



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 100 65 314 B4 2007.08.16**

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **100 65 314.6**
 (22) Anmeldetag: **30.12.2000**
 (43) Offenlegungstag: **18.07.2002**
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **16.08.2007**

(51) Int Cl.⁸: **F03D 7/00 (2006.01)**
G01H 1/00 (2006.01)
G01B 21/32 (2006.01)
G01M 7/02 (2006.01)
G01M 13/00 (2006.01)
G01M 15/00 (2006.01)

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 2 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
IGUS - Innovative Technische Systeme GmbH,
01099 Dresden, DE

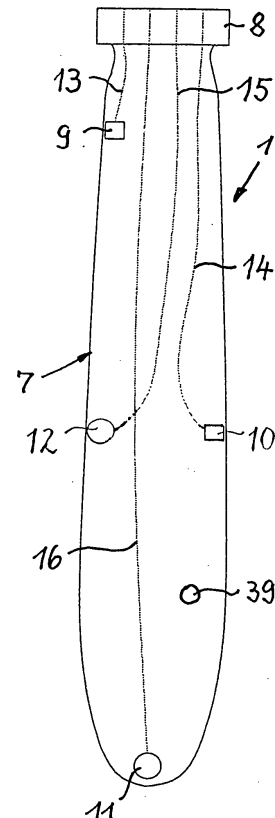
(74) Vertreter:
Patentanwälte Lippert, Stachow & Partner, 01309
Dresden

(72) Erfinder:
Volkmer, Peter, 01109 Dresden, DE

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
 gezogene Druckschriften:
DE 42 40 600 C1
DE 199 49 637 A1
DE 199 48 194 A1
DE 198 47 982 A1
DE 198 03 956 A1
DE 195 34 404 A1
DE 43 18 016 A1
WO 99 36 695 A1
WO 81 03 702 A1

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Einrichtung zur Überwachung des Zustandes von Rotorblättern an Windkraftanlagen**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur Überwachung des Zustandes von Rotorblättern an Windkraftanlagen mittels eines Empfangs, einer Übertragung und einer Messwertfassung und -verarbeitung von Signalen sowie einer Signaltransformation, einer Auswertung und einer Durchführung von Gegenmaßnahmen, dadurch gekennzeichnet, a) dass eine Messung von rotorblattinternen Resonanz-, Eigenfrequenz-, Durchlauf- und Reflexions-Körperschall-Signalen mittels mindestens eines rotorblattzugehörigen Schall-/Schwingungsempfängers (Sensor (11, 12)) erfolgt, an dessen Ausgang elektrische, aus den materialintern übertragenen Schall-Signalen gewandelte Signale ausgegeben werden, b) dass eine Einspeisung von Schallsignalen wahlweise von mindestens einem rotorblattzugehörigen Schall-/Impulssender (Aktor (9, 10)) erfolgt, dessen Auslösung im Rotorblatt (1, 2, 3) durch eine Auswerte-Einheit (23) veranlasst wird, oder eine Eigenregung infolge von Betriebseigengeräuschen bei Anlagenbetrieb, c) dass eine Überführung der elektrischen Signale in eine Form von Spektren erfolgt, d) dass ein Vergleich mittels Spektren-Analyse zwischen diesen Spektren und den Spektren von Spektrenbibliotheken erfolgt, wobei die Spektrenbibliotheken in Massendatenspeichern (30, 32) abgelegt und deren Spektren defekten oder unbeschädigten...



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Überwachung des Zustandes von Rotorblättern an Windkraftanlagen mittels Empfang, Übertragung und Messwerterfassung und -verarbeitung von Signalen sowie einer Signaltransformation, einer Auswertung und einer Durchführung von Gegenmaßnahmen.

[0002] Die Erfindung betrifft ebenfalls eine Einrichtung zur Durchführung des Verfahrens, mit mindestens einem Sensor, der die empfangenen Signale in elektrische Signale wandelt, mit einer Auswert-Einheit, die die elektrischen Signale von den Sensoren übertragen erhält und verarbeitet, mit mindestens einem Massendatenspeicher, in dem sich Spektrenbibliotheken befinden, mit mindestens einem Vergleichsmodul zur Spektralanalyse und Vergleich des gemessenen Spektrums mit den in den Spektrenbibliotheken vorgehaltenen Referenzspektren und mit einer Gegenmaßnahmen-Auslöse-Einrichtung.

[0003] Die Rotorblätter sind hoch belastete Komponenten, deren Ausdehnung in Länge und Breite in den vergangenen Jahren ständig zugenommen hat. Gegenwärtig beträgt ihre Länge bis zu 40m und an den Spitzen treten hohe Geschwindigkeiten auf. Die Rotorblätter müssen Fliehkräften, Windströmungen, Turbulenzen bei unterschiedlichsten Witterungsbedingungen im Dauerbetrieb standhalten.

[0004] Für das wirtschaftliche Betreiben einer Windkraftanlage ist eine lange Lebensdauer der Rotorblätter entscheidend. Derzeit wird eine Lebensdauer von ca. 20 Jahren angegeben. Das Problem besteht darin, dass zur Erreichung dieser Lebensdauer häufige regelmäßige Kontrollen vor Ort durch visuelles Betrachten, z.B. von Krananlagen aus, notwendig sind. Reparaturen fallen immer erst dann an, wenn der Schaden visuell zu erkennen ist. Zum Teil sind die Reparaturen sehr aufwendig. Damit fällt die Windkraftanlage in ihrer Stromerzeugung während des Stillstandes aus.

[0005] Ein Problem besteht darin, dass Mikrorisse und Materialveränderungen vorzugsweise innerhalb des Rotorblattmaterials, die die mechanischen Eigenschaften und Spannungsverhältnisse schon wesentlich verändern können, bei den visuellen Inspektionen nicht erfasst werden.

[0006] Eine Vorrichtung zur Erfassung von Belastungen der Rotorblätter einer Windkraftanlage ist aus der Druckschrift DE 198 47 982 A1 bekannt, in der im Wurzelbereich der Rotorblätter mindestens ein Linearelement angebracht ist, das Belastungsspitzen aufgrund von Schwingungen oder sonstigen Überlastungen des Rotorblattes als ganzes am Rotorblattfuß erfasst, indem die relative Lage zweier Orte, z.B. die Lage eines Rotorblattes in Bezug zur Welle oder die

Lage zweier Rotorblätter zueinander durch ein Linearelement und einen dessen Verlagerung erfassenden Positionssensor bestimmt wird. Das Linearelement erfasst Dehnungen, so dass bestimmte Überlast-Zustände selektiv erfasst werden können.

[0007] Das Problem der bekannten Vorrichtung besteht darin, dass die Belastungen des als ganze Einheit betrachteten Rotorblattes mit einer mechanischen Vorrichtung – dem Linearelement – im Bereich des Rotorblattfußes gemessen werden. Damit kann nur die Feststellung getroffen werden, ob das Rotorblatt im Bereich des Rotorblattfuß geschädigt wurde. Über den inneren Zustand des Rotorblattes kann aber keine Aussage getroffen werden. Es kann auch nicht der Bereich eines fehlerhaften Zustandes im gesamten Rotorblatt, insbesondere eine dort vorhandene Schadstelle eingegrenzt werden, um dort Reparatur-Maßnahmen im und/oder am Material oder im Bereich der Trage- oder Haltekonstruktion für die Erreichung einer längeren Lebensdauer durchführen zu können. Auch können generell punktuelle Schäden am Rotorblatt nicht erkannt werden, die eine Abschaltung der Anlage erforderlich machen würden.

[0008] Ein Verfahren zur Bestimmung des technischen Zustandes von Rotorblättern einer Windkraftanlage ist aus der Druckschrift DE 195 34 404 A1 bekannt, in der ein in einem Rechner arbeitendes Modell der Windkraftanlage die theoretischen Werte für Drehzahl und Drehbeschleunigung der Rotorblätter als Zeitfunktion ihres Umlaufes um die Drehachse liefert und dass diese mit den entsprechenden Messwerten der Windkraftanlage im Betrieb verglichen wird. Auch hier geht es um eine Überwachung der Rotorblätter als Ganzes, inwieweit die Belastungen am Rotorblatt die Auslegungswerte erreicht oder überschreitet. Materialfehler, die während des Betriebs entstehen, werden nicht berücksichtigt. Es wird von den Ausgangswerten ausgegangen.

[0009] In der DE 199 48 194 A1 wird ein Verfahren beschrieben, in welchem die Windkraftanlage als Einheit mittels Aufnahme von luftübertragenen Geräuschkennlinien überwacht wird. Dazu ist ein Schallaufnehmer außen am Turm befestigt, um Veränderungen am aerodynamischen Körper oder um Eisansatz an den Rotorblättern zu erkennen, sobald davon Geräusche durch Wirbel oder ein spezifisches Rauschen ausgehen. Problematisch ist bei diesem Verfahren, dass das Referenz-Geräuschkennlinien bei ungestörtem Betrieb bereits durch Schwingungen, die von angrenzenden Bauteilen auf den Aufnehmer übertragen werden, oder durch direkte oder indirekte Windgeräusche, beispielsweise an den Rotorblättern, verfälscht werden und schwer reproduzierbare Geräuschkennlinien gemessen werden. Ein Problem besteht auch darin, dass die Geräuschkennlinien keine oder verschwindend geringe Anteile der materialbezogenen Eigenfrequenzspektren aufweisen und so-

mit Veränderungen im Material eines einzelnen Rotorblattes nicht detektierbar sind.

[0010] Darüber hinaus ist aus der Druckschrift DE 42 40 600 C1 im Unterschied zum Verfahren an windkraftgetriebenen, bewegten Rotorblättern ein Verfahren zum Erkennen und Bewerten von Strukturschäden an motor- oder düsenstrahlgetriebenen Flugzeugen, für den Rumpf und den mit ihm verbundenen starren Tragflächen bekannt, bei dem ein Generator für Erregersignale, nämlich Sinus- oder Rauschsignale, verwendet wird, bei dem Schwingungen messende Sensoren am Flugzeug angebracht sind, bei dem mit den genannten Erregersignalen Schwingungen in der Flugzeugstruktur angeregt und die resultierenden Schwingungen durch die Sensoren gemessen werden, bei dem die genannten Erregersignale und die von den Sensoren gemessenen Signale in digitalisierter Form an einen Prozessor übergeben werden, bei dem im Prozessor Transferfunktionen als Quotient aus Sensorsignalen und Erregersignalen gebildet werden, wobei die gemessenen Transferfunktionen durch mathematische Funktionen approximiert werden und bei dem eine Modal-Analyse der Sensorsignale der Flugzeugstruktur vorgenommen wird.

[0011] Zur Durchführung des bekannten Verfahrens sollen Gleitsinussignale konstanter Amplitude bzw. Rauschsignale verwendet werden, ein Finite-Elemente-Modell der Flugzeugstruktur aufgestellt werden, mit dem die Schwingungsformen der Struktur berechnet werden und als Referenz-Schwingungsformen dienen, die aus der Modal-Analyse gewonnenen Schwingungsformen mit den zugehörigen Referenz-Schwingungen verglichen und Abweichungen ermittelt werden, beim neuen Flugzeug bei Abweichungen das Finite-Elemente-Modell angepasst, aber beim gebrauchten Flugzeug aus den Abweichungen gegenüber dem Finite-Elemente-Modell des Ausgangszustands Strukturschäden lokalisiert werden, die lokalisierten Schäden ins Finite-Elemente-Modell übernommen werden, die Festigkeit schadensbehafteter Teile mit dem Finite-Elemente-Modell berechnet und als Restfestigkeit des Flugzeugs angesetzt werden.

[0012] Ein Problem besteht darin, dass bei georteten Strukturschäden dem Piloten Belastungskennwerte der Tragflächen bei Kurvenflügen, beim Start und bei der Landung oder bei Flugmanövern vorgegeben werden, bei deren Überschreitung oftmals nicht eine Korrektur oder sofortige Landung ausgeführt werden kann. Auch werden die Veränderungen, die während des Fluges eintreten, nicht sofort signalisiert, sondern frühestens erst nach der Landung. Das kann aber dann schon zu spät sein für eine Korrektur des Flugverhaltens.

