



(12)

Veröffentlichung

der internationalen Anmeldung mit der

(87) Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2021/152811**

in der deutschen Übersetzung (Art. III § 8 Abs. 2
IntPatÜbkG)

(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2020 006 650.9**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/JP2020/003592**

(86) PCT-Anmeldetag: **31.01.2020**

(87) PCT-Veröffentlichungstag: **05.08.2021**

(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
in deutscher Übersetzung: **24.11.2022**

(51) Int Cl.: **G01N 3/32 (2006.01)**

(71) Anmelder:

**MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION, Tokyo,
JP**

(72) Erfinder:

**Hana, Norihiko, Tokyo, JP; Akiyoshi, Masao,
Tokyo, JP; Amaya, Kenji, Tokyo, JP**

(74) Vertreter:

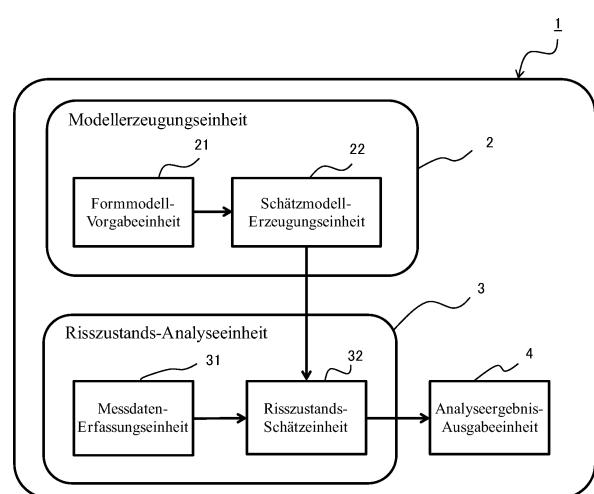
**Meissner Bolte Patentanwälte Rechtsanwälte
Partnerschaft mbB, 80538 München, DE**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **RISSSCHÄTZVORRICHTUNG, FEHLERDIAGNOSEVORRICHTUNG, RISSSCHÄTZVERFAHREN
UNDFEHLERDIAGNOSEVERFAHREN FÜR EINE ROTIERENDE MASCHINE**

(57) Zusammenfassung: Es wird Folgendes angegeben:
eine Formmodell-Vorgabeeinheit (21) zum Vorgeben eines
Formmodells einer zu überprüfenden Zielstruktur (7), auf
die eine externe Kraft aufgebracht wird, einer Risskandida-
tenebene (7fc), in der das Auftreten eines verborgenen Risses
in dem Formmodell erwartet wird, und einer Beobach-
tungsebene (7fo) des Formmodells, eine Schätzmodell-
Erzeugungseinheit (22) zum Erzeugen eines Schätzmo-
dells, das aus einer numerischen Analyse eines Struktu-
ralanalysemodells durch sequentielles Ändern einer Randbe-
dingung der Risskandidatenebene (7fc) in dem aus dem
Formmodell erzeugten Strukturalanalysemodell erhalten
wird, und eine Risszustands-Analyseeinheit (3) zum Schät-
zen einer Position und einer Größe des Risses (9) durch
gleichzeitiges Erlangen einer Verteilung von Last und Verla-
gerung in der Risskandidatenebene (7fc) durch probabilisti-
sche Inferenz mittels Anwendung eines Beobachtungsebene-
nen-Verformungsvektors, der eine Verformung der
Beobachtungsebene (7fo) angibt und aus tatsächlichen
Messwerten der Beobachtungsebene (7fo), dem Schätzmo-
dell und einer latenten Variablen, die das Vorhandensein
oder Nichtvorhandensein des Risses (9) in der Risskandida-
tenebene (7fc) angibt, erhalten wird.



Beschreibung

Technisches Gebiet

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine Riss Schätzvorrichtung, eine Fehlerdiagnosevorrichtung, ein Riesschätzverfahren und ein Fehlerdiagnoseverfahren für eine rotierende Maschine.

Stand der Technik

[0002] Verbogene Risse, die von der Oberfläche einer Rotorstruktur usw. in einer rotierenden Maschine, die für einen Turbinengenerator verwendet wird, nicht zu sehen sind, können im Allgemeinen nicht visuell überprüft werden, und es tritt eine Rissausdehnung auf, ohne bei einer regulären Überprüfung bemerkt zu werden, was die Lebensdauer der Struktur beeinträchtigt. Somit ist das Detektieren von verborgenen Rissen von der Oberfläche aus ein wichtiges Thema für die Überprüfung von Strukturen geworden, und es gibt Verfahren zum zerstörungsfreien Überprüfen von verborgenen Rissen, wie z. B. Dehnungsmessungen an der Oberfläche einer Struktur, Ultraschallprüfung (siehe z. B. Patentdokument 1), Röntgenprüfung usw.

[0003] Eine Vorrichtung zur Dehnungsmessung an der Oberfläche einer Struktur lässt sich leichter verkleinern als diejenigen anderer zerstörungsfreier Überprüfungsverfahren und kann mit geringeren Kosten umgesetzt werden. Da der Riss selbst jedoch nicht direkt gemessen wird, muss der verborgene Riss, der von der Oberfläche aus nicht sichtbar ist, durch eine inverse Analyse unter Verwendung einer Relation zwischen der Dehnung an der Oberfläche der Struktur und dem Riss geschätzt werden.

Literaturverzeichnis

Patentdokument

[0004] Patentdokument 1: Japanische Patentanmeldungs-Offenlegungsschrift JP 2012- 159 477 A (Absätze 0013 bis 0031, **Fig. 1** bis **Fig. 8**)

Kurzdarstellung der Erfindung

Mit der Erfindung zu lösende Probleme

[0005] Als ein Verfahren zum Schätzen eines von der Oberfläche aus verborgenen Risses gibt es ein Verfahren, bei dem eine Relation zwischen dem Riss und einer Formänderung der Oberfläche im Voraus als Lerndaten aufgestellt wird und eine Position und eine Größe des Risses aus den Daten geschätzt werden. Diese Schätzung soll jedoch ein inverses Problem lösen, bei dem es sich um ein schlecht gestelltes Problem handelt. Im Fall des schlecht gestellten Problems ist die Schätzung

eines verborgenen Risses unter Verwendung der Methode der kleinsten Quadrate aus den Messdaten und den Lerndaten weniger genau, und es kann nicht bestimmt werden, ob der Betrieb der Ausrüstung oder die Einsatzdauer beendet werden soll oder nicht.

[0006] Die vorliegende Anmeldung offenbart eine Technik zum Lösen der vorstehend genannten Probleme und ihre Aufgabe ist es, eine Größe und eine Position eines Risses aus einer Änderung der Form der Oberfläche genau zu schätzen.

