist und/oder wobei der ballartige Körper konfiguriert ist, um an einem länglichen, vorzugsweise aufwickelbaren, Verbindungselement befestigt zu werden.

12. Impulsball (7) nach Anspruch 11, wobei der ballartige Körper aus Stahl und/oder Aluminium und/oder Kunststoff und/oder Gummi besteht.

13. Impulsball (7) nach Anspruch 11 oder 12, wobei die kabelgebundene Datenübertragungseinrichtung ein Datenkabel umfasst, das sich innerhalb des Verbindungselements erstreckt.

14. Impulsball (7) nach einem der Ansprüche 11 bis 13, wobei das mindestens eine oder mindestens ein Mikrofon in der Hülle des ballartigen Körpers angeordnet ist.

15. Bemanntes oder unbemanntes Luftfahrzeug, insbesondere Drehflügler, insbesondere Drohne (2), insbesondere zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 10, umfassend:

- einen Impulsball (7) nach einem der Ansprüche 11 bis 14,
- eine Impulsballabschusseinrichtung (15) zum Abschießen des Impulsballs (7), wobei der Impulsball (7) über sein Verbindungselement oder ein Verbindungselement mit der Impulsballabschusseinrichtung (15) zum Zurückholen des Impulsballes (7) nach einem Abschuss verbunden ist,
- eine Kommunikationseinrichtung zur Kommunikation mit der Datenübertragungseinrichtung des Impulsballes (7).

16. Luftfahrzeug nach Anspruch 15, wobei die Impulsballabschusseinrichtung (15) eine Seilwinde (14) umfasst.

17. Luftfahrzeug nach Anspruch 15 oder 16, ferner umfassend

- eine Auswerteeinheit (9), die über die Kommunikationseinrichtung und die Datenübertragungseinrichtung des Impulsballes (7) mit dem mindestens

einen Kraftsensor (6) und/oder dem mindestens einen Beschleunigungssensor (5) und/oder dem mindestens ein Mikrofon (3) des Impulsballes (7) datentechnisch verbunden ist.

18. Luftfahrzeug nach einem der Ansprüche 15 bis 17, wobei die mindestens eine Reaktionsermittlungseinrichtung umfasst:

- eine, vorzugsweise optische, Reaktionsermittlungseinrichtung, insbesondere eine Körperschallmesseinrichtung, insbesondere wobei die Körperschallmesseinrichtung ein Laservibrometer umfasst, zur Ermittlung einer Eigenfrequenz des Strukturelements als Reaktion auf den aufgebracht akustischen Impuls, und/oder eine, vorzugsweise akustische, Reaktionsermittlungseinrichtung, insbesondere eine Luftschallmesseinrichtung, zur Ermittlung eines durch vom Strukturelement ausgehenden Luftschalls als Reaktion auf den aufgebracht akustischen Impuls, insbesondere wobei die Luftschallmesseinrichtung ein Mikrofon umfasst

19. Bemanntes oder unbemanntes Luftfahrzeug, insbesondere Drehflügler, insbesondere Drohne (2), insbesondere zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 10, umfassend:

- einen Lautsprecher zur Erzeugung eines akustischen Impulses, und
- eine, vorzugsweise optische, Reaktionsermittlungseinrichtung, insbesondere eine Körperschallmesseinrichtung, insbesondere wobei die Körperschallmesseinrichtung ein Laservibrometer (4) umfasst, und/oder eine, vorzugsweise akustische, Reaktionsermittlungseinrichtung, insbesondere eine Luftschallmesseinrichtung, insbesondere wobei die Luftschallmesseinrichtung ein Mikrofon (3) umfasst.

20. Luftfahrzeug nach Anspruch 19, ferner umfassend eine Auswerteeinheit (9), die mit der Körperschallmesseinrichtung und/oder der Luftschallmesseinrichtung datentechnisch verbunden ist.

21. Luftfahrzeug nach einem der Ansprüche 15 bis 20, ferner umfassend eine Kamera, insbesondere Weitwinkelkamera (21), zur Bestimmung der Messposition auf dem Strukturelement, und/oder eine Kamera, insbesondere eine Zoomkamera (20), zur optischen Prüfung der Oberfläche des Strukturelements.