[0013] Ein weiteres Problem besteht darin, dass die

Erregung mit den Gleitsinussignalen konstanter Amplitude bzw. Rauschsignalen mit flugzeugeigenen hydraulisch oder elektrisch angetriebenen Ruderstellmotoren von den Steuerflächen aus vorgenommen werden soll.

[0014] Als Sensoren für die Signalgewinnung werden Beschleunigungsmesser oder Dehnungsmessstreifen verwendet. Die Sensoren können sowohl in die Tragflächen als auch in den Flugzeugrumpf eingebaut sein. Die den Strukturschäden zugehörigen Abweichungen werden beim Vergleich der Eigenschwingungsformen mit den Referenzschwingungsformen aus unterschiedlichen Amplitudenhöhen ermittelt.

[0015] Ein Problem besteht auch darin, dass mit der verwendeten Modal-Analyse keine kontinuierliche Überwachung durchgeführt werden kann, da die Testverfahren nur am Boden und dort am stillstehenden Flugzeug vor und nach dem Flug durchgeführt werden.

[0016] In einer anderen Druckschrift DE 43 18 016 A1 ist ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Bestimmen und Reduzieren von auf Rümpfen von Flugzeugen und Helikoptern während des Fluges einwirkenden Erschütterungen bekannt, bei der an bestimmten Stellen Kraft erzeugende Betätigervorrichtungen angebracht sind, um am Flugkörper auftretende Schäden verursachenden Vibrationen derart entgegenzuwirken, dass die schädigenden Vibrationen abgeschwächt werden. Die Betätigervorrichtung besteht aus einer Vielzahl von Betätigern eines aktiven Vibrationssteuersystems.

[0017] Das Verfahren ist für Windkraftanlagen nicht geeignet, da die Windkraftanlage auslegungsseitig schwingungs- und erschütterungsfrei laufen muss, sonst sind das Abfahren der Windkraftanlage und grundsätzliche Änderungen an der Anlage erforderlich, bis die Schwingungen und Erschütterungen abgestellt sind.

[0018] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren und eine Einrichtung zur Überwachung des Zustandes von Rotorblättern an Windkraftanlagen anzugeben, die derart geeignet ausgebildet ist, dass auftretende Schädigungen, Materialveränderungen oder Materialalterungen an der Oberfläche und innerhalb des Körpermaterials von Rotorblättern bei deren Herstellung, Transport oder Montage und bei laufendem Betrieb frühzeitig und lokal bestimmt signaltechnisch erkannt, bewertet und zumindest durch ergänzende Einheiten angezeigt werden und direkt Einfluss auf den Anlagenbetrieb – bis hin zu Abschaltung – genommen wird.

[0019] Die Aufgabe wird verfahrensseitig durch die Merkmale des Patentanspruchs 1 gelöst, weitere

Ausgestaltungen des Verfahrens sind in den Unteransprüchen genannt. Das Verfahren zur Überwachung gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 basiert auf der Anwendung von Eigenfrequenzen und Körperschall sowie Schall-Lauf- und -Reflexionsverhalten, wobei Resonanz- und Eigenfrequenzen, Durchlauf- und Reflexions-Signalspektren nach Sendung von Erregersignalen oder aus einer Eigenerrregung bei Anlagenbetrieb sowie Betriebseigengeräusche gemessen werden. Die mittels mindestens eines rotorblattzugehörigen Sensors empfangenen Schall-Signale und in elektrische gewandelte Ausgangssignale werden in eine solche Form von Spektren überführt, so dass ein Vergleich mit Referenzspektren erfolgen kann, die in einem Massenspeicher vorgehalten werden und denen jeweils ein definierter Schadenszustand oder ein unbeschädigter Zustand eines Rotorblattes zugeordnet ist. Sofern in dem ermittelten Spektrum eine Abweichung von dem Zustand bei ungestörtem Betrieb (Normalzustand) feststellbar ist, kann mittels der Zuordnung des abweichenden Spektrums zu mindestens einem der Referenzspektren der mit diesem Referenzspektrum verbundene Rotorblattzustand ermittelt werden.

[0020] Als rotorblattzugehöriger Sensor ist erfindungsgemäß ein Schall-/Schwingungsempfänger zu verstehen, der an relevanten, schallsignalgeeigneten Stellen des aus Blattflügel und Blattfuß bestehenden Rotorblattes eingebettet oder an der Oberfläche angebracht sind. Um die eingangs beschriebenen Materialeigenschaften zu messen, erfolgt die Einbettung der Sensoren vorzugsweise im Material des Blattflügels. Relevante Stellen sind beispielsweise die Blattspitze oder die Kantenbereiche des Blattes.

[0021] Entsprechend einer Ausgestaltung der Erfindung werden die Referenzspektren auf der Grundlage von Modellrechnungen und durch akustische Messungen von unbeschädigten und von geschädigten Rotorblättern bestimmte Frequenz- und Amplituden-Spektren und/oder Spektrenformen/-Banden erhalten, die diesen Zuständen zugeordnet werden, wobei Spektrenbibliotheken auf Massendatenspeichern aus den Spektren mit der Zuordnung von Schadenszustand und Schadenslokalisierung und weiteren Informationen aufgebaut werden, wobei die empfangenen Ist-Frequenz- und Amplituden-Spektren und/oder Ist-Spektrenformen/-Banden mit den in der Spektrenbibliothek abgelegten Spektren verglichen und die dazu korrespondierenden Zustände ermittelt werden, die bei Abweichungen vom Normalzustand bestimmten Schadzuständen und bestimmten Schadstellen im Material der Rotorblätter zugeordnet werden.

[0022] Nach der Übertragung von der rotierenden Welle können die Messsignale in einer Auswerteeinheit analysiert werden, indem aus dem empfangenen Eigen-Signalspektrum oder aus den in Korrelation

mit den über die Aktoren eingespeisten Signalen mit den Sensoren empfangenen Spektren die relevanten Frequenzen und Amplituden des Zeitspektrums oder eines transformierten, vorzugsweise fouriertransformierten, Spektrums herausgefiltert werden, die signifikant für die Zustandsbewertung sind.

[0023] Die Mess- und Erregersignale von und zu den Rotorblättern werden über eine Signal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit von der Welle zum Stator und umgekehrt geführt, wobei eine Signalübertragungsvorverarbeitungseinheit (Encoder und Sender) sowie eine Signalübertragungsnachverarbeitungseinheit (Empfänger und Decoder) verwendet werden.

[0024] Aus dem jeweiligen Vergleich zwischen den empfangenen Ist-Frequenz- und Amplituden-Spektren und/oder Ist-Spektrenformen/-Banden und den in der Spektrenbibliothek abgelegten Referenzspektren können kurzfristige sowie mittel- und langfristige Maßnahmen zum Betrieb der Windkraftanlage und zur Reparatur und Wartung der Rotorblätter abgeleitet werden.

[0025] An einen Leitreechner können über eine Informationsschnittstelle, vorzugsweise ein serielles Interface, über welche der Leitreechner mit der Auswerteeinheit verknüpft ist, die Zustands-Informationen übermittelt werden. In Abhängigkeit vom Inhalt der Zustandsinformationen können in dem Leitreechner automatisch der Anlagenbetrieb bis hin zur Schnellabschaltung beeinflusst werden und der die Anlagen überwachenden Stelle Maßnahmen zur Reaktionsweise auf Schadzustände und Informationen zur Einleitung von dringlichkeitsabhängigen Maßnahmen mitgeteilt werden.

[0026] Die Zustands-Überwachung der Rotorblätter kann aufgrund der mittels der Aktoren vornehmbaren, von dem Betrieb der Anlage unabhängigen Erregung auch während und nach der Produktion sowie nach dem Transport und während der Montage der Windkraftanlage durchgeführt werden.

[0027] Im Folgenden wird das Verfahren erläutert.

[0028] Der Messzyklus wird in einem Modul zur Messprozesssteuerung ausgelöst und kann mit der Ausgabe eines Erregersignals an den Aktor über eine Erregersignal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit beginnen, wobei gleichzeitig das Tor der programmierbaren Empfangseinheit für den vorgegebenen Messzeitraum geöffnet und ein Messsignal vom Sensor empfangen sowie als zeitbezogenes Frequenz-Amplituden-Signal digital im Hauptspeicher der zentralen Recheneinheit in einer vorgegebenen Auflösung abgelegt wird.

[0029] Das Modul zur Messprozesssteuerung, das

für die Bildung der Erregersignale und Empfangssignale zuständig ist, gehört zu einem umfassenden Softwareprogramm-Modul für die Abarbeitung eines Algorithmus, das sich vorzugsweise in der zentralen Rechereinheit befindet.

[0030] Das Softwareprogramm-Modul zur Abarbeitung eines Algorithmus enthält vorzugsweise folgende Module:

- Ein Modul zur Messprozesssteuerung,
- ein Modul zur Messsignalaufbereitung,
- ein Vergleichsmodul,
- ein Modul zur Feststellung des Normalzustandes,
- ein Weiterbetriebsentscheidungs-Modul,
- ein Modul zur Feststellung eines gestörten Zustandes,
- ein Modul zur Signalgebung für eine Betriebsweisenänderung, wobei das Modul zur Feststellung eines gestörten Zustandes wahlweise mit dem Weiterbetriebsentscheidungs-Modul in Verbindung stehen kann.

[0031] In dem Softwareprogramm-Modul wird aus dem in der Einheit gebildeten Messsignal-Vektor in einem Modul zur Messsignalaufbereitung, z.B. mittels anschließender schneller Fouriertransformation, ein Frequenz-Amplituden-Spektrum erzeugt. Dieses Frequenz-Amplituden-Spektrum besitzt die für das Rotorblatt typischen gemessenen Eigenfrequenzen als ein Spektrum in einem typischen normierten Frequenzbereich. Es ist auch möglich, ein spezielles, typisches Laufzeitspektrum zu ermitteln. Anschließend wird durch einen Mustervergleich mit den auf Massendatenspeichern abgelegten normierten Referenzspektren, dass aus Messungen an Rotorblättern mit definierten Schadenszuständen und/oder aus Modellrechnungen ermittelt wurde, in einem Vergleichsmodul ein korrespondierender Zustand des gemessenen Rotorblattes ermittelt. Dabei werden die Wetterdaten, die Einfluss auf das Eigenfrequenzspektrum haben können, wie z.B. Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Lufttemperatur, Luftfeuchte, aus einem Meteorologie-Modul und die Anlagenbetriebsdaten, z.B. Drehzahl und Leistung, aus einem Anlagenbetriebsdaten-Modul als Parameter berücksichtigt.

[0032] Nach einem Vergleich mit dem Ergebnis des Erhalts eines Normalzustands wird dem Windkraftanlagen-Leitrechner ein entsprechendes Statussignal aus dem Weiterbetriebsentscheidungs-Modul übermittelt und der Weiterbetrieb der Windkraftanlage aufrecht erhalten bleiben.

[0033] Hingegen wird nach dem Vergleich mit dem Ergebnis des Erhalts eines gestörten Zustands Einfluss auf den Maschinenbetrieb genommen, indem über die Schnittstelle zum Windkraftanlagen-Leitrechner ein entsprechendes Informationspaket in Form von Statussignalen des Rotorblattzustandes,

von Signalen zur Schadstellenlokalisierung und zur Schadenszustandsbeschreibung aus dem Statusdaten-Modul übertragen wird, der zu einer automatischen oder einer durch einen Dispatcher zu bestätigenden Änderung der Betriebsweise der Windkraftanlage gemäß einem Modul zur Signalgebung für eine Betriebsweisenänderung führt.

[0034] Aus einer Zuordnungstabelle zum Spektrum können aus dem Massenspeicher die betreffenden Informationen als Signale zur Lokalisation und zur Schadensbeschreibung sowie zur notwendigen Wartung und/oder Reparatur ausgelesen und ebenfalls an den Leitreechner zur Weitermeldung übermittelt werden.