Mittel zur Lösung der Probleme

[0007] Eine in der vorliegenden Anmeldung offenbare Riesschätzvorrichtung weist Folgendes auf: eine Formmodell-Vorgabeeinheit zum Vorgeben eines Formmodells einer zu überprüfenden Zielstruktur, auf die eine externe Kraft aufgebracht wird, einer Risskandidatenebene, in der das Auftreten eines von Oberflächen des Formmodells aus verborgenen Risses erwartet wird, und einer Beobachtungsebene, die als eine der Oberflächen des Formmodells zu messen ist; eine Schätzmodell-Erzeugungseinheit zum Erzeugen einer Matrix zum Schätzen eines Zustands der Risskandidatenebene aus einem Zustand der Beobachtungsebene unter Verwendung von Matrizen zum Zuordnen des Zustands der Risskandidatenebene zu dem Zustand der Beobachtungsebene, wobei die Matrizen durch eine numerische Analyse eines aus dem Formmodell erzeugten Strukturanalysemodells erhalten werden, und eine Risszustands-Analyseeinheit zum Schätzen einer Position und einer Größe des Risses durch gleichzeitiges Erlangen der Verteilung von Last und Verlagerung in der Risskandidatenebene durch probabilistische Inferenz mittels Anwendung eines Beobachtungsebenen-Verformungsvektors, der eine Verformung der Beobachtungsebene angibt und der aus tatsächlichen Messwerten der Beobachtungsebene, einem Schätzmodell und einer latenten Variablen, die das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein des Risses in der Risskandidatenebene angibt, erhalten wird.

[0008] Ein in der vorliegenden Anmeldung offenbartes Riesschätzverfahren weist Folgendes auf: einen Formmodell-Vorgabeschritt zum Vorgeben eines Formmodells einer zu überprüfenden Zielstruktur, auf die eine externe Kraft aufgebracht wird, einer Risskandidatenebene, in der das Auftreten eines Risses in einem von Oberflächen des Formmodells aus verborgenen Bereich erwartet wird, und einer Beobachtungsebene, die als eine der Oberflächen des Formmodells zu messen ist; einen Schätzmodell-Erzeugungsschritt zum Erzeugen der Matrix zum Schätzen eines Zustands der Risskandidatenebene aus einem Zustand der Beobachtungsebene unter Verwendung der Matrizen zum Zuordnen des

Zustands der Risskandidatenebene zu dem Zustand der Beobachtungsebene, wobei die Matrizen durch eine numerische Analyse eines aus dem Formmodell erzeugten Strukturanalysemodells erhalten werden; einen Schritt zum Empfangen tatsächlicher Messwerte der Beobachtungsebene und einen Risszustands-Analyseschritt zum Schätzen einer Position und einer Größe des Risses durch gleichzeitiges Erlangen der Verteilung von Last und Verlagerung in der Risskandidatenebene durch probabilistische Inferenz mittels Anwendung des Beobachtungsebenen-Verformungsvektors, der die Verformung der Beobachtungsebene angibt und der aus den Messwerten, dem Schätzmodell und der latenten Variablen, die das Vorhandensein oder das Nichtvorhandensein des Risses in der Risskandidatenebene angibt, erhalten wird.

Wirkung der Erfindung

[0009] Mit der Risschätzvorrichtung bzw. dem Risschätzverfahren, die in der vorliegenden Anmeldung offenbart sind, kann, da bei der inversen Analyse die latente Variable verwendet wird, die das Verhalten von Verlagerung und Last einer Ebene angibt, in der ein Riss auftritt, der Zustand eines verborgenen Risses aus der Formänderung der Oberfläche genau geschätzt werden.

Figurenliste

[0010] Die Zeichnungen zeigen in:

Fig. 1 ein Blockdiagramm zur Erläuterung einer Konfiguration einer Risschätzvorrichtung gemäß Ausführungsform 1.

Fig. 2 ein Ablaufdiagramm, das den Betrieb der Risschätzvorrichtung und eines Risschätzverfahrens gemäß Ausführungsform 1 zeigt.

Fig. 3A und **Fig. 3B** perspektivische Ansichten, die einen Zusammenhang zwischen einer Risskandidatenebene, in der das Auftreten eines Risses angenommen wird, und einer Beobachtungsebene, wenn eine Zuglast auf eine flache Platte aufgebracht wird bzw. wenn ein Biegemoment aufgebracht wird, beim Betrieb der Risschätzvorrichtung und bei dem Risschätzverfahren gemäß Ausführungsform 1 zeigen.

Fig. 4A und **Fig. 4B** schematische Ansichten, die einen Zustand, in dem die Risskandidatenebene in Elemente aufgeteilt ist, bzw. einen Zustand, in dem die Beobachtungsebene in Elemente aufgeteilt ist, beim Betrieb der Risschätzvorrichtung und bei dem Risschätzverfahren gemäß Ausführungsform 1 zeigen.

Fig. 5 ein Ablaufdiagramm, das den Betrieb einer Schätzmodell-Erzeugungseinheit der Risschätzvorrichtung bzw. die Schätzmodell-

Erzeugungsschritte gemäß Ausführungsform 1 zeigt.

Fig. 6 ein Diagramm, das eine Speicherstruktur zum Speichern von Verlagerungsinformation der Risskandidatenebene in der Risschätzvorrichtung bzw. dem Risschätzverfahren gemäß Ausführungsform 1 zeigt.

Fig. 7 ein Diagramm, das eine Speicherstruktur zum Speichern von Verformungsinformation der Beobachtungsebene in der Risschätzvorrichtung bzw. dem Risschätzverfahren gemäß Ausführungsform 1 zeigt.

Fig. 8 ein Diagramm, das eine Speicherstruktur zum Speichern von Lastinformation der Risskandidatenebene in der Risschätzvorrichtung bzw. dem Risschätzverfahren gemäß Ausführungsform 1 zeigt.

Fig. 9 ein Ablaufdiagramm, das den Betrieb einer Risszustands-Schätzeinheit der Risschätzvorrichtung bzw. die Risszustands-Schätzschritte gemäß Ausführungsform 1 zeigt.

Fig. 10 ein Diagramm, das ein Beispiel zeigt, in dem ein Teil zum Ausführen von einer Berechnungsverarbeitung der Risschätzvorrichtung oder zumindest ein Teil der Funktionen in dem Risschätzverfahren und einem Fehlerdiagnoseverfahren für eine rotierende Maschine gemäß Ausführungsformen, einschließlich Ausführungsform 1, durch eine Software umgesetzt wird.

Fig. 11A und **Fig. 11B** eine perspektivische Ansicht eines Zylinders unter Angabe eines Koordinatensystems, wenn ein Innendruck auf den Zylinder aufgebracht wird, bzw. eine Draufsicht darauf mit dem aufgebrachten Innendruck während des Betriebs der Risschätzvorrichtung, des Risschätzverfahrens oder des Fehlerdiagnoseverfahrens für eine rotierende Maschine gemäß Ausführungsformen einschließlich Ausführungsform 1.

Fig. 12 ein Diagramm, das eine Speicherstruktur zum Speichern von Information über eine Verlagerungsänderung einer Beobachtungsebene in einer Risschätzvorrichtung bzw. einem Risschätzverfahren gemäß Ausführungsform 2 zeigt.

Fig. 13 ein Diagramm, das eine Speicherstruktur zum Speichern von Information über eine Winkeländerung der Beobachtungsebene in der Risschätzvorrichtung oder dem Risschätzverfahren gemäß Ausführungsform 2 zeigt.

Fig. 14 ein Blockdiagramm zur Erläuterung einer Konfiguration einer Risschätzvorrichtung gemäß Ausführungsform 3.

Fig. 15 ein Ablaufdiagramm, das den Betrieb der Risschätzvorrichtung bzw. eines Risschätzverfahrens gemäß Ausführungsform 3 zeigt.

Fig. 16 ein Diagramm, das eine Gesamtkonfiguration einer Fehlerdiagnosevorrichtung gemäß Ausführungsform 4 zeigt.