22. Luftfahrzeug nach einem der Ansprüche 15 bis 21, ferner umfassend eine Positionsbestimmungseinrichtung zur Bestimmung der Position des Luftfahrzeugs.

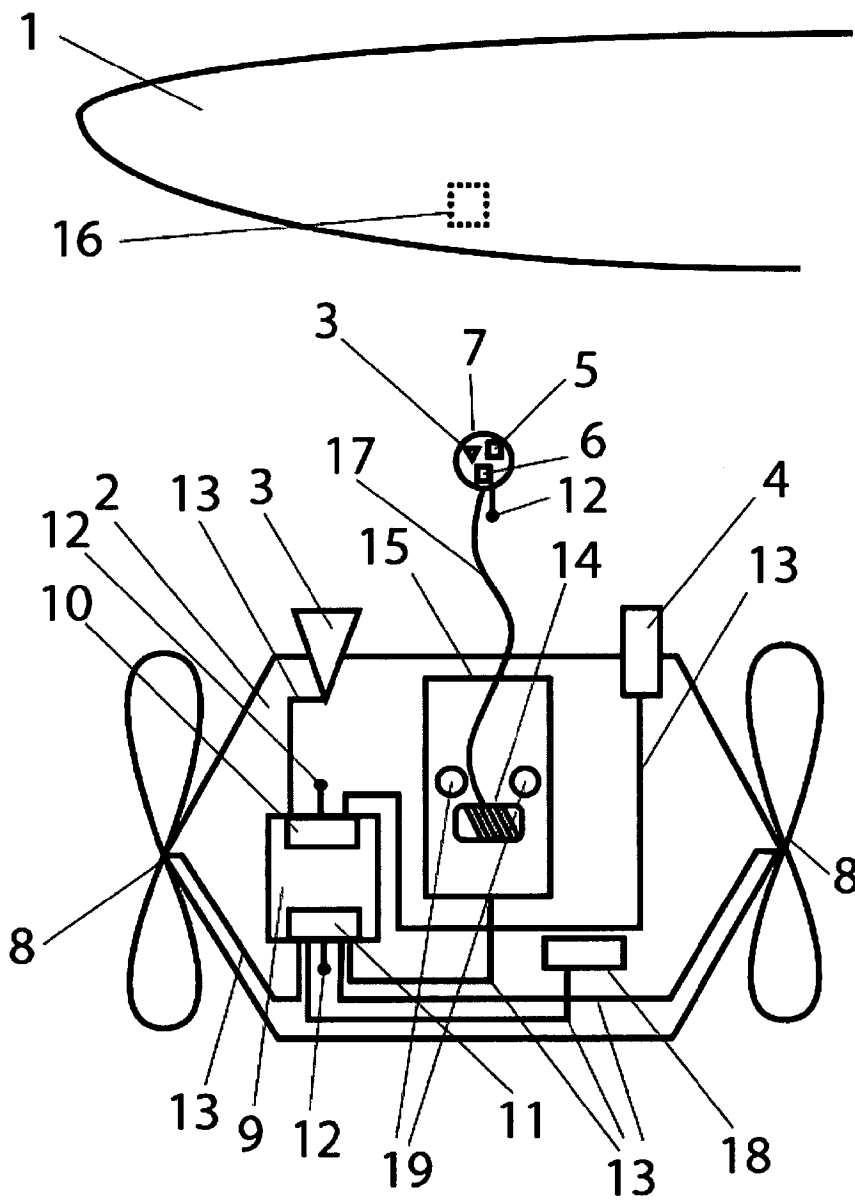
23. Luftfahrzeug nach Anspruch 22, wobei die Positionsbestimmungseinrichtung ein globales Positionsbestimmungssystem und/oder einen Höhenmesser umfasst.