[0035] Nach der Entscheidung, dass der Schaden beim Spektrenvergleich als nicht erheblich detektiert wird, kann aus der Zuordnungstabelle zum Spektrum vom Massenspeicher die Informationen zur Lokalisation und zur Schadensbeschreibung sowie zur notwendigen Wartung und Reparatur aus dem Modul ausgelesen und an den Leitreechner übermittelt werden, um dort auch nach akustischer Signalisation in Form einer Tabelle und/oder in Form einer grafischen Darstellung eine Handlungsanleitung zu geben.

[0036] Die aus den Eigenfrequenzspektren, Durchlauf- und Reflexions-Signalspektren auf Sendesignale sowie auf betriebseigengeräusche empfangenen und die daraus durch Transformation erhaltenen Signal-Spektren können sowohl hinsichtlich ihrer einzelnen speziellen Frequenz und Amplituden als auch hinsichtlich von Gesamtheiten wie Frequenzbanden und Frequenz-Amplitudengruppen bewertet werden.

[0037] Auf der Grundlage von vor der Montage durch Modellrechnungen und durch experimentellen Untersuchungen an unbeschädigten und beschädigten Rotorblättern bestimmten Frequenz- und Amplituden-Spektren bzw. Spektrenformen/-Banden, die eindeutig bestimmten Rotorblattzuständen, den schadfreien und den bestimmten Schäden zuzuordnenden Zuständen, zugeordnet werden können, können mit den empfangenen Ist-Frequenz- und Ist-Amplituden-Spektren sowie Ist-Spektrenformen/-Banden verglichen werden.

[0038] Bei Abweichungen wird zumindest eine Anzeige erhalten, ob die Abweichung einem Schadenszustand zugeordnet werden kann, der Anlass gibt, Einfluss auf den Betrieb der Windkraftanlage, bis hin zur Schnellabschaltung, zu nehmen.

[0039] Die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe wird anordnungsseitig durch eine Einrichtung gelöst, die durch die Merkmale gemäß Anspruch 22 gekennzeichnet ist. Ausgestaltungen der Einrichtung sind in den zugehörigen Unteransprüchen genannt.

[0040] Eine Einrichtung zur Durchführung des beschriebenen Verfahrens kann mindestens einen Schall-/Schwingungsempfänger (Sensor) und wahlweise mindestens einen als Erreger dienenden Schall-/Impulssender (Aktor) enthalten, die an relevanten, schallsignalgeeigneten Stellen eingebettet oder an der Oberfläche der Rotorblätter angebracht sind. Sowohl Aktor als auch Sensor sind mit der Auswerte-Einheit verknüpft. Diese ist konfiguriert, um die Schall- oder Impulssignale zur Schwingungserregung im Material des Rotorblattes zu erzeugen, die Signale zu den Aktoren zu übertragen und das Zeitfenster für die Erregung und den Empfang der Signale mittels der Sensoren zu steuern.

[0041] Da die Auswerte-Einheit im statischen Teil der Windkraftanlage angeordnet ist, dem Stator in der Gondel, Aktor und Sensor hingegen im rotierenden Teil, befindet sich zwischen Sensor und Aktor sowie der rotierenden Welle einerseits und der Auswerte-Einheit andererseits eine analoge oder digitale Übertragungseinheit zur Übertragung der Erregersignale und der Messsignale. Da auch die von dem Sensor ausgehenden Signale elektrische sind, ist die Übertragung in beide Richtungen auf der Basis von Magnet-Wechselfeldern, Funkwellen oder auch Lichtsignalen möglich.

[0042] Der Auswerte-Einheit umfasst neben dem eingangs genannten Vergleichsmodul, welches der Spektralanalyse und dem Vergleich des ermittelten Spektrums mit Referenzspektrums dient, ein Modul, welches im Anschluss an den Vergleich eine Zuordnung des ermittelten Spektrums zu einem Rotorblattzustand vornimmt. Der Rotorblattzustand ist dabei sowohl durch einen Schadenszustand, d.h. die Art und den Umfang des Schadens, als auch durch den Ort im Rotorblatt gekennzeichnet, an welchem der Schaden eingetreten ist. Diese Zuordnung führt letztlich zur Feststellung des Schadens und der Schadensstelle in dem Material des Rotorblattes, in welchem das Spektrum ermittelt wurde.

[0043] Die Sensoren und Aktoren können wahlweise vom Rotorblattfuß ausgehende fest installierte Signalleitungen und wahlweise Betriebsenergieversorgungsleitungen aufweisen.

[0044] Bei fest im oder auf dem Rotorblatt eingebetteten Leitungen sind darin die Signale zu den Aktoren und von den Sensoren vom und zum Rotorblattfuß an jeweils einem Rotorblatt übertragbar.

[0045] Der Übertragungseinheit sind Signalvor- bzw. Signalnachverarbeitungseinheiten, insbesondere Sender mit Encoder und Empfänger mit Decoder vorgeschaltet.

[0046] Zu der Auswerte-Einheit gehört ein dafür konfiguriertes und programmiertes Computersystem,

das mittels einer zugehörigen Betriebssystem- sowie Mess- und Auswertesoftware wahlweise Erregersignale erzeugt und zu den Aktoren sendet sowie Signale der Sensoren auswertet und durch Vergleich zwischen den gemessenen Spektren und den Spektren aus Spektrenbibliotheken, die vorzugsweise auf Massenspeichern abgelegt sind, zuzuordnenden Rotorblatt-Zustände sowie zugehörige Statussignale, Schadensinformationen und Betreiberhinweise ableitet, wobei Klima-Daten, die über die über eine Einheit zur Übernahme von Klimadaten abrufbar sind sowie Anlagenbetriebsdaten, wie Drehzahl und Leistung, die über die Schnittstelle zur Verfügung stehen, wahlweise berücksichtigt werden.

[0047] Die gebildeten Statussignale der Rotorblätter und die zugehörigen Informationen können über die Schnittstelle zum Leitreechner der Windkraftanlage übermittelt werden und dort der bestehenden Überwachung aufgeschaltet und zur Überwachung abgerufen werden, wobei dort der Status der Rotorblätter angezeigt und, falls Schadzustände auftreten, die Schadzustände am Rotorblatt und/oder innerhalb der Rotorblätter in Form von Text, Tabellen oder Grafiken angezeigt und wahlweise zugeordnete sicherheitsbezogene Handlungsanweisungen und Regelungen automatisch eingeleitet oder der Bedienung zur Ausführung vorgeschlagen werden, sowie mittel- oder langfristige Wartungs- oder Reparatur-Maßnahmen angezeigt werden und deren Ausführung kontrolliert wird.

[0048] Entsprechend einer besonders vorteilhaften Ausgestaltung bilden der erste Aktor und der erste Sensor ein erstes Aktor-/Sensorpaar für ein Blattflügel-Längssignal, indem Aktor und Sensor mit möglichst großem Abstand zueinander in der Längsausdehnung des Blattflügels angeordnet sind, vorzugsweise der Aktor in der Nähe des Blattfußes und der Sensor im Bereich des freien Endes des Blattflügels. Ein zweites Aktor und ein zweites Sensor stellen ein zweites Aktor-/Sensorpaar für ein Blattflügel-Quersignal dar. Zu diesem Zweck sind auch hier Aktor und Sensor mit möglichst großem Abstand zueinander, jedoch in der Querausdehnung des Blattflügels, d.h. jeweils an einer seiner Kanten, angeordnet.

[0049] Die Signal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit ist mit der Auswerte-Einheit verbunden, die darüber an die rotierende Welle/Rotorblätter Aktorsignale ausgibt und Sensorsignale empfängt.

[0050] Die Auswerte-Einheit besteht im Wesentlichen aus der zentralen Recheneinheit, aus einem Speicher, vorzugsweise einem MOS-Speicher, aus einer Bedieneinheit mit einem angeschlossenen Videoterminal, mit einer angeschlossenen Tastatur und mit einem angeschlossenen Drucker, aus einem Festplattenspeicher, einem Wechselspeicherspeicher und einem CD-ROM-Laufwerk, aus einem 6-kanali-

gen programmierbaren Schall-/Impulsgenerator sowie aus einem 6-kanaligen programmierbaren Messsignalempfänger, die über einen Bus der zentralen Recheneinheit miteinander verbunden sind, wobei am Bus vorzugsweise eine Einheit zur Übernahme von Klima-Daten, insbesondere von Windstärke und Temperatur sowie vorzugsweise eine Schnittstelle (serielles Interface), mit der eine Kommunikationsverbindung zum übergeordneten Leitreechner der Windkraftanlage herstellbar ist, angeschlossen sind.

[0051] Der programmierbare Schall-/Impulsgenerator steht über Signalleitungen mit der Erregersignal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit und der programmierbare Messsignalempfänger über weitere Signalleitungen mit der Messsignal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit in Verbindung.

[0052] Auf einem Massendatenspeicher, wie es die Festplatte oder die CD-ROM sind, können digitalisierte Referenzspektren für die Rotorblätter für verschiedene normale Betriebszustände sowie für Störungs- und Schadenszustände abgelegt sein, die aus Messungen an normalen und defekten Rotorblättern sowie aus Modellrechnungen vorzugsweise mit der FEM-Methode erhalten werden.

[0053] Die Signal-/Hilfsenergie-Übertragungseinrichtung besteht im Wesentlichen aus einer Send-/Empfangseinrichtung in Richtung zu den Aktoren des Blattflügels sowie aus einer Empfangs-/Sendeeinrichtung aus der Richtung der Sensoren des Blattflügels, wobei die Send-/Empfangseinrichtung und die Empfangs-/Sendeeinrichtung die signaltechnische Verknüpfung im Bereich zwischen Rotor und Stator betreffen, wobei die Send-/Empfangseinrichtung eine Erregersignal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit und die Empfangs-/Sendeeinrichtung eine Messsignal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit darstellen, die vorzugsweise eine Zweiteilung bezüglich der Anordnung auf/am Rotor und Stator aufweisen.

[0054] Die Erregersignal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit steht mit einer Erregersignalübertragungsvorverarbeitungseinheit (Encoder und Sender) auf einem Statorteil und eine Erregersignalübertragungsnachverarbeitungseinheit (Empfänger und Decoder) auf einem Rotorteil mit den Aktorsignalleitungen des Rotorblatts und den Aktorsignalausgangs-Leitungen, die zur Auswerte-Einheit gehören, in Verbindung.

[0055] Die Messsignal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit steht mit einer Messsignalübertragungsvorverarbeitungseinheit (Encoder und Sender) auf einem Rotorteil und eine Messsignalübertragungsnachverarbeitungseinheit (Empfänger und Decoder) auf dem Statorteil mit den Sensorsignalleitungen des Rotorblatts und den Sensorsignaleingangs-Leitungen, die zur Auswerte-Einheit führen, in

Verbindung.

[0056] Das angegebene Verfahren beruht auf festkörpermechanischen Erkenntnissen, nach denen jeder Körper entsprechend seiner Ausformung und der spezifischen mechanischen Eigenschaften hinsichtlich aller im betrachteten räumlich ausgedehnten Körper möglichen Eigenschwingungen mit ihren Oberwellen besitzt. Diese Eigenschwingungen ergeben für einen solchen Körper ein ganzes Spektrum von Frequenzen, die typisch für den gesamten Körper sind. Verändert sich der Körper durch innere und/oder äußere Schäden und Risse, so verändert sich das Spektrum. Gewisse Schwingungsformen treten nicht mehr oder in veränderter Form auf.

[0057] Genauso ändern sich die Schwingungsformen, wenn die Materialeigenschaften, wie z.B. der Elastizitäts-Modul, sich infolge Alterung oder Verwitterung ändern. Hierbei kommt es zu einer Verschiebung der typischen Frequenzen.

[0058] Schließlich werden akustische Signale, die nicht den Eigenfrequenzen entsprechen, die durch den Körper geschickt werden, im Körper beim Durchlaufen entsprechend der Materialeigenschaften mehr oder weniger abgeschwächt und an im Körper vorhandenen Unstetigkeiten und an den Körperoberflächen reflektiert. Bilden sich neue Unstetigkeiten oder verändern sich die Materialeigenschaften, so ist das an den Reflexionssignal-Spektren erkennbar, indem neue Reflexions-Peaks auftreten oder sich die Amplituden der Reflexionssignale verändern.