Fig. 17 ein Ablaufdiagramm, das einen zusätzlichen Betrieb einer Fehlerdiagnosevorrichtung oder zusätzliche Schritte eines Fehlerdiagnoseverfahren für eine rotierende Maschine gemäß Ausführungsform 4 zeigt.

Fig. 18 ein Ablaufdiagramm, das einen zusätzlichen Betrieb einer Fehlerdiagnosevorrichtung oder zusätzliche Schritte eines Fehlerdiagnoseverfahren für eine rotierende Maschine gemäß Ausführungsform 5 zeigt.

Ausführungsformen der Erfindung

[0011] Nachstehend werden eine Risschätzvorrichtung, ein Risschätzverfahren und ein Überprüfungsverfahren einer rotierenden Maschine gemäß der jeweiligen Ausführungsform der vorliegenden Anmeldung mit Bezugnahme auf die Zeichnungen beschrieben, in denen die gleichen oder sich entsprechende Elemente und Teile mit den gleichen Bezugszeichen bezeichnet sind.

Ausführungsform 1

[0012] **Fig. 1** bis **Fig. 11A** und **Fig. 11B** sind Blockdiagramme zur Erläuterung einer Konfiguration und eines Betriebs einer Risschätzvorrichtung und eines Risschätzverfahrens gemäß Ausführungsform 1. **Fig. 1** ist ein Blockdiagramm zur Erläuterung der Konfiguration der Risschätzvorrichtung und **Fig. 2** ist ein Ablaufdiagramm, das den Betrieb der Risschätzvorrichtung bzw. des Risschätzverfahrens zeigt. **Fig. 3A** ist eine perspektivische Ansicht, die eine Relation zwischen einer Ebene, in der das Auftreten eines Risses angenommen wird (Risskandidatenebene), und einer Beobachtungsebene zeigt, in der eine Messung von außen möglich ist, wenn eine Zuglast auf eine flache Platte aufgebracht wird, und **Fig. 3B** ist eine perspektivische Ansicht, die eine Relation zwischen der Risskandidatenebene und der Beobachtungsebene zeigt, wenn ein Biegemoment auf die flache Platte aufgebracht wird. **Fig. 4A** ist eine schematische Ansicht, die einen Zustand zeigt, in dem die Risskandidatenebene für eine Strukturanalyse in Elemente in einem Rastermuster aufgeteilt ist, und **Fig. 4B** ist eine schematische Ansicht, die einen Zustand zeigt, in dem die Beobachtungsebene in Elemente aufgeteilt ist.

[0013] **Fig. 5** ist ein Ablaufdiagramm, das den Betrieb einer Schätzmodell-Erzeugungseinheit, die einen Teil der Risschätzvorrichtung bildet, bzw. die

Schätzmodell-Erzeugungsschritte zeigt. **Fig. 6** bis **Fig. 8** zeigen Speicherstrukturen, die gespeichert werden, wenn ein in **Fig. 5** beschriebenes Schätzmodell erzeugt wird. **Fig. 6** zeigt eine Speicherstruktur zum Speichern von Verlagerungsinformation der Risskandidatenebene, **Fig. 7** zeigt eine Speicherstruktur zum Speichern von Verformungsinformation der Beobachtungsebene und **Fig. 8** zeigt eine Speicherstruktur zum Speichern von Lastinformation der Risskandidatenebene.

[0014] **Fig. 9** ist ein Ablaufdiagramm, das den Betrieb einer Risszustands-Schätzeinheit, die einen Teil der Risschätzvorrichtung bildet, bzw. die Risszustands-Schätzschritte zeigt. **Fig. 10** ist ein Diagramm, das ein Beispiel für Hardware zeigt, in der ein Teil zum Ausführen von Berechnungsverarbeitung der Risschätzvorrichtung oder zumindest ein Teil der Funktionen in dem Risschätzverfahren gemäß Ausführungsform 1 oder den folgenden Ausführungsformen durch eine Software umgesetzt wird.

Fig. 11A ist eine perspektivische Ansicht eines Zylinders unter Angabe eines Koordinatensystems, wenn ein Innendruck auf den Zylinder aufgebracht wird, und **Fig. 11B** ist eine Draufsicht darauf mit dem aufgebrachten Innendruck in der Risschätzvorrichtung bzw. dem Risschätzverfahren.

[0015] In der Risschätzvorrichtung, dem Risschätzverfahren und dem Überprüfungsverfahren einer rotierenden Maschine gemäß der jeweiligen Ausführungsformen, einschließlich der vorliegenden Ausführungsform, wird das Verhalten von Verlagerung und Last in einer Ebene, in der ein Riss auftritt, als Vorschauinformation zum Lösen eines schlecht gestellten Problems verwendet. Somit können die Position und die Größe eines verborgenen Risses aus einer Formänderung einer Oberfläche genau geschätzt werden. Dies wird nachstehend ausführlich beschrieben.

[0016] Eine Risschätzvorrichtung 1 weist, wie in **Fig. 1** gezeigt, Folgendes auf: eine Modellerzeugungseinheit 2, die Lerndaten berechnet und ein Schätzmodell erzeugt, eine Risszustands-Analyseeinheit 3, die einen Zustand eines Risses aus Messwerten der Oberfläche eines Prüfziels unter Verwendung des erzeugten Schätzmodells analysiert, und eine Analyseergebnis-Ausgabeeinheit 4, die ein Analyseergebnis ausgibt.

[0017] Die Modellerzeugungseinheit 2 ist mit einer Formmodell-Vorgabeeinheit 21 zum Vorgeben einer Lernbedingung und einer Schätzmodell-Erzeugungseinheit 22 zum Erzeugen eines Schätzmodells, das zum Schätzen eines Risses auf der Grundlage der vorgegebenen Lernbedingung verwendet wird, und zum Ausgeben des erzeugten Schätzmodells an die Risszustands-Analyseeinheit 3 ausgetragen. Die Risszustands-Analyseeinheit 3 weist eine

Messdaten-Erfassungseinheit 31 zum Erfassen von Messdaten, die den Oberflächenzustand des Prüfziels angeben, wie z. B. Dehnung und Verlagerung, und eine Risszustands-Schätzeinheit 32 zum Anwenden der Messdaten auf das Schätzmodell, Berechnen einer Position und einer Größe eines von der Oberfläche aus verborgenen Risses und Ausgeben des Ergebnisses an die Analyseergebnis-Ausgabeeinheit 4 auf.

[0018] Die Formmodell-Vorgabeeinheit 21 hat die Funktion, als eine Lernbedingung einen Bereich zu bestimmen, in dem der Riss überprüft wird, ein Formmodell für den zu überprüfenden Bereich zu erzeugen, eine Form eines angenommenen Risses zu bestimmen und das Ergebnis an die Schätzmodell-Erzeugungseinheit 22 auszugeben. Die Schätzmodell-Erzeugungseinheit 22 ändert sequenziell die Form und Position des angenommenen Risses, führt eine numerische Analyse an einem aus dem Formmodell erzeugten Strukturanalysemodell durch, speichert die Verlagerung und die Last der Risskandidatenebene sowie die Verformung der Beobachtungsebene als Vektoren in einer primären Speichereinheit und stellt das Analyseergebnis der gesamten Rissformen dar, die als eine Matrix gespeichert werden.