24. System zur Detektion einer Schadstelle mittels mechanischer und/oder akustischer Impulsanregung bei einem zu untersuchenden Strukturelement, insbesondere einem Strukturelement aus Lamina-ten, wie zum Beispiel einem Rotorblatt (1) und einem Turm einer Windkraftanlage, oder insbesondere einem großen und/oder schwer zugänglichen Strukturelement, wie zum Beispiel einer Windkraftanlage, einer Brückenstruktur und einem Flugzeug, und wie zum Beispiel einem Wasserfahrzeug, umfassend:

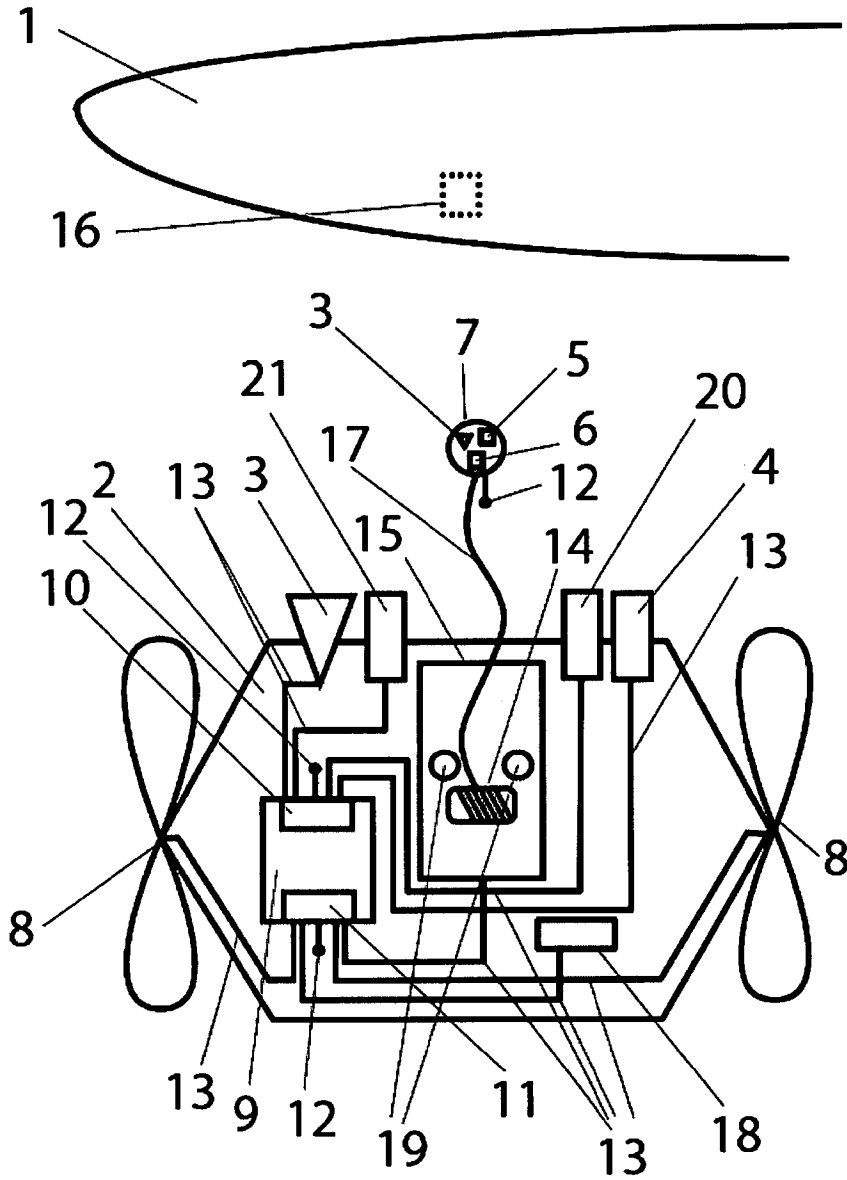
- ein bemanntes oder unbemanntes Luftfahrzeug nach einem der Ansprüche 15 oder 19 und
- eine Auswerteeinheit (9), die auf oder an dem Drehflügler oder davon separat, z. B. am Boden, angeordnet ist.

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen



Figur 1



Figur 2