[0059] Diese beiden akustischen Verfahren sind nicht gleichbedeutend mit dem Verfahren der Modalanalyse, wo es um die Feststellung der zu den Eigenfrequenzen gehörenden Verformungen des Körpers geht.

[0060] Die oben genannten akustischen Eigenschaften eines ausgedehnten Körpers können einmal durch geeignete akustische Messungen experimentell oder aber rechnerisch über eine Modellrechnung, z.B. mit dem Finite-Element-Modell (FEM), bestimmt werden.

[0061] Die Messungen können an unbeschädigten und beschädigten Rotorblättern durchgeführt werden, wobei eine Zuordnung des Schadenszustands zum Spektrum möglich wird. Bei den Berechnungen können Schadenszustände, wie mechanische Schäden und Risse oder Materialveränderungen simuliert und die Spektren den Schadenszuständen zugeordnet werden. Auch können aus der FEM-Nachrechnung gemessener Spektren das Modell und die verwendeten Modellparameter und Materialeigenschaften abgeglichen werden.

[0062] Damit kann eine Datenbasis für die Bewer-

tung von im Betrieb gemessenen Spektren und den zugehörigen Zuständen geschaffen werden.

[0063] In den Rotorblättern von Windkraftanlagen befinden sich mindestens ein Sensor und wahlweise mindestens ein Aktor. Diese Sensoren/Aktoren sind an relevanten, schallsignalgeeigneten Stellen eingebettet oder an der Oberfläche angebracht, die vorzugsweise vom Rotorblattfuß ausgehende fest installierte Signalleitungen und ggf. Betriebsenergieversorgungsleitungen aufweisen. Bei fest im oder auf dem Rotorblatt eingebetteten Leitungen werden darin die Signale zu und von den Sensoren vom und zum Rotorblattfuß übertragen. Die Signal-Übertragung vom rotierenden Rotorblatt/Welle zum feststehenden Teil der Windkraftanlage erfolgt mit einer geeigneten analogen oder digitalen Messsignal-Übertragungseinrichtung vorzugsweise auf Basis von elektrischen oder magnetischen Wechselfeldern, elektromagnetischen Feldern im Bereich von Funkwellen oder Lichtsignal-Übertragungstrecken.

[0064] Dieser Übertragungseinheit vorgeschaltet ist vorzugsweise eine Signalvorverarbeitungseinheit. Nach der Übertragung von der rotierenden Welle werden die Messsignale in einer Auswerte-Einheit analysiert, indem aus den empfangenen Messsignalen oder aus den in Korrelation mit den über die Erreger eingespeisten Signalen empfangenen Signalantworten seitens der Messsignalempfänger die relevanten Frequenzen und Amplituden des Zeitspektrums oder eines transformierten – z.B. fouriertransformierten – Spektrums herausfiltert, die signifikant für die Zustandsbewertung des Rotorblatts sind.

[0065] Im Unterschied zur Modalanalyse, die die Schwingungsformen z.B. auf den Tragflächen und am Rumpf eines Flugzeuges analysiert, und zur Methode der Transferfunktionen werden hierbei die akustischen Spektren des Systems sowie die Messung und die Auswertung der Eigenfrequenzen, Eigengeräusche, Laufsignal- oder Reflexionseffekte berücksichtigt.

[0066] Das erfindungsgemäße Verfahren beruht darauf, dass nur mit selbst- und fremd angeregten Schwingungen und Impulsen für diagnostische Zwecke, deren Amplituden nicht in den Bereich allgemeiner Bauelementeschwingungen reichen, der Rotorblattzustand überwacht wird.

[0067] Zweckmäßig ist es, dass die Rotorblätter von Windkraftanlagen zumindest im Bereich der Rotorblattfüße verdreht/verstellt werden können, bzw. bei den stallgeregelten aerodynamische Bremsen aktiviert werden, damit die Windkräfte nicht mehr einwirken können und somit die Rotation auf ein Umdrehungszahlminimum verringert oder sogar beendet werden kann, was eigentlich die Abschaltung oder das Abfahren der Windkraftanlage bedeutet.

[0068] Weiterbildungen und zusätzliche Ausgestaltungen der Erfindung sind in weiteren Unteransprüchen beschrieben.

[0069] Die Erfindung wird anhand eines Ausführungsbeispiels mittels mehrerer Zeichnungen näher erläutert.

[0070] Es zeigen:

[0071] [Fig. 1](#) eine schematische Darstellung einer bekannten Windkraftanlage mit drei Rotorblättern in Zentralsymmetrie,

[0072] [Fig. 2](#) eine schematische Darstellung eines Rotorblattes mit Aktoren/Sensoren, die an elektrische Signal- und Hilfsenergie-Leitungen angeschlossen sind,

[0073] [Fig. 3](#) eine Sicht in Hauptwellenachsenrichtung auf den Stator der Signal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit mit Querschnitt der Hauptwelle der Windkraftanlage,

[0074] [Fig. 4](#) ein schematisches Detail der Signal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit auf der Hauptwelle der Windkraftanlage,

[0075] [Fig. 5](#) eine schematische Seitenansicht mit einer Übertragungs-Wicklung auf dem Rotoraufsatz der Signal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit,

[0076] [Fig. 6](#) ein Blockschaltbild der Auswerte-Einheit zur Steuerung des Messprozesses, zur Auswertung, zur Überwachung und zur Visualisierung des Zustands der Rotorblätter sowie der Beeinflussung des Betriebsregimes der Windkraftanlage,

[0077] [Fig. 7](#) ein Blockschaltbild der Signal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit für Aktorsignale,

[0078] [Fig. 8](#) ein Blockschaltbild der Signal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit für Messsignale und

[0079] [Fig. 9](#) einen schematischen Flussablaufplan zur Durchführung des Verfahrens zur Visualisierung und Überwachung des Zustands der Rotorblätter sowie der Beeinflussung des Betriebsregimes der Windkraftanlage.

[0080] In [Fig. 1](#) ist die Gesamtansicht einer Windkraftanlage **40** mit den drei Rotorblättern **1, 2, 3**, die an einer horizontal gelagerten Welle **6** befestigt sind, die sich im oberen Ende des Mastes **4** in einer vertikal drehbar angebrachten Gondel **5** befindet, dargestellt.

[0081] Die [Fig. 2](#) zeigt stellvertretend das Rotorblatt **1** bezüglich der drei bauartgleichen Rotorblätter **1, 2, 3**. Das Rotorblatt **1** besteht aus einem Blattflügel **7**

und aus einem zugehörigen Rotorblattfuß **8**.

[0082] Im Material des Blattflügels **7** befinden sich zwei Aktoren **9** und **10** sowie zwei Sensoren **11** und **12**. Jeder der Aktoren **9**, **10** ist mit einer zugehörigen Aktorsignalleitung **13**, **14** sowie Hilfsenergieleitungen (nicht eingezeichnet) und jeder der Sensoren ist mit einer Messsignalleitung **15**, **16** sowie Hilfsenergieleitungen (nicht eingezeichnet) durchgehend bis zum Rotorblattfuß **8** verbunden. Als Übertragungsmedium im Blattflügel **7** wird Schall eingesetzt. Der erste Aktor **9** und erste Sensor **11** bilden ein erstes Aktor-/Sensorpaar für ein Blattflügel-Längssignal, während der zweite Aktor **10** und der Sensor **12** ein zweites Aktor-/Sensorpaar für ein Blattflügel-Quersignal darstellen.

[0083] In [Fig. 3](#) ist eine Sicht in Hauptwellenachrichtung auf den Stator **17** der Signal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit **20** und der Querschnitt der durch den Stator führenden Welle **6** in der Gondel **5** auf dem Mast **4** dargestellt.

[0084] Durch den in [Fig. 4](#) dargestellten Stator **17** der Signal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit **20** ist die Welle **6** geführt, auf der die Signalleitungen **13** bis **16** und ggf. Hilfsenergieleitungen (nicht eingezeichnet) zum Rotorblatt **1** bis hin zur wellenseitigen Messsignalübertragungs-Vorverarbeitungseinheit (Sender, nicht eingezeichnet) **22m** der Signal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit **20** geführt sind, von der die gewandelten Signale mittels elektromagnetischer Felder auf den Teil der Einheit im Stator **17** übertragen werden, der die Signalübertragungs-Nachverarbeitungseinheit (Empfänger, nicht dargestellt) **21m** der Signal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit **20** folgt, von der die erhaltenen Messsignale auf den Messsignalleitungen **15'**, **16'** einer zentralen Recheneinheit **24** über einen programmierbaren Messsignalempfänger **34** zugeführt werden.

[0085] Für die Aktorsignale ist eine entsprechende Einrichtung mit Umkehr der Sende-/Empfangsrichtung vorhanden, die in [Fig. 7](#) dargestellt ist.

[0086] In [Fig. 5](#) wird der auf der Welle **6** befestigte Rotoraufsatz **18** der Signal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit **20** mit einer aufgebrachten zugehörigen Wicklung **19** gezeigt.

[0087] Die Signal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit **20** ist mit einer Auswerte-Einheit **23** verbunden.

[0088] In [Fig. 6](#) ist ein schematisches Blockschaltbild der Auswerte-Einheit **23** dargestellt. Die Auswerte-Einheit **23** besteht im wesentlichen aus der zentralen Recheneinheit (CPU) **24**, aus einem Speicher **25**, vorzugsweise einem MOS-Speicher, aus einer Bedieneinheit **26** mit einem angeschlossenen Videoterminale **27**, mit einer angeschlossenen Tastatur **28** und

mit einem angeschlossenen Drucker **29**, aus einem Festplattenspeicher (Harddisk) **30**, einem Wechselplattenspeicher **31** und einem CD-ROM-Laufwerk **32**, aus einem 6-kanaligen programmierbaren Schall-/Impulsgenerator **33** sowie aus einem 6-kanaligen programmierbaren Messsignalempfänger **34**, die über einen Bus **35** der zentralen Recheneinheit **24** miteinander verbunden sind. Am Bus **35** sind noch eine Einheit **36** zur Übernahme von Klima-Daten, insbesondere von Windstärke und Temperatur sowie vorzugsweise eine Schnittstelle (serielles Interface) **37**, mit der eine Kommunikations-Verbindung zum übergeordneten Leitrechner **38** der Windkraftanlage **40** hergestellt wird, angeschlossen.

[0089] Der programmierbare Schall-/Impulsgenerator **33** ist über die Signalleitungen **13'**, **14'** mit der Erregersignal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit **20a** verbunden. Die Erregersignale zu den Aktoren **9**, **10** verlaufen in Richtung **51** (Pfeil). Der programmierbare Messsignalempfänger **34** ist über die Messsignalleitungen **15'**, **16'** mit der Messsignal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit **20m** verbunden. Die Messsignale von den Sensoren **11**, **12** verlaufen in Richtung **50** (Pfeil). Die Steuerung der über den Bus **35** verbundenen Einheiten **33**, **20a** bzw. **34**, **20m**, den Datenaustausch zwischen ihnen und die Verarbeitung von Daten übernimmt die zentrale Recheneinheit **24**. Dazu ist auf dem Festplattenspeicher **30** ein Multitask-Echtzeit-Betriebssystem abgelegt, dessen Kernkomponenten im Speicher **25**, insbesondere in einem MOS-Speicher stehen.

[0090] Auf einem Massendatenspeicher, wie es der Festplattenspeicher **30** oder die CD-ROM-Laufwerk **32** sind, sind weiterhin digitalisierte Vergleichsspektren für die Rotorblätter **1**, **2**, **3** für verschiedene normale Betriebszustände sowie für Störungs- und Schadenszustände abgelegt, die aus Messungen an normalen und defekten Rotorblättern sowie aus Modellrechnungen vorzugsweise mit der FEM-Methode erhalten werden.

[0091] Im Folgenden werden die [Fig. 7](#), [Fig. 8](#) gemeinsam betrachtet.