[0019] Dann wird unter Verwendung der linearen Relation zwischen der Verlagerung der Risskandidatenebene und der Verformung der Beobachtungsebene eine Vorwärtskoeffizientenmatrix zwischen einer Verlagerungsmatrix des Risses und einer Verformungsmatrix der Beobachtungsebene erhalten. Ferner hat sie die Funktion, eine Steifigkeitsmatrix zwischen der Verlagerungsmatrix des Risses und einer Lastmatrix des Risses durch Verwendung der linearen Relation zwischen der Verlagerung und der Last der Risskandidatenebene zu erhalten und die erhaltene Steifigkeitsmatrix an die Risszustands-Schätzeinheit 32 auszugeben.

[0020] Die Messdaten-Erfassungseinheit 31 erfasst Messdaten zu der Zeit, zu der die Verformung der Beobachtungsebene einer Zielstruktur als Prüfziel gemessen wird. Die Risszustands-Schätzeinheit 32 schätzt die Größe und die Position eines Risses aus der Verlagerung der Risskandidatenebene durch Verwendung der Verlagerungsmatrix, die aus den von der Messdaten-Erfassungseinheit 31 ausgegebenen Messdaten berechnet wird, sowie der Lastmatrix und der Steifigkeitsmatrix des Risses, die als Schätzmodell ausgegeben werden. Zu dieser Zeit werden die Verlagerung und die Last gleichzeitig durch Joint estimation-Maximum A Posteriori(JE-MAP)-Schätzung durch Verwendung einer latenten Variablen geschätzt, die die Spärlichkeit der Verlagerung und der Last in der Risskandidatenebene zeigt, wobei die Verlagerung und die Last Reziprozität aufweisen. Ferner wird unter Verwendung der geschätz-

ten Rissgröße bestimmt, ob die Struktur verwendet werden kann oder nicht, es wird die verbleibende Einsatzdauer berechnet, und es wird dies an die Analyseergebnis-Ausgabeeinheit 4 ausgegeben.

[0021] Die Analyseergebnis-Ausgabeeinheit 4 gibt die geschätzte Größe und Position des Risses auf der Grundlage des von der Risszustands-Schätzeinheit 32 ausgegebenen Analyseergebnisses aus. Ferner wird als ein Überprüfungsergebnis für eine Ausrüstung mit einer Struktur wie einer rotierenden Maschine eine Bestimmung darüber, ob die Ausrüstung weiterhin verwendet werden kann oder nicht, eine verbleibende Einsatzdauer der Ausrüstung und dergleichen ausgegeben.

[0022] Der Betrieb gemäß der vorstehend beschriebenen Konfiguration wird mit Bezugnahme auf das Ablaufdiagramm gemäß **Fig. 2** beschrieben. Zuerst führt die Modellerzeugungseinheit 2 eine Lernphase aus (Schritte S2110 bis S2200), in der Bedingungen für die Lerndaten bestimmt werden, Lerndaten gemäß den bestimmten Bedingungen erzeugt werden und ein Schätzmodell, das zum Schätzen des Risszustands verwendet wird, auf der Grundlage der erzeugten Lerndaten erzeugt wird. Dann führt die Risszustands-Analyseeinheit 3 auf der Grundlage des erzeugten Schätzmodells eine Risszustands-Analysephase (Schritte S3100 bis S3200) aus, in der der Risszustand aus den Messdaten des Oberflächenzustands des Prüfziels geschätzt wird. Schließlich führt die Analyseergebnis-Ausgabeeinheit 4 eine Ergebnisausgabephase (Schritt S4000) zum Anzeigen (Ausgeben) des Analyseergebnisses aus.

Lernphase

[0023] In der Lernphase wird für die Bedingungen für die Lerndaten ein Prüfziel-Bestimmungsschritt (Schritt S2110) zum Bestimmen einer Struktur für die Überprüfung des Vorhandenseins oder Nichtvorhandenseins eines Risses, eines von der Oberfläche der Struktur aus verborgenen Bereichs für die Schätzung des Vorhandenseins oder Nichtvorhandenseins des Auftretens eines Risses und eines Bereichs der Oberfläche der Struktur, der für die Schätzung des Vorhandenseins oder Nichtvorhandenseins des Auftretens eines Risses zu messen ist, ausgeführt. Beispielsweise wird, wie in **Fig. 3A** gezeigt, eine Zielstruktur 7 einer flachen Platte als Struktur bestimmt, und es wird eine Risskandidatenebene 7fc als ein Ziel für die Schätzung des Auftretens eines Risses 9 bestimmt. Dann wird eine Region in der Nähe der Risskandidatenebene 7fc in der Oberfläche der Zielstruktur 7 als eine Beobachtungsebene 7fo zum Messen von Dehnungen als eine zu messende Oberfläche bestimmt.

[0024] In der Annahme eines Zustands, in dem zur Zeit der Überprüfung eine Zuglast L_t auf die Zielstruktur 7 aufgebracht wird, wird dann ein Formmodell eines Prüfbereichs als die gesamte oder ein Teil der Zielstruktur 7 vorgegeben (Schritt S2120). Wenn die gesamte Zielstruktur 7 modelliert wird, werden dabei die Einschränkung der auf die Zielstruktur 7 aufgebrachten Verformung, die Temperaturverteilung und dergleichen zusätzlich zu der Last als eine Randbedingung für die Strukturanalyse bestätigt. Andererseits wird, wenn ein Teil davon als Modell verwendet wird, die Verteilung der Verlagerung oder Last in der ausgeschnittenen Oberfläche in der Strukturanalyse als Randbedingung berücksichtigt.

[0025] Es sei angemerkt, dass z. B. ein Biegemoment M_b , wie in **Fig. 3B** gezeigt, auf die Zielstruktur 7 aufgebracht werden kann und keine Einschränkung auf die vorstehend beschriebene Zuglast L_t besteht. Dann wird ein Prüfziel bestimmt und auf die gleiche Weise ein Formmodell vorgegeben. Zuerst wird, wie in **Fig. 4A** gezeigt, die Risskandidatenebene 7fc in dem Formmodell in ein Rastermuster unterteilt und in eine Mehrzahl von Elementen Efc aufgeteilt. In **Fig. 4A** ist die Risskandidatenebene 7fc in der x-Richtung in n Teile und in der y-Richtung in m Teile aufgeteilt, und es sind die Positionen der Schnittpunkte des Rasters, die Teilungslinien aufweisen, durch Koordinaten (i, j) angegeben. Somit werden die Koordinaten (i, j) durch Zahlen von $(0, 0)$ bis (n, m) angegeben.

[0026] Definiert man einen Punkt der Schnittpunkte des Rasters als einen Riss 9, wird der Riss 9 an allen Schnittpunkten (Rasterpunkten: Koordinaten (i, j)) sequenziell bewegt. Die Reihenfolge der Bewegung wird im Schritt S2120 bestimmt. Für jede Strukturanalyse, bei der die Randbedingung des Risses 9 der Risskandidatenebene 7fc geändert wird, werden die an den Rasterpunkten der Risskandidatenebene 7fc erhaltene Verlagerung und Last in der analysierten Reihenfolge gespeichert. Ferner sind die zu speichernden Komponenten der Verlagerung die größten Komponenten der Verlagerung in der Risskandidatenebene 7fc in Bezug auf die Zuglast L_t oder das Biegemoment M_b , wie in **Fig. 3A** oder **Fig. 3B** gezeigt.