[0092] Die Signal-/Hilfsenergie-Übertragungseinrichtung **20** besteht im Wesentlichen aus einer Sende-/Empfangseinrichtung in Richtung zu den Aktoren **9**, **10** des Blattflügels **7** sowie aus einer Empfangs-/Sendeeinrichtung aus der Richtung der Sensoren **11**, **12** des Blattflügels **7**. Die Sende-/Empfangseinrichtung und die Empfangs-/Sendeeinrichtung betreffen die signaltechnische Verknüpfung im Bereich zwischen Rotor und Stator **17**, wobei die Sende-/Empfangseinrichtung eine Erregersignal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit **20a** und die Empfangs-/Sendeeinrichtung eine Messsignal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit **20m** darstellen, die jeweils eine Zweiteilung bezüglich Rotor und Stator **17**

aufweisen, wobei auf dem Stator **17** die Statoreinheit **21** mit der Erregersignalübertragungs-Vorverarbeitungseinheit **21a** und der Messsignalübertragungs-Nachverarbeitungseinheit **21m** angebracht ist und auf dem Rotor die Rotoreinheit **22** mit der Messsignalübertragungs-Vorverarbeitungseinheit **22m** und der Erregersignalübertragungs-Nachverarbeitungseinheit **22a** angebracht ist.

[0093] In [Fig. 7](#) ist die Erregersignal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit **20a** mit der Erregersignalübertragungs-Vorverarbeitungseinheit (Encoder und Sender) **21a** auf einem Statorteil und die Erregersignalübertragungs-Nachverarbeitungseinheit (Empfänger und Decoder) **22a** auf einem Rotorteil mit den Aktorsignalleitungen **13**, **14** des jeweiligen Rotorblatts **1** und den Aktorsignalausgangs-Leitungen **13'**, **14'**, die zur Auswerte-Einheit **23** gehören, als schematisches Blockschaltbild dargestellt.

[0094] In [Fig. 8](#) ist die Messsignal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit **20m** mit der Messsignalübertragungs-Vorverarbeitungseinheit (Encoder und Sender) **22m** auf einem Rotorteil und die Messsignalübertragungs-Nachverarbeitungseinheit (Empfänger und Decoder) **21m** auf dem Statorteil mit den Sensor-sig-nalleitungen **15**, **16** des jeweiligen Rotorblattes **1** und den Sensorsignaleingangs-Leitungen **15'**, **16'**, die zur Auswerte-Einheit **23** führen, als schematisches Blockschaltbild dargestellt.

[0095] Zwischen den Erregersignalübertragungs-Vor- und den Erregersignalübertragungs-Nachverarbeitungseinheiten (**22a-21a**) sowie zwischen den Messsignalübertragungs-Vor- und den Messsignalübertragungs-Nachverarbeitungseinheiten (**22m-21m**) ist jeweils eine Übertragungsstrecke **57** vorhanden, in der die Informationen und die Energie vorzugsweise auf der Basis von Magnet-Wechselfeldern, Funkwellen und/oder Lichtsignalen übermittelt werden.

[0096] In [Fig. 9](#) ist ein schematisches Blockschaltbild und ein Ablaufplan der Durchführung eines Überwachungs-Vorgangs mit der erfindungsgemäßen Einrichtung dargestellt und erläutert. Das erfindungsgemäße Verfahren wird mit der erfindungsgemäßen Einrichtung zur Überwachung im Folgenden für die Methode unter Nutzung der Eigenfrequenzen dargelegt. Insbesondere die Erläuterung der dem Verfahren zugrunde liegenden Messwert-Verarbeitungsschritte erfolgt anhand des Flussablaufplans in [Fig. 9](#) sowie der [Fig. 6](#).

[0097] Das Verfahren wird für das Rotorblatt **1** dargestellt. In gleicher Weise läuft es für die anderen Rotorblätter **2**, **3** ab. Das Verfahren basiert auf der Anwendung von Eigenfrequenzen und Körperschall sowie Schall-Lauf- und Schall-Reflexionsverhalten, wobei die Resonanz- und Eigenfrequenzen, Durchlauf-

und Reflexions-Signalspektren nach Sendung von Erregersignalen oder aus der Eigenerregung bei Anlagenbetrieb sowie die Betriebseigengeräusche gemessen werden, wobei die empfangenen und die daraus durch Transformation gewonnenen Signal-Spektren hinsichtlich ihrer einzelnen speziellen Frequenz und Amplituden aber auch hinsichtlich von Gesamtheiten bewertet werden, wobei auf der Grundlage von Modellrechnungen und durch akustische Messungen von unbeschädigten und von geschädigten Rotorblättern **1**, **2**, **3** bestimmte Frequenz- und Amplituden-Spektren und/oder Spektrformen/-Banden erhalten werden, die diesen Zuständen zugeordnet werden, wobei Spektrenbibliotheken auf Massendatenspeichern **30**, **32** aus den Spektren mit der Zuordnung von Schadenszustand und Schadenslokalisierung und weiteren Informationen, vorzugsweise zum Anlagenbetrieb sowie zu Wartungs- und Reparatur, aufgebaut werden, wobei die empfangenen Ist-Frequenz- und Amplituden-Spektren und/oder Ist-Spektrformen/-Banden mit den in der Spektrenbibliothek abgelegten Spektren verglichen und die dazu korrespondierenden Zustände ermittelt werden, die bei Abweichungen vom Normalzustand bestimmten Schadzuständen und bestimmten Schadstellen **39** im Material der Rotorblätter **1**, **2**, **3** zugeordnet werden.

[0098] Dem Verfahren ist ein Softwareprogramm-Modul **49** zur Abarbeitung eines Algorithmus zugeordnet, das vorzugsweise folgende Module enthält:

- Ein Modul **41** zur Messprozesssteuerung,
- ein Modul **42** zur Messsignalaufbereitung,
- ein Vergleichsmodul **46**,
- ein Modul **47** zur Feststellung des Normalzustandes,
- ein Weiterbetriebsentscheidungs-Modul **56**,
- ein Modul **48** zur Feststellung eines gestörten Zustandes,
- ein Modul **52** zur Signalgebung für eine Betriebsweisenänderung, wobei das Modul **48** zur Feststellung eines gestörten Zustandes wahlweise mit dem Weiterbetriebsentscheidungs-Modul **56** in Verbindung stehen kann.

[0099] Der Messzyklus wird ausgelöst in dem Modul **41** zur Messprozesssteuerung und beginnt mit der Ausgabe eines Erregersignals an den Aktor **9** über die Erregersignal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit **20a**. Gleichzeitig wird das Tor des mehrkanaligen programmierbaren Messsignalempfängers **34** für den vorgegebenen Messzeitraum geöffnet und das aus der Schallübertragung **55** im Rotorblatt gewonnene Messsignal vom Sensor **11** empfangen und als zeitbezogenes Frequenz-Amplituden-Signal digital im Speicher **25** der zentralen Rechneinheit **24** in einer vorgegebenen Auflösung abgelegt. Das Modul **41** zur Messprozesssteuerung, die für die Bildung der Erregersignale und Empfangssignale zuständig ist,

gehört zu dem umfassenden Softwareprogramm-Modul **49** zur Abarbeitung eines Algorithmus, das sich auch in der zentralen Recheneinheit **24** befindet. Aus dem zugehörigen Messsignal-Vektor wird mittels anschließender Messsignalaufbereitung, z.B. mit schnellerer Fouriertransformation, ein Frequenz-Amplituden-Spektrum oder ein Laufzeitspektrum in dem Modul **42** zur Messsignalaufbereitung erzeugt. Es zeigt die für das Rotorblatt **1** typischen gemessenen Spektren in einem typischen normierten Frequenzbereich. Durch einen Mustervergleich mit den auf einem Massenspeicher **30** oder **32** abgelegten normierten Eigenfrequenz-Spektren aus Messungen und/oder Modellrechnungen wird in dem Vergleichsmodul **46** ein passender Zustand ermittelt. Dabei werden die Wetterdaten, z.B. Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Lufttemperatur, Luftfeuchte, aus einem Meteorologie-Modul **43** und die Anlagenbetriebsdaten, z.B. Drehzahl und Leistung, aus einem Anlagenbetriebsdaten-Modul **44** über die Schnittstelle **37** vom Leitreechner **38** abgegriffen als Parameter berücksichtigt.

[0100] Handelt es sich nach dem Vergleich um einen Normalzustand, so wird dem Leitreechner **38** ein entsprechendes Statussignal aus dem Weiterbetriebsentscheidungs-Modul **56** über die Schnittstelle **37** übermittelt und der Weiterbetrieb wird aufrechterhalten.

[0101] Handelt es sich nach dem Vergleich um einen gestörten Zustand, so wird im Fall eines sicher festgestellten erheblichen Schadens Einfluss auf den Maschinenbetrieb genommen, indem über die Schnittstelle **37** ein entsprechendes Informationspaket in Form von Statussignalen des Rotorblattzustandes, von Signalen zur Schadstellenlokalisierung und zur Schadenzustandsbeschreibung aus dem Informationsdaten-Modul **45** an den Leitreechner **38** übertragen wird, der zu einer automatischen oder einer durch einen Dispatcher zu bestätigenden Änderung der Betriebsweise der Windkraftanlage **40** gemäß einem Modul **52** zur Signalgebung für eine Betriebsweisenänderung veranlasst wird. Diese Aktion wird auch akustisch in der Warte signalisiert und an übergeordnete Einrichtungen weitergemeldet. Aus einer Zuordnungstabelle zum Spektrum aus dem Massenspeicher **30, 32** werden die Informationen als Signale zur Lokalisation und zur Schadensbeschreibung sowie zur notwendigen Reparatur ausgelesen und ebenfalls über die Schnittstelle **37** an den Leitreechner **38** zur Weitermeldung übermittelt.

[0102] Wird der Schaden beim Spektrenvergleich als nicht erheblich detektiert, so werden aus der Zuordnungstabelle zum Spektrum vom Massenspeicher **30, 32** die Informationen zur Lokalisation und zur Schadensbeschreibung sowie zur notwendigen Wartung und Reparatur aus dem Informationsdaten-Modul **45** ausgelesen und an den Leitreechner **38** übergeben, um dort auch nach akustischer Signalisa-

tion in Form einer Tabelle und/oder in Form einer grafischen Darstellung eine Handlungsanleitung zu geben.

[0103] Gibt es für das gemessene Spektrum, das einer Störung zuzuordnen ist, kein passendes Vergleichsspektrum, so wird dem Leitreechner **38** ein entsprechendes Statussignal übersandt mit der Aufforderung an die Überwachung, sich der Situation anzunehmen und eine Entscheidung zu treffen. Das gemessene Spektrum kann über eine Datenfernübertragung vom Leitreechner **38** an den Lieferer der Überwachungsanlage übermittelt werden, der ferndiagnostisch auf die Anfrage mit einer Antwort an den Leitreechner **38** und den Dispatcher reagiert, welcher Zustand diesem Spektrum zugeordnet wird und welche Handlungen erforderlich sind.

[0104] Das erfindungsgemäße Verfahren basiert auf der Nutzung von Eigenfrequenzen und Körperschall sowie Schall-Lauf- und -Reflexionsverhalten, da diese akustischen Eigenschaften eng mit dem Zustand eines Rotorblatts **1, 2, 3** verknüpft sind. Mechanische Schäden und Risse und Materialveränderungen im Inneren und auf der Oberfläche haben einen deutlichen Einfluss auf die akustischen Eigenschaften, da bestimmte Eigenfrequenzen, bestimmte Reflexionssignale, Laufsignalabschwächungen und die Betriebseigengeräusche eng mit den mechanischen Eigenschaften verknüpft sind. Die Abhängigkeiten können experimentell mit Messungen an Rotorblättern verschiedener Zustände und durch Simulation der Auswirkungen von Fehlstellen und Materialveränderungen im Rotorblatt **1, 2, 3** z.B. mit FEM-Modellen berechnet werden.

[0105] Gemessen und ausgewertet werden die Eigenfrequenzspektren, Durchlauf- und Reflexions-Signalspektren auf Sende-Schall- oder Impuls-Signale sowie Betriebseigengeräusche. Die empfangenen und die daraus durch Transformation gewonnenen Signal-Spektren werden hinsichtlich ihrer einzelnen speziellen Frequenz und Amplituden, aber auch hinsichtlich von Gesamtheiten wie Frequenzbanden und Frequenz-Amplitudengruppen bewertet.