[0027] Als Nächstes wird, wie in **Fig. 4B** gezeigt, die Beobachtungsebene 7fo bestimmt, die ein Messziel zum Schätzen des Risses 9 und eine Region zum Erfassen von Verformungsinformation der Oberfläche der Zielstruktur 7 ist. In der vorliegenden Ausführungsform wird die Dehnung als Verformung der Oberfläche gemessen. Die Beobachtungsebene 7fo wird auch in ein Rastermuster unterteilt und in eine Mehrzahl von Elementen Efo aufgeteilt, ähnlich wie die Risskandidatenebene 7fc. In **Fig. 4B** ist die Beobachtungsebene 7fo in der x-Richtung in n Teile und in der z-Richtung in p Teile aufgeteilt, und es sind

die Positionen der Schnittpunkte des Rasters, die die Teilungslinien aufweisen, durch die Koordinaten $(k, 1)$ angegeben. Somit werden die Koordinaten $(k, 1)$ durch Zahlen von $(0, 0)$ bis (n, p) angegeben. Es sei angemerkt, dass die Beobachtungsebene 7fo als ein Teil in einer Reihe von verbundenen Ebenen oder als eine Gruppe einer Mehrzahl von Regionen bestimmt werden kann oder derart bestimmt werden kann, dass eine gewisse Region aus Punkten gebildet ist.

[0028] Dann wird für jede Strukturanalyse, in der die Randbedingung des Risses 9 in der Risskandidatenebene 7fc geändert wird, die an einem Rasterpunkt der Beobachtungsebene 7fo erhaltene Dehnung in der analysierten Reihenfolge gespeichert. Die Reihenfolge des Speicherns wird auch im Schritt S2120 bestimmt. Ferner sind zu speichernde Komponenten der Dehnung die größten Komponenten der Dehnung in Bezug auf die Zuglast L_t oder das Biegemoment M_b , wie in **Fig. 3A** oder **Fig. 3B** dargestellt. Ferner können als Dehnung, wenn die Last oder das Moment auf zwei Achsen (z. B. die z-Achse und die y-Achse) aufgebracht wird, die Hauptdehnung, die Tresca-Vergleichsdehnung (auf der Grundlage des Fließkriteriums) und die Mises-Vergleichsdehnung (auf der Grundlage des Fließkriteriums) verwendet werden, die Parameter zur Bewertung der Dehnung in einem mehrachsigen Spannungsfeld sind, das durch die Wirkung einer mehrachsigen Last oder einer Struktur bewirkt wird.

[0029] Wenn das Formmodell in den Schritten S2110 und S2120 vorgegeben wird, so wird unter Verwendung der vorgegebenen Bedingungen ein Schätzmodell-Erzeugungsschritt S2200 zum automatischen Erzeugen von Lerndaten und Erlangen einer aus den Lerndaten erzeugten inversen Matrix ausgeführt. Es sei angemerkt, dass die Formmodell-Vorgabeeinheit 21 den Prüfziel-Bestimmungsschritt S2110 und den Formmodell-Vorgabeschritt S2120, wie vorstehend beschrieben, ausführt und die Schätzmodell-Erzeugungseinheit 22 den nachstehend beschriebenen Schätzmodell-Erzeugungsschritt S2200 ausführt.

[0030] Ein detaillierter Ablauf des Schätzmodell-Erzeugungsschritts S2200 wird mit Bezugnahme auf das Ablaufdiagramm in **Fig. 5** beschrieben. Zuerst werden das Formmodell, das die Risskandidatenebene 7fc und die Beobachtungsebene 7fo aufweist, die Form und die Position des Risses 9, die zum Lernen angenommen werden sollen, und eine Lernreihenfolge, wie in den Schritten S2110 und S2120 bestimmt, ausgelesen (Schritt S2210). Als Nächstes wird aus dem Formmodell ein Strukturanalysemmodell erzeugt (Schritt S2220). Ferner werden die Risskandidatenebene 7fc und die Beobachtungsebene 7fo in dem erzeugten Strukturanalysemmodell in eine Mehrzahl von Elementen Efc bzw. Efo aufgeteilt, es wird eine Randbedin-

gung, in der kein Riss 9 auftritt, gegeben, und es werden die Verlagerung der Risskandidatenebene 7fc und die Verformung der Beobachtungsebene 7fo in der Strukturanalyse berechnet (Schritt S2230).

[0031] Als Nächstes wird die Risskandidatenebene 7fc des StrukturanalysemodeLLs in eine Mehrzahl der Elemente Efc aufgeteilt, und es wird eine Randbedingung gegeben, bei der jeder in den Elementen Efc enthaltene Knoten als ein Riss 9 vorgegeben wird, um die Verformung der Beobachtungsebene 7fo durch die Strukturanalyse zu berechnen (Schritt S2240). Dann werden für jede Bedingung des als Riss 9 definierten Knotens Vektoren erzeugt durch Anordnen der Differenzen in der Verlagerung und der Differenzen in der Last für alle Knoten der Risskandidatenebene 7fc vor und nach der Erzeugung des Risses 9 in der Reihenfolge, in der sie gelernt werden sollen. Ferner werden für alle Knoten der Beobachtungsebene 7fo Vektoren erzeugt durch Anordnen der Differenzen in der Verformung vor und nach der Erzeugung des Risses 9 in der Reihenfolge, in der sie gelernt werden sollen (Schritt S2250), und es werden die erzeugten Vektoren in der primären Speichereinheit gespeichert (Schritt S2260).

[0032] Dann wird bestimmt, ob die Strukturanalyse für einen Knoten im Risszustand für alle Knoten der Risskandidatenebene 7fc abgeschlossen ist oder nicht (Schritt S2270). Wenn sie nicht abgeschlossen ist („Nein“ im Schritt S2270), wird, um für alle Knoten der Risskandidatenebene 7fc den Risszustand vorzugeben, ein Knoten zu dem Risszustand geändert (Schritt S2280), und es kehrt der Prozess zum Schritt S2240 zurück, um die Strukturanalyse durchzuführen, und es wird dann der Prozess zum Speichern der Vektoren in der primären Speichereinheit erneut ausgeführt.

[0033] Andererseits fährt der Prozess, wenn die Strukturanalyse für einen Knoten im Risszustand für alle Knoten der Risskandidatenebene 7fc abgeschlossen ist („Ja“ im Schritt S2270), mit Schritt S2290 fort. Im Schritt S2290 wird eine Rissebenenmatrix durch Anordnen der in der primären Speichereinheit gespeicherten Verlagerungsvektoren der Risskandidatenebene 7fc in der Reihenfolge des Lesens zum Lernen erzeugt, und es wird eine Beobachtungsebenenmatrix aus den Vektoren der Verformung aller in der primären Speichereinheit gespeicherten Knoten in der Beobachtungsebene 7fo erzeugt (Schritt S2290).

[0034] Insbesondere ist, wie in **Fig. 6** gezeigt, ein Spaltenvektor $\Delta(0,0)$ der Verlagerungsänderung der Risskandidatenebene 7fc ein solcher, dass die Verlagerungsdaten der Knoten der Risskandidatenebene 7fc in der Reihenfolge angeordnet werden, die in dem Formmodell-Vorgabeschritt S2120

bestimmt worden ist. $\delta(i,j)$ in dem Spaltenvektor $\Delta(0,0)$ gibt die Verlagerung des Knotens an den Koordinaten (i, j) in der Risskandidatenebene 7fc an. Ferner wird der Spaltenvektor von $\Delta(i,j)$ mit den Koordinaten (i, j) in der Risskandidatenebene 7fc als Information über die Position (Koordinaten) zum Lernen erzeugt, an der der Riss 9 auftreten gelassen werden soll, und es werden Komponenten in dem Spaltenvektor mit $\delta_{i,j}(i,j)$ bezeichnet.

[0035] $\delta_{i,j}(i,j)$ gibt die Verlagerung an dem Knoten der Koordinaten (i, j) in der Risskandidatenebene 7fc in einem Ergebnis der Strukturanalyse an, in dem der Knoten der Koordinaten (i, j) in der Risskandidatenebene 7fc als im Risszustand befindlich betrachtet wird. Dieser Spaltenvektor wird in Zeilen in der Reihenfolge der Position angeordnet, an der der Riss 9 auftreffe, wie in dem Formmodell-Vorgabeschritt S2120 bestimmt, um die Rissebenenmatrix Δ_{crack_diff} zu erzeugen.

[0036] Als Nächstes ist, wie in **Fig. 7** gezeigt, ein Spaltenvektor $E(0,0)$ der Dehnungsänderung der Beobachtungsebene 7fo auf ähnliche Weise auch ein solcher, dass die Dehnungsdaten der Knoten der Beobachtungsebene 7fo in der Reihenfolge angeordnet werden, die in dem Formmodell-Vorgabeschritt S2120 bestimmt worden ist. $\epsilon(k,1)$ in dem Spaltenvektor $E(0,0)$ gibt die Dehnung an dem Knoten der Koordinaten (k, 1) in der Beobachtungsebene 7fo an. Ferner wird der Spaltenvektor von $E(i, j)$ mit den Koordinaten (i, j) in der Risskandidatenebene 7fc als Information über die Position (Koordinaten) zum Lernen erzeugt, an der der Riss auftreten gelassen werden soll, und es werden Komponenten in dem Spaltenvektor mit $\epsilon_{i,j}(k,l)$ bezeichnet.

[0037] $\epsilon_{i,j}(k,l)$ gibt die Dehnung an dem Knoten der Koordinaten (k, 1) in der Risskandidatenebene 7fc in einem Ergebnis der Strukturanalyse an, in dem der Knoten der Koordinaten (i, j) in der Risskandidatenebene 7fc als im Risszustand befindlich betrachtet wird. Dieser Spaltenvektor wird in Zeilen in der Reihenfolge der Position angeordnet, an der der Riss 9 auftreffe, wie in dem Formmodell-Vorgabeschritt S2120 bestimmt, um eine Beobachtungsebenenmatrix $E_{measure}$ zu erzeugen.

[0038] Wenn die Rissebenenmatrix Δ_{crack_diff} und die Beobachtungsebenenmatrix $E_{measure}$ auf diese Weise erzeugt werden, wird unter Verwendung der linearen Relation zwischen der Verlagerung der Risskandidatenebene 7fc und der Verformung aller Knoten in der Beobachtungsebene 7fo eine Vorwärtskoeffizientenmatrix D zum Abbilden von der Rissebenenmatrix auf die Beobachtungsebenenmatrix unter Verwendung von Gleichung (1) definiert. Dann wird durch Multiplikation beider Elemente der Gleichung (1) mit der inversen Matrix $\Delta_{crack_diff}^{-1}$ der Rissebenenmatrix Δ_{crack_diff} von der rechten Seite,

wie in Gleichung (2) gezeigt, die Vorwärtskoeffizientenmatrix D aus der Rissebenenmatrix $\Delta_{\text{crack_diff}}$ und der Beobachtungsebenenmatrix E_{measure} erzeugt, wie in Gleichung (3) gezeigt (Schritt S2300).

$$D\Delta_{\text{crack_diff}} = E_{\text{measure}} \quad (1)$$

$$D\Delta_{\text{crack_diff}} [\Delta_{\text{crack_diff}}]^{-1} = E_{\text{measure}} [\Delta_{\text{crack_diff}}]^{-1} \quad (2)$$

$$D = E_{\text{measure}} [\Delta_{\text{crack_diff}}]^{-1} \quad (3)$$

[0039] Als Nächstes wird ein Lastvektor der Risskandidatenebene 7fc, der in der primären Speicher- einheit gespeichert wird, in der Reihenfolge des Lernens angeordnet, und es wird eine Lastmatrix der Risskandidatenebene 7fc erzeugt (Schritt S2310). Wie in **Fig. 8** gezeigt, ist ein Spaltenvektor $Z(0,0)$ der Laständerung der Risskandidatenebene 7fc auch ein solcher, dass die Lastdaten der Knoten der Risskandidatenebene 7fc in der Reihenfolge angeordnet werden, die in dem Formmodell-Vorgabeschritt S2120 bestimmt worden ist. $\zeta_{i,j}$ in dem Spaltenvektor $Z(0,0)$ gibt die Last an dem Knoten der Koordinaten (i, j) in der Risskandidatenebene 7fc an. Ferner wird der Spaltenvektor der Koordinaten (i, j) mit den Koordinaten (i, j) in der Risskandidatenebene 7fc als Information über die Position (Koordinaten) zum Lernen erzeugt, an der der Riss 9 auftreten gelassen werden soll, und es werden Komponenten in dem Spaltenvektor mit $\zeta_{i,j}(i,j)$ bezeichnet.

[0040] $\zeta_{i,j}(i,j)$ gibt die Last (Reaktionskraft) an dem Knoten an der Position der Koordinaten (i, j) in der Risskandidatenebene 7fc in einem Ergebnis der Strukturanalyse an, in dem der Knoten an den Koordinaten (i, j) in der Risskandidatenebene 7fc als im Risszustand befindlich betrachtet wird. Der Spaltenvektor wird in Zeilen in der Reihenfolge der Position des Risses 9 (Koordinaten) angeordnet, durch die der Spaltenvektor bestimmt wird, um die Lastmatrix $Z_{\text{crack_diff}}$ zu erzeugen.

[0041] Als Nächstes werden eine Steifigkeitsmatrix G aus der linearen Relation zwischen der Verlagerung und der Last der Risskandidatenebene 7fc und ein Lastvektor der Risskandidatenebene 7fc in dem Fall, in dem kein Riss vorhanden ist, erzeugt. Die Lastmatrix $Z_{\text{crack_diff}}$ und die Rissebenenmatrix $\Delta_{\text{crack_diff}}$ werden durch die folgende Gleichung (4) ausgedrückt. Dabei ist $Z_{\text{no_crack}}$ der Lastvektor der Risskandidatenebene 7fc in dem Fall, in dem kein Riss vorhanden ist. Durch Verschieben von $Z_{\text{crack_diff}}$ von der linken Seite der Gleichung (4) auf die rechte Seite und $G\Delta_{\text{crack_diff}}$ auf die linke Seite und Multiplizieren beider Elemente mit der inversen Matrix $\Delta_{\text{crack_diff}}^{-1}$ der Rissebenenmatrix $\Delta_{\text{crack_diff}}$ von der

rechten Seite, wie in Gleichung (2), wird die Steifigkeitsmatrix G als Gleichung (5) erhalten.

$$Z_{\text{crack_diff}} = G\Delta_{\text{crack_diff}} + Z_{\text{no_crack}} \quad (4)$$

$$G = (Z_{\text{crack_diff}} - Z_{\text{no_crack}}) [\Delta_{\text{crack_diff}}]^{-1} \quad (5)$$

[0042] Dann werden die Vorwärtskoeffizientenmatrix D, die Steifigkeitsmatrix G und der Lastvektor, die in dem Fall erzeugt werden, in dem kein Riss vorhanden ist, als ein Modell zum Schätzen des Risses an die Risszustands-Analyseeinheit 3 ausgegeben (Schritt S2320), und damit endet die Lernphase.