[0106] Auf der Grundlage von vorher durch Modellrechnungen und durch experimentelle Untersuchungen an unbeschädigten und beschädigten Rotorblättern bestimmten Frequenz- und Amplituden-Spektren bzw. Spektrenformen/-Banden, die eindeutig bestimmten Rotorblattzuständen, den schadfreien und den bestimmten Schäden zuzuordnenden Zuständen, zugeordnet werden können, werden mit den empfangenen Ist-Frequenz- und Ist-Amplituden-Spektren sowie Ist-Spektrenformen/-Banden verglichen.

[0107] Bei Abweichungen wird zunächst zumindest eine Anzeige erhalten, ob die Abweichung einem

Schadzustand zugeordnet werden kann, der Anlass gibt, Einfluss auf den Betrieb der Windkraftanlage **40**, bis hin zur Schnellabschaltung, zu nehmen. Des Weiteren wird grundsätzlich die Lokalisierung der dem Zustand zuzuordnenden Schadstelle **39** an dem zu überwachenden Rotorblatt **1** ausgewiesen, wenn der Zustand in der Spektrenbibliothek enthalten ist. Davon ausgehend werden Maßnahmen vorgeschlagen für den weiteren Betrieb der Windkraftanlage **40** sowie für Wartungs- und Reparaturarbeiten zur Schadensbehebung. Nicht zuzuordnende Spektren werden registriert und zur weiteren Bewertung an die für den Algorithmus zuständige Auswerte-Einheit **23** oder in deren Erweiterung wahlweise über Datenfernübertragung übermittelt. Wahlweise kann dort mit einer Fuzzy-Logik im Zusammenspiel mit den sonst einlaufenden Erkenntnissen anderer Anlagen eine Anzeige zum Zustand erhalten und die Information an die betroffene Windkraftanlage **40** zurückgesendet werden. Für die anderen Rotorblätter **2, 3** gilt Gleiches.

[0108] Ein Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens liegt in der Gewinnung von objektiven Bewertungsdaten, was mit den derzeit durchgeführten visuellen Betrachtungen nur eingeschränkt gegeben ist.

[0109] Die Erfindung eröffnet die Möglichkeit, dass die Schadstellen **39** mit integrierten technischen Mitteln durch die ständige Überwachung während des Betriebes kontinuierlich und rechtzeitig erkannt werden können, so dass die aufwendigen manuellen periodischen Inspektionen mit notwendigen Betriebsunterbrechungen wegfallen können. Das führt einerseits zu einer beträchtlichen Kosteneinsparung. Andererseits würden sich die der Laufzeiten der Windkraftanlagen **40** pro Jahr verlängern und der Ertrag sich verbessern.

[0110] Aufgrund der Erkennung von Schäden in den Rotorblättern **1, 2, 3** schon zum Zeitpunkt der Entstehung können – wenn erforderlich und möglich – sofort zielgerichtet Reparaturen veranlasst werden.

[0111] Insbesondere bei den Schichtwerkstoffen der Rotorblätter **1, 2, 3** lassen sich damit Schadensvergrößerungen bis hin zu Zerstörungen vermeiden, womit eine erhebliche Verringerung der Reparaturkosten erreicht wird. Mit der Erfindung wird somit im Fall einer Zerstörung ein lang andauernder Stillstand der Windkraftanlagen vermieden, der zu einem erheblichen Ausfall von Erträgen führt.

[0112] Ein weiterer Vorteil der Erfindung ist die Möglichkeit der Materialprüfung des Rotorblattes bereits vor dem Einbau an der Windkraftanlage, indem das jeweilige Rotorblatt zunächst im Werk, dann vor Ort nach dem Transport und während der Montage akustischen Untersuchungen unterzogen wird und die Signale mit standardisierten Sollwerten verglichen wer-

den. Liegen die Signalwerte innerhalb einer vorgegebenen Toleranzbreite, kann ein qualitätssicherer Zustand der Rotorblätter definiert werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Überwachung des Zustandes von Rotorblättern an Windkraftanlagen mittels eines Empfangs, einer Übertragung und einer Messwerterfassung und -verarbeitung von Signalen sowie einer Signaltransformation, einer Auswertung und einer Durchführung von Gegenmaßnahmen, **dadurch gekennzeichnet,**

a) dass eine Messung von rotorblattinternen Resonanz-, Eigenfrequenz-, Durchlauf- und Reflexions-Körperschall-Signalen mittels mindestens eines rotorblattzugehörigen Schall-/Schwingungsempfängers (Sensor (**11, 12**)) erfolgt, an dessen Ausgang elektrische, aus den materialintern übertragenen Schall-Signalen gewandelte Signale ausgegeben werden,

b) dass eine Einspeisung von Schallsignalen wahlweise von mindestens einem rotorblattzugehörigen Schall-/Impulssender (Aktor (**9, 10**)) erfolgt, dessen Auslösung im Rotorblatt (**1, 2, 3**) durch eine Auswerte-Einheit (**23**) veranlasst wird, oder eine Eigenerregung infolge von Betriebseigengeräuschen bei Anlagenbetrieb,

c) dass eine Überführung der elektrischen Signale in eine Form von Spektren erfolgt,

d) dass ein Vergleich mittels Spektren-Analyse zwischen diesen Spektren und den Spektren von Spektrenbibliotheken erfolgt, wobei die Spektrenbibliotheken in Massendatenspeichern (**30, 32**) abgelegt und deren Spektren defekten oder unbeschädigten Rotorblättern zugeordnet sind (Referenzspektren), so dass bei Abweichungen vom Normalzustand die dazu korrespondierenden Zustände über die Referenzspektren ermittelt und Schadenszustände und Schadstellen (**39**) im Material des Rotorblattes (**1, 2, 3**) zugeordnet werden und

e) dass die Schritte a bis d vor der Durchführung von Gegenmaßnahmen absolviert werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass auf der Grundlage von Modellrechnungen und durch akustische Messungen von unbeschädigten und von geschädigten Rotorblättern bestimmte Frequenz- und Amplituden-Spektren und/oder Spektrenformen/-Banden erhalten werden, welche dem jeweiligen schadfreien oder bekannten geschädigten Zustand des Rotorblatts (Rotorblattzustand) zugeordnet werden, und dass die Spektrenbibliotheken aus den derart gewonnenen Referenzspektren mit dem zugeordneten Schadenszustand sowie der Schadenslokalisierung und weiteren Informationen, vorzugsweise zum Anlagenbetrieb sowie zu Wartungs- und Reparaturmaßnahmen, aufgebaut werden.

3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Messsignale nach einer Übertragung von der rotierenden Welle (6) in einer Auswerte-Einheit (23) analysiert werden, indem aus dem empfangenen Eigen-Signalspektrum oder aus den in Korrelation mit den über die Aktoren (9, 10) eingespeisten Signalen empfangenen Spektren seitens der Sensoren (11, 12) die relevanten Frequenzen und Amplituden des Zeitspektrums oder eines transformierten, vorzugsweise fouriertransformierten Spektrums herausgefiltert werden, die signifikant für die Zustandsbewertung sind.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Mess- und Erregersignale von und zu den Rotorblättern (1, 2, 3) über eine Signal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit (20) von der Welle (6) zum Stator (17) und umgekehrt geführt werden und dabei Signalübertragungs-Vorverarbeitungseinheiten (Encoder und Sender) (21a, 22m) sowie Signalübertragungs-Nachverarbeitungseinheiten (Empfänger und Decoder) (22a, 21m) verwendet werden.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass aus dem jeweiligen Vergleich zwischen den empfangenen Spektren und den Referenzspektren kurzfristige sowie mittel- und langfristige Maßnahmen zum Betrieb der Windkraftanlage (40) und zur Reparatur und Wartung der Rotorblätter (1, 2, 3) abgeleitet werden.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass an einen Leitreechner (38), in welchem automatisch der Anlagenbetrieb bis hin zur Schnellabschaltung beeinflusst werden kann, die Zustands-Informationen über eine Schnittstelle (37), vorzugsweise ein serielles Interface, übermittelt werden und einer Anlagenüberwachung die Maßnahmen zur Reaktionsweise auf Schadzustände und/oder Informationen zur Einleitung von dringlichkeitsabhängigen Maßnahmen mitgeteilt werden.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Zustands-Überwachung der Rotorblätter (1, 2, 3) auch während der Produktion sowie nach dem Transport vor Ort und während der Montage im Bereich der Windkraftanlage (40) durchgeführt wird.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass vorzugsweise in einer zugehörigen zentralen Recheneinheit (24) ein Softwareprogramm-Modul (49) einen der Algorithmen abarbeitet unter Verwendung eines Moduls (41) zur Messprozesssteuerung, eines Moduls (42) zur Messsignalaufbereitung, eines Vergleichsmoduls (46), eines Moduls (47) zur Feststellung des Normalzustandes, eines Weiterbetriebsentschei-

dungs-Moduls (56), eines Moduls (48) zur Feststellung eines gestörten Zustandes und/oder eines Moduls (52) zur Signalgebung für eine Betriebsweisenänderung, wobei das Modul (48) zur Feststellung eines gestörten Zustandes wahlweise mit dem Weiterbetriebsentscheidungs-Modul (56) in Verbindung stehen kann.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass der Messzyklus in dem Modul (41) zur Messprozesssteuerung ausgelöst wird und dieser mit der Ausgabe eines Erregersignals von einem programmierbaren Schall-/Impulsgenerator (33) an den Aktor (9, 10) über eine Erregersignal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit (20a) beginnt, wobei gleichzeitig das Tor einer programmierbaren Signalempfangseinheit (34) für den vorgegebenen Messzeitraum geöffnet und das aus der Schallübertragung (55) im Rotorblatt gewonnene Messsignal vom Sensor (11, 12) empfangen sowie als zeitbezogenes Frequenz-Amplituden-Signal digital in einem Hauptspeicher (25) der zentralen Recheneinheit (24) in einer vorgegebenen Auflösung abgelegt wird.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, dass aus dem durch die Messung gewonnenen Messsignal-Vektor mittels anschließender Transformation, vorzugsweise einer schnellen Fouriertransformation ein Frequenz-Amplituden-Spektrum in dem Modul (42) zur Messsignalaufbereitung erzeugt wird, wobei das Frequenz-Amplituden-Spektrum die für das Rotorblatt (1, 2, 3) typischen gemessenen Eigenfrequenzen als ein Spektrum in einem typischen normierten Frequenzbereich besitzt, und wobei durch einen Mustervergleich mit den auf den Massendatenspeichern (30, 32) abgelegten normierten Eigenfrequenz-Referenzspektren aus Messungen und/oder Modellrechnungen in dem Vergleichsmodul (46) ein korrespondierender Zustand ermittelt wird, wobei die Wetterdaten, z.B. Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Lufttemperatur, Luftfeuchte, aus einem Meteorologie-Modul (43) und die Anlagenbetriebsdaten, z.B. Drehzahl und Leistung, aus einem Anlagenbetriebsdaten-Modul (44) als Parameter berücksichtigt werden.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, dass aus dem durch die Messung von Schalllauf- und Reflexionssignalen gewonnenen Messsignal-Vektor mittels anschließender Transformation ein frequenzabhängiges Zeit-Amplituden-Spektrum in einem Modul (42) zur Messsignalaufbereitung erzeugt wird, wobei das Zeit-Amplituden-Spektrum für das Rotorblatt (1, 2, 3) typische gemessenen Laufzeiten und Reflexionen als ein Spektrum in einem typischen normierten Frequenz- und Zeitfensterbereich besitzt, und wobei durch einen Mustervergleich mit den auf den Massendatenspeichern (30, 32) abgelegten normierten Eigenfrequenz-Referenzspektren aus Messungen und/oder

Modellrechnungen in einem Vergleichsmodul (46) ein korrespondierender Zustand ermittelt wird, wobei die Wetterdaten, z.B. Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Lufttemperatur, Luftfeuchte, aus einem Meteorologie-Modul (43) und die Anlagenbetriebsdaten, z.B. Drehzahl und Leistung, aus einem Anlagenbetriebsdaten-Modul (44) als Parameter berücksichtigt werden.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass nach einem Vergleich mit dem Ergebnis des Erhalts eines Normalzustands dem Leitreechner (38) ein entsprechendes Statussignal aus dem Weiterbetriebsentscheidungs-Modul (56) übermittelt wird und der Weiterbetrieb aufrecht erhalten bleibt.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass nach dem Vergleich mit dem Ergebnis des Erhalts eines gestörten Zustands Einfluss auf den Maschinenbetrieb genommen wird, indem über die Schnittstelle (37) ein entsprechendes Informationspaket in Form von Statussignalen des Rotorblattzustandes, von Signalen zur Schadstellenlokalisierung und zur Schadenzustandsbeschreibung aus dem Informationsdaten-Modul (45) an den Leitreechner (38) übertragen wird, der zu einer automatischen oder einer durch einen Dispatcher zu bestätigenden Änderung der Betriebsweise der Windkraftanlage (40) gemäß einem Modul (52) zur Signalgebung für eine Betriebsweisenänderung führt.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass aus einer Zuordnungstabelle zum Referenzspektrum aus den Massendaten Speichern (30, 32) die Informationen als Signale zur Lokalisation und zur Schadensbeschreibung sowie zur notwendigen Wartung und Reparatur ausgelesen und ebenfalls an den Leitreechner (38) zur Weitermeldung übermittelt werden.

15. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass nach einer Entscheidung, die den Schaden infolge des Spektrenvergleichs als nicht erheblich detektiert, aus der Zuordnungstabelle zum Referenzspektrum von den Massendaten Speichern (30, 32) die Informationen zur Lokalisation und zur Schadensbeschreibung sowie zur notwendigen Wartung und Reparatur aus dem Informationsdaten-Modul (45) ausgelesen und an den Leitreechner (38) übermittelt werden, um dort auch nach akustischer Signalisation in Form einer Tabelle und/oder in Form einer grafischen Darstellung eine Handlungsanleitung zu geben.

16. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass im Fall, dass für das gemessene, vom Normalzustand abweichende Spektrum, kein passendes Vergleichsspektrum vor-

liegt, dem Leitreechner (38) ein entsprechendes Statussignal übersandt wird mit der Aufforderung an die Überwachung zur ferndiagnostischen Klärung, wobei das gemessene Spektrum auch über eine Datenfernübertragung vom Leitreechner (38) an den Service des Überwachungsanlagenherstellers übermittelt werden kann, der danach Hilfestellungen geben kann.

17. Verfahren nach einem der Ansprüche 10 bis 16, dadurch gekennzeichnet, dass die aus den Eigenfrequenzspektren, Durchlauf- und Reflexions-Signalspektren von Sendesignalen sowie den Betriebs-eigengeräuschen empfangenen und daraus durch Transformation erhaltenen Signal-Spektren sowohl hinsichtlich ihrer einzelnen speziellen Frequenz und Amplituden als auch hinsichtlich von Gesamtheiten wie Frequenzbanden und Frequenz-Amplitudengruppen bewertet werden.

18. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass auf der Grundlage von vor der Montage durch Modellrechnungen und durch experimentelle Untersuchungen an unbeschädigten und beschädigten Rotorblättern bestimmten Referenzspektren, die eindeutig bestimmten Rotorblattzuständen zugeordnet werden können, mit den empfangenen Ist-Frequenz- und Ist-Amplituden-Spektren sowie Ist-Spektrenformen/-Banden verglichen werden.

19. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass bei Abweichungen zwischen den verglichenen Spektren zumindest eine Anzeige erhalten wird, ob die Abweichung einem solchen Schadenszustand zugeordnet werden kann, der Anlass gibt, Einfluss auf den Betrieb der Windkraftanlage (40), bis hin zur Schnellabschaltung, zu nehmen.

20. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass bei nicht zuordenbaren Spektren wahlweise mit einer Fuzzy-Logik im Zusammenspiel mit den sonst einlaufenden Erkenntnissen anderer Windkraftanlagen eine Anzeige zum Zustand erhalten und die Informationen an die betroffene Windkraftanlage (40) zurückgesendet werden.

21. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Zustandsprüfung des Rotorblattes (1, 2, 3) bereits vor dem Einbau an der Windkraftanlage (40) erfolgt, indem das jeweilige Rotorblatt (1, 2, 3) zunächst im Werk, dann vor Ort nach dem Transport und während der Montage akustischen Untersuchungen unterzogen wird und die Signale mit standardisierten Sollwerten verglichen werden.

22. Einrichtung zur Überwachung des Zustandes von Rotorblättern an Windkraftanlagen mittels eines

Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche, mit mindestens einem Sensor, der die empfangenen Signale in elektrische Signale wandelt, mit einer Auswerte-Einheit, die die elektrischen Signale von den Sensoren übertragen erhält und verarbeitet, mit mindestens einem Massendatenspeicher, in dem sich Spektrenbibliotheken befinden, mit mindestens einem Vergleichsmodul zur Spektralanalyse und Vergleich des gemessenen Spektrums mit den in den Spektrenbibliotheken vorgehaltenen Referenzspektren und mit einer Gegenmaßnahmen-Auslöse-Einrichtung, dadurch gekennzeichnet,

a) dass ihr mindestens ein rotorblattzugehöriger Sensor (**11, 12**) zum Empfang von rotorblattinternen Schall-Signalen und wahlweise mindestens ein rotorblattzugehöriger Aktor (**9, 10**) zugeordnet sind,
 b) dass die Aktoren (**9, 10**) und die Sensoren (**11, 12**) mit der Auswerte-Einheit (**23**), in der die elektrischen Erregersignale erzeugbar sind, in Verbindung stehen und die Erregersignale zu den Aktoren (**9, 10**) zur Ausstrahlung von rotorblattinternen Schall-Signalen übertragbar sind,
 c) dass sich zwischen den Sensoren (**11, 12**) und Aktoren (**9, 10**) einerseits sowie der Auswerte-Einheit (**23**) andererseits eine Signal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit (**20**) befindet, in der die Messsignal- und Erregersignal-Übertragung erfolgt, und
 d) dass in der Auswerte-Einheit (**23**) zumindest ein Modul (**47, 48**) zur Feststellung eines Zustandes eines Rotorblattes (**1, 2, 3**) aufgrund einer Zuordnung von ermittelten Spektren und/oder Spektralförmungen/-Banden des Rotorblattes (**1, 2, 3**) zu den Zuständen von defekten oder von unbeschädigten Rotorblättern derart vorhanden ist, dass Schadenszustände und Schadstellen (**39**) im Material des Rotorblattes (**1, 2, 3**) feststellbar sind.

23. Einrichtung nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, dass die Sensoren (**11, 12**) und Aktoren (**9, 10**) wahlweise vom Rotorblattfuß (**8**) ausgehende fest installierte Signalleitungen (**13, 14, 15, 16**) und wahlweise Betriebsenergieversorgungsleitungen (**53, 54**) aufweisen.

24. Einrichtung nach Anspruch 22 oder 23, dadurch gekennzeichnet, dass bei fest im oder auf dem Rotorblatt (**1, 2, 3**) eingebetteten Signalleitungen (**13, 14, 15, 16**) darin die Signale zu und von den Aktoren/Sensoren (**9, 10, 11, 12**) vom und zum Rotorblattfuß (**8**) an jeweils einem Rotorblatt (**1, 2, 3**) übertragbar sind, wobei für die Signal-Übertragung von der rotierenden Welle (**6**) zu einem Stator (**17**) in der Gondel (**5**) der Windkraftanlage (**40**) eine analoge oder digitale Signal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit (**20**) für Messsignale angeordnet ist.

25. Einrichtung nach einem der Ansprüche 22 bis 24, dadurch gekennzeichnet, dass der Signal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit (**20**) Signalvor- bzw. Signalnachverarbeitungseinheiten zugeordnet sind, de-

nen insbesondere Sender mit Encoder und Empfänger mit Decoder vorgeschaltet sind.

26. Einrichtung nach einem der Ansprüche 23 bis 25, dadurch gekennzeichnet, dass ein Modul (**41**) zur Messprozesssteuerung für die Bildung der Erregersignale und die Erfassung der Empfangssignale zuständig ist.

27. Einrichtung nach einem der Ansprüche 22 bis 26, dadurch gekennzeichnet, dass die Auswerte-Einheit (**23**) ein dafür konfiguriertes und programmiertes Computersystem umfasst, in welchem mittels einer zugehörigen Betriebssystem- sowie Mess- und Auswertesoftware wahlweise Erregersignale erzeugbar und zu den Aktoren (**9, 10**) sendbar sowie die von den Sensoren (**11, 12**) empfangenen Signale auswertbar sind, und in welchem infolge eines Vergleichs zwischen einem gemessenen Spektrum und vorzugsweise auf Massendatenspeichern (**30, 32**) des Computersystems gespeicherten Referenzspektren Statussignale und Schadensinformationen des Rotorblattes sowie Betreiberhinweise für die Windkraftanlage ausgebar sind, wobei zur Berücksichtigung im Vergleich Klimadaten über eine Einheit (**36**) zur Übernahme von Klimadaten sowie Anlagenbetriebsdaten, wie Drehzahl und Leistung, über eine Schnittstelle (**37**) abrufbar sind.

28. Einrichtung nach einem der Ansprüche 22 bis 27, dadurch gekennzeichnet, dass der Auswerteeinheit eine Schnittstelle zugeordnet ist und die Schnittstelle mit einem Leitreechner (**38**) der Windkraftanlage (**40**) in Verbindung steht, an welchen die gebildeten Statussignale des Rotorblattes (**1, 2, 3**), die Schadensinformationen und die Betreiberhinweise übermittelbar sind und an dem der Status der Rotorblätter (**1, 2, 3**), falls Schadzustände auftreten, die Schadstellen (**39**) am und/oder innerhalb des Rotorblatts (**1, 2, 3**) in Form von Text, Tabellen oder Grafiken sowie mittel- oder langfristige Wartungs- oder Reparatur-Maßnahmen anzeigbar sind.

29. Einrichtung nach einem der Ansprüche 22 bis 28, dadurch gekennzeichnet, dass ein erster Aktor (**9**) und ein erster Sensor (**11**) ein erstes Aktor-/Sensorpaar für ein Blattflügel-Längssignal bilden, während ein zweiter Aktor (**10**) und ein zweiter Sensor (**12**) ein zweites Aktor-/Sensorpaar für ein Blattflügel-Quersignal darstellen.

30. Einrichtung nach einem der Ansprüche 22 bis 29, dadurch gekennzeichnet, dass die Signal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit (**20**) mit der Auswerte-Einheit (**23**) verbunden ist.

31. Einrichtung nach einem der Ansprüche 22 bis 30, dass die Auswerte-Einheit (**23**) im Wesentlichen aus der zentralen Recheneinheit (**24**), aus einem Speicher (**25**), vorzugsweise einem MOS-Speicher,

aus einer Bedieneinheit (26) mit einem angeschlossenen Videoterminal (27), mit einer angeschlossenen Tastatur (28) und mit einem angeschlossenen Drucker (29), aus einem Festplattenspeicher (30), einem Wechselplattenspeicher (31) und einem CD-ROM-Laufwerk (32), aus einem 6-kanaligen programmierbaren Schall-/Impulsgenerator (33) sowie aus einem 6-kanaligen programmierbaren Messsignalempfänger (34) besteht, die über einen Bus (35) der zentralen Recheneinheit (24) miteinander verbunden sind, wobei am Bus (35) vorzugsweise eine Einheit (36) zur Übernahme von Klima-Daten, insbesondere von Windstärke und Temperatur sowie vorzugsweise eine Schnittstelle (37), mit der eine Kommunikations-Verbindung zum übergeordneten Leit-rechner (38) der Windkraftanlage (40) herstellbar ist, angeschlossen sind.