Risszustands-Analysephase

[0043] Wenn die vorstehend beschriebene Lernphase abgeschlossen ist, kann eine Risszustands-Analysephase zum Schätzen des Zustands des Risses in der Zielstruktur 7 durchgeführt werden, die für die Fehlerdetektion verwendet werden kann. Nachstehend wird der Vorgang der Risszustands-Analysephase, die von der Risszustands-Analyseeinheit 3 ausgeführt wird, mit Bezugnahme auf das Ablaufdiagramm gemäß **Fig. 9** beschrieben.

[0044] In der Risszustands-Analysephase werden zuerst Daten der Vorwärtskoeffizientenmatrix D, der Steifigkeitsmatrix G und des Lastvektors, wenn kein Riss vorhanden ist, als ein in der Lernphase erzeugtes Schätzmodell als eine Vorbereitung für die Analyse des Risszustands in die Risszustands-Schätz- einheit 32 eingelesen (Schritt S3210). Dann erfasst z. B. die Messdaten-Erfassungseinheit 31, wenn der Zustand des Risses für Fehlerdetektion oder dergleichen geschätzt wird, Messdaten, die durch eine tatsächliche Messung der Beobachtungsebene 7fo der Zielstruktur 7 erhalten werden.

[0045] Als ein Beispiel für die Messdaten wird eine Dehnung verwendet, um das Beispiel zu beschreiben. Die Messverfahren sind solche mit Verwendung von Dehnungsmessstreifen, digitale Bildkorrelationsverfahren usw. Die Dehnung wird hier jedoch als ein Anfangswert gespeichert, d. h. z. B. als ein Dehnungswert, der vor oder unmittelbar nach der Verwendung der Zielstruktur 7 in einem Zustand gemessen wird, in dem kein Riss 9 in einem von der Oberfläche aus verborgenen Bereich auftritt. Dann werden die Differenzen zwischen dem Dehnungswert, der in einem Zustand zu einer Zeit gemessen wird, wenn das Auftreten des Risses 9 vermutet wird, wie z. B. zur Zeit einer Fehlerdiagnose, und dem gespeicherten Anfangswert als Dehnungsdaten erfasst.

[0046] Die gemessenen Dehnungsdaten werden als Spaltenvektoren der Dehnung auf die gleiche Weise wie die Beobachtungsebenenmatrix E_{measure} in der

durch das Schätzmodell bestimmten Reihenfolge angeordnet (Schritt S3220). Die gemessenen Dehnungsdaten befinden sich an der gleichen Position wie die Dehnungsdaten zur Zeit des Lernens. Als Nächstes wird ein Vektor L der latenten Variablen eingeführt, die das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein des Risses 9 in der Risskandidatenebene 7fc angeben, wie in Gleichung (6) gezeigt (Schritt S3230). In dem Vektor L geben i und j von $lv(i, j)$ eine Position (Koordinaten) in der Risskandidatenebene 7fc an, die die gleiche ist wie die in der Lastmatrix $Z_{\text{crack_diff}}$ und der Rissebenenmatrix $\Delta_{\text{crack_diff}}$.

$$L = \begin{bmatrix} lv(0,0) \\ \vdots \\ lv(i,j) \\ \vdots \\ lv(n,m) \end{bmatrix} \quad (6)$$

[0047] Wenn $lv(i, j)$ gleich Eins ist, wird dies hier definiert als „Riss vorhanden“, und wenn $lv(i, j)$ gleich Null ist, wird dies hier definiert als „kein Riss“ und ist ein Wert von Null oder Eins zu nehmen.

[0048] Als Nächstes wird die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Verlagerung und der Last der Risskandidatenebene 7fc mittels der latenten Variablen erhalten, die die Spärlichkeit der Verlagerung und der Last zeigt, wobei die Verlagerung und die Last in der Risskandidatenebene 7fc Reziprozität aufweisen. Dies wird als eine A-priori-Verteilung definiert (Schritt S3240). Unter Reziprozität versteht man dabei eine Relation, in der, wenn das eine existiert, das andere nicht existiert, und wenn das andere existiert, das eine nicht existiert, und das eine und das andere nicht gleichzeitig existieren.

[0049] Hier werden in der Annahme, dass die Wahrscheinlichkeitsverteilung eine Normalverteilung ist, die erwarteten Werte und Kovarianzen für die Verlagerung und die Last in der Risskandidatenebene 7fc als Funktionen der latenten Variablen angenommen. Es wird angenommen, dass Δ_{ex} und Δ_{cov} einen Vektor der erwarteten Werte der Verlagerung bzw. eine Matrix der Kovarianzen bezeichnen, und es wird angenommen, dass Z_{ex} und Z_{cov} einen Vektor der erwarteten Werte der Last bzw. eine Matrix der Kovarianzen bezeichnen. Komponenten von jedem der Vektoren und der Matrizen sind Funktionen der latenten Variablen und es wird angenommen, dass die erwarteten Werte und Varianzen an dem Riss 9 und den Nicht-Riss-Bereichen geeignet sind. Eine A-posteriori-Verteilung wird durch Gleichung (7) ausgedrückt.

$$p(\Delta_{\text{ans}}|L) = \text{Norm}(\Delta_{\text{ans}}| \Delta_{\text{ex}}, \Delta_{\text{cov}}) \text{Norm}(Z_{\text{ans}}| Z_{\text{ex}}, Z_{\text{cov}}) \quad (7)$$

[0050] Als Nächstes wird ein erwarteter Wert des Rauschens in der Dehnungsverteilung des Beobachtungsergebnisses als E_{noiseex} definiert, und es wird eine Varianz des Rauschens zur Zeit der Messung als E_{noisecov} definiert, und es wird die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Differenz zwischen der geschätzten Verlagerungsverteilung Δ_{ans} der Risskandidatenebene 7fc und einem erwarteten Wert E_m des Beobachtungsergebnisses als Gleichung (8) unter Verwendung der Vorwärtskoeffizientenmatrix D des Schätzmodells erhalten. Dies wird als eine Likelihood-Verteilung definiert (Schritt S3250).

$$L(\Delta_{\text{ans}}|E_m) = \text{Norm}(D\Delta_{\text{ans}} - E_m| E_{\text{noiseex}}, E_{\text{noisecov}}) \quad (8)$$

[0051] Schließlich wird die Verlagerungsverteilung Δ_{ans} durch Bayessche Schätzung geschätzt, so dass die nachstehende Gleichung (9) erfüllt ist. Hier wird die Verlagerungsverteilung Δ_{ans} unter Verwendung der JE-MAP-Schätzung als eine Bayessche Schätzung geschätzt, die eine A-posteriori-Wahrscheinlichkeit maximiert (Schritt S3260).