32. Einrichtung nach einem der Ansprüche 22 bis 31, dadurch gekennzeichnet, dass der programmierbare Schall-/Impulsgenerator (33) über Signalleitungen (13', 14') mit der Erregersignal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit (20a) verbunden ist und der programmierbare Messsignalempfänger (34) über weitere Signalleitungen (15', 16') mit einer Messsignal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit (20m) in Verbindung steht.

33. Einrichtung nach einem der Ansprüche 22 bis 32, dadurch gekennzeichnet, dass auf einem Mas-sendatenspeicher digitalisierte Vergleichsspektren für die Rotorblätter (1, 2, 3) für verschiedene normale Betriebszustände sowie für Störungs- und Schadenszustände abgelegt sind, die aus Messungen an normalen und defekten Rotorblättern sowie aus Modellrechnungen vorzugsweise mit der FEM-Methode erhalten sind, wobei Klimadaten, wie Luftgeschwindigkeit, -temperatur und -feuchte sowie Anlagenbetriebsdaten, wie Drehzahl und Leistung, Parameter sein können.

34. Einrichtung nach einem der Ansprüche 22 bis 33, dadurch gekennzeichnet, dass die Signal-/Hilfsenergie-Übertragungseinrichtung (20) im Wesentlichen aus einer ersten Empfangs-/Sendeeinrichtung in Richtung zu den Aktoren (9, 10) des Blattflügels (7) des Rotorblattes (1, 2, 3) sowie aus einer zweiten Empfangs-/Sendeeinrichtung aus der Richtung der Sensoren (11, 12) des Blattflügels (7) besteht, wobei die erste und zweite Sende-/Empfangseinrichtung der signaltechnischen Verknüpfung von Rotor und Stator (17) dienen, wobei die erste Sende-/Empfangseinrichtung eine Erregersignal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit (20a) und die zweite Empfangs-/Sendeeinrichtung eine Messsignal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit (20m) darstellen, die vorzugsweise eine Zweiteilung bezüglich der Anordnung auf/am Rotor und Stator (17) aufweisen, wobei auf dem Stator (17) eine Statoreinheit (21) mit einer Erregersignalübertragungs-Vorverarbeitungseinheit

(21a) und einer Messsignalübertragungs-Nachverarbeitungseinheit (21m) angebracht sind und auf dem Rotor eine Rotoreinheit (22) mit einer Messsignalübertragungs-Vorverarbeitungseinheit (22m) und einer Erregersignalübertragungs-Nachverarbeitungseinheit (22a) angebracht sind.

35. Einrichtung nach Anspruch 34, dadurch gekennzeichnet, dass die Erregersignal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit (20a) mit einer Erregersignalübertragungs-Vorverarbeitungseinheit (Encoder und Sender) (21a) auf einem Statorteil und die Erregersignalübertragungs-Nachverarbeitungseinheit (Empfänger und Decoder) (22a) auf einem Rotorteil mit Aktorsignalleitungen (13, 14) des Rotorblatts (1, 2, 3) und Aktorsignalausgangs-Leitungen (13', 14'), die zur Auswerte-Einheit (23) gehören, in Verbindung stehen.

36. Einrichtung nach einem der Ansprüche 34 oder 35, dadurch gekennzeichnet, dass die Messsignal-/Hilfsenergie-Übertragungseinheit (20m) mit einer Messsignalübertragungs-Vorverarbeitungseinheit (Encoder und Sender) (22m) auf einem Rotorteil und die Messsignalübertragungs-Nachverarbeitungseinheit (Empfänger und Decoder) (21m) auf dem Statorteil mit Sensorsignalleitungen (15, 16) des Rotorblattes (1, 2, 3) und Sensorsignaleingangs-Leitungen (15', 16'), die zur Auswerte-Einheit (23) führen, in Verbindung stehen.

37. Einrichtung nach einem der Ansprüche 34 bis 36, dadurch gekennzeichnet, dass zwischen den Erregersignalübertragungs-Vor- und den Erregersignalübertragungs-Nachverarbeitungseinheiten (22a-21a) sowie zwischen den Messsignalübertragungs-Vor- und den Messsignalübertragungs-Nachverarbeitungseinheiten (22m-21m) jeweils Übertragungsstrecken (57) vorhanden sind, in denen die Informationen/Signale und die Energie/Signale vorzugsweise auf der Basis von Magnet-Wechselfeldern, Funkwellen und/oder Lichtsignalen übertragbar sind.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

Fig. 2

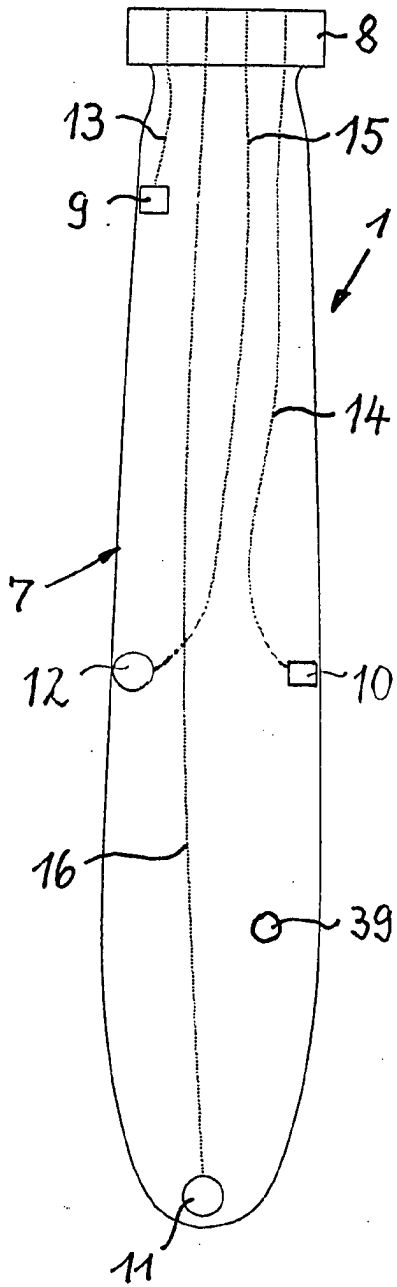


Fig. 1

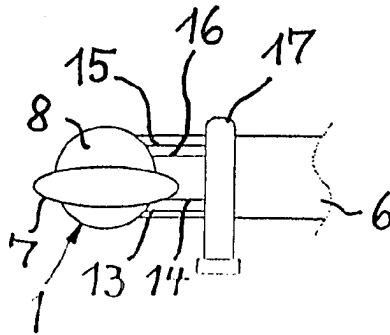
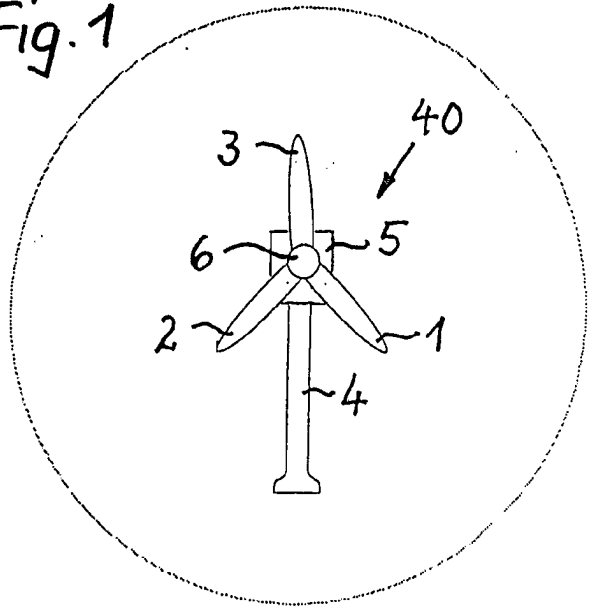


Fig. 4

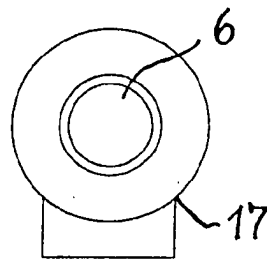


Fig. 3

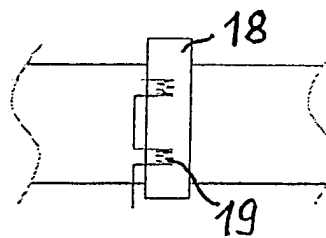


Fig. 5

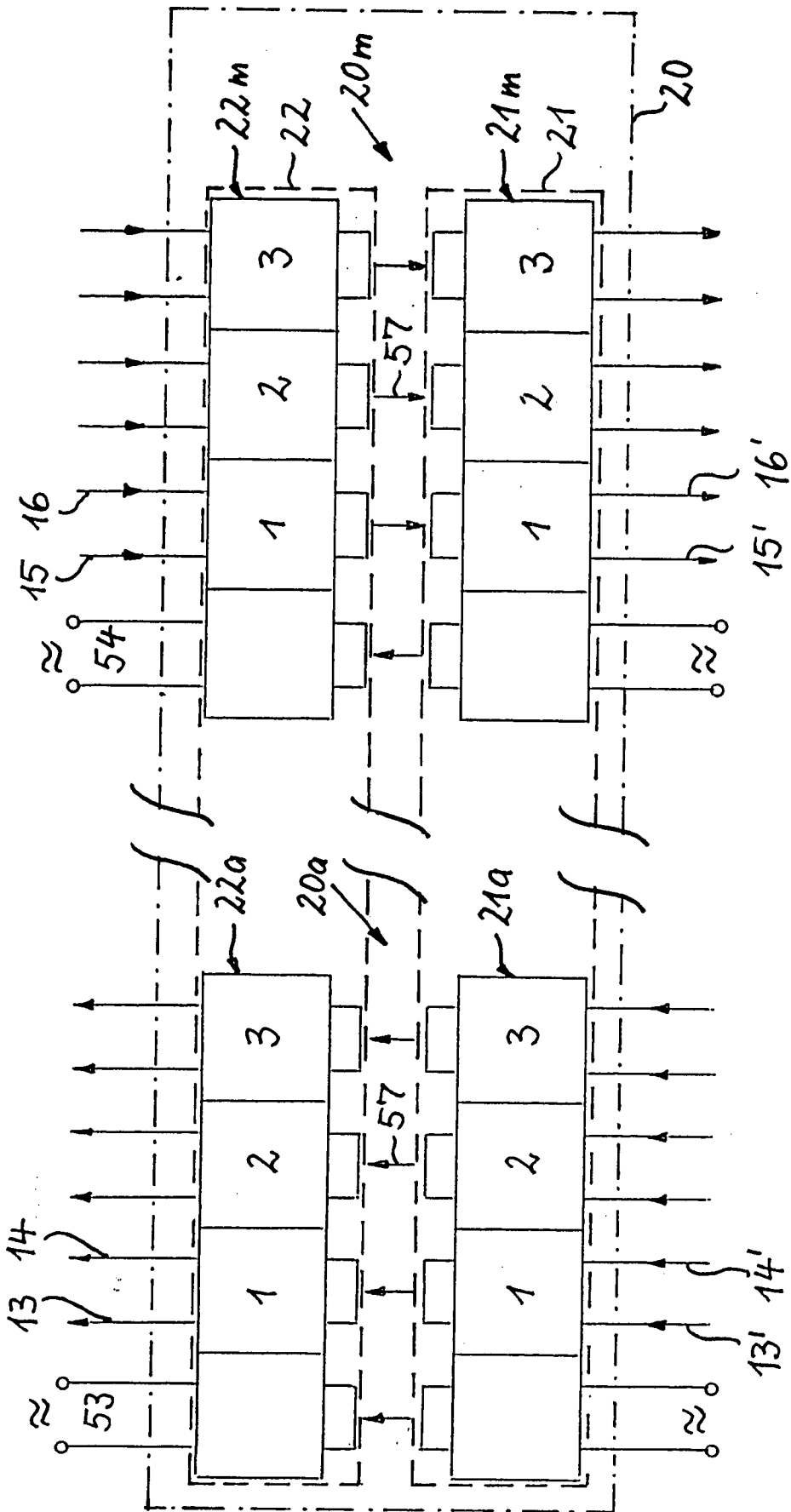


Fig. 8

Fig. 7

Fig. 9