$$\Delta_{\text{ans}} = \arg \max_{\Delta_{\text{ans}}} \{L(\Delta_{\text{ans}}|E_m) p(\Delta_{\text{ans}}|L)\} \quad (9)$$

[0052] Die Dehnungsverteilung an der Oberfläche wird aus der erhaltenen Verlagerungsverteilung Δ_{ans} und der Vorwärtskoeffizientenmatrix D erhalten, und die Differenz zu dem erwarteten Wert E_m des Beobachtungsergebnisses wird unter Verwendung der nachstehenden Gleichung (10) berechnet (Schritt S3270).

$$|D\Delta_{\text{ans}} - E_m| \leq \lambda \quad (10)$$

[0053] Dann wird bestimmt, ob der berechnete Differenzwert gleich oder kleiner als ein Referenzwert λ ist, der für die Bestimmung von Konvergenz vorbestimmt wird (Schritt S3280). Wenn der Differenzwert den Referenzwert λ überschreitet („Nein“ im Schritt S3280), geht das Verfahren zum Schritt S3240 über, wo die latente Variable auf der Grundlage der Verlagerungsverteilung Δ_{ans} erhalten wird, die die A-posteriori-Verteilung ist, und werden die Berechnungen wiederholt. Wenn der Differenzwert gleich dem Referenzwert λ oder kleiner ist („Ja“ im Schritt S3280), wird bestimmt, dass die zu der Zeit erhaltene Verlagerungsverteilung Δ_{ans} konvergiert ist, und es werden die Größe und die Position des Risses 9 aus der konvergierten Verlagerungsverteilung Δ_{ans} in der Risskandidatenebene 7fc erhalten (Schritt S3290).

[0054] Informationen über die erhaltene Größe und Position des Risses 9 werden an die Analyseergebnis-Ausgabeeinheit 4 ausgegeben, und das Verfahren geht zu einer Analyseergebnis-Ausgabephase über (Schritt S4000). Somit endet die Risszustands-

Analysephase, und es geht der Prozess zur Analyseergebnis-Ausgabephase (Schritt S4000) mittels der Analyseergebnis-Ausgabeeinheit 4 über. In der Analyseergebnis-Ausgabephase werden die von der Risszustands-Analyseeinheit 3 ausgegebene Position und Größe des Risses 9 als Überprüfungsergebnis angezeigt.

[0055] Es sei angemerkt, dass, wie in **Fig. 10** gezeigt, ein Teil zum Durchführen von Berechnungsverarbeitung in der Risschätzvorrichtung 1 gemäß Ausführungsform 1, insbesondere die Modellerzeugungseinheit 2 und die Risszustands-Analyseeinheit 3, mit einer einzigen Hardware 10 ausgelegt sein kann, die einen Prozessor 101 und eine Speichervorrichtung 102 aufweist. Auch wenn nicht gezeigt, weist die Speichervorrichtung 102 eine flüchtige Speichervorrichtung, wie z. B. einen Direktzugriffspeicher, und eine nichtflüchtige Hilfsspeichervorrichtung, wie z. B. einen Flash-Speicher auf. Anstelle des Flash-Speichers kann auch eine Hilfsspeichervorrichtung einer Festplatte ausgebildet sein. Der Prozessor 101 führt ein von der Speichervorrichtung 102 eingegebenes Programm aus.

[0056] In diesem Fall wird ein Programm von der Hilfsspeichervorrichtung mittels der flüchtigen Speichervorrichtung in den Prozessor 101 eingegeben. Ferner kann der Prozessor 101 Daten, wie z. B. Berechnungsergebnisse, an die flüchtige Speichervorrichtung der Speichervorrichtung 102 ausgeben oder kann die Daten mittels der flüchtigen Speichervorrichtung in der Hilfsspeichervorrichtung speichern. Die Hardware 10 kann mit einem Messinstrument verbunden werden, oder die Ergebnisse der Dehnungsmessung können zur Verwendung bei der Datenverarbeitung ausgegeben werden.

[0057] Mit anderen Worten, es kann das Risschätzverfahren gemäß Ausführungsform 1 dazu ausgelegt sein, von der Hardware 10 ausgeführt zu werden. Natürlich kann die Konfiguration auch auf die Risschätzvorrichtung 1, das Risschätzverfahren und das Überprüfungsverfahren einer rotierenden Maschine gemäß den folgenden Ausführungsformen angewendet werden.

[0058] Ferner wird in der vorstehenden Beschreibung angenommen, dass die Zielstruktur 7 eine flache Platte ist, und sie wird in einem orthogonalen xyz-Koordinatensystem gezeigt, aber es gibt keine Einschränkung diesbezüglich. Wie in **Fig. 11A** gezeigt, kann sie z. B. auch auf die Zielstruktur 7 eines Zylinders mit einem zylindrischen Koordinatensystem mit den Koordinaten RθZ angewendet werden. In diesem Fall entspricht x, gezeigt in **Fig. 4A** und **Fig. 4B**, der Koordinate R, es entspricht y der Koordinate θ, und es entspricht z der Koordinate Z. Die zylindrische Struktur, die ein Ziel sein soll, ist eine Struktur, bei der der Innendruck P_i auf die innere

Umfangsoberfläche 7fi aufgebracht wird, wie z. B. ein in **Fig. 11B** gezeigter Schrumpfverbindungsreich, und die Form der Oberfläche ändert sich bedingt durch das Auftreten von Rissen in dem von der Oberfläche aus verborgenen Bereich.

[0059] Ein Beispiel für die Zielstruktur, auf die das zylindrische Koordinatensystem angewendet wird, ist ein auf einen Rotoreisenkern geschrumpfter Verbindungsreich eines Halterings, wobei der Halterung auf ein Ende eines Rotors einer rotierenden Maschine geschrumpft ist.

Ausführungsform 2

[0060] Bei der vorstehend beschriebenen Ausführungsform 1 ist ein Beispiel gezeigt, in dem der Risszustand aus der Dehnungsänderung als Verformung der Beobachtungsebene geschätzt wird, was jedoch keine Einschränkung darstellt. Es ist auch nicht möglich, alle zu detektierenden Rissformen zu lernen. Bei der Ausführungsform 2 wird ein Beispiel beschrieben, in dem ein Risszustand aus einer Verlagerungsänderung und einer Winkeländerung geschätzt wird. Insbesondere sollte durch effizientes Lernen mit einer geringeren Menge an Rissdaten eine Schätzung der Position und der Größe eines Risses in einem von irgendeiner Oberfläche aus verborgenen Bereich aus der Änderung einer Beobachtungsebene ermöglicht werden.

[0061] **Fig. 12** und **Fig. 13** zeigen jeweils eine Speicherstruktur zur Speicherung, wie in **Fig. 5** gemäß Ausführungsform 1 beschrieben, wenn das Schätzmodell erzeugt wird, in einer Risschätzvorrichtung bzw. einem Risschätzverfahren gemäß Ausführungsform 2. **Fig. 12** zeigt eine Speicherstruktur zum Speichern von Information über eine Verlagerungsänderung der Beobachtungsebene und **Fig. 13** zeigt eine Speicherstruktur zum Speichern von Information über eine Winkeländerung der Beobachtungsebene. Es sei angemerkt, dass in der Risschätzvorrichtung oder dem Risschätzverfahren gemäß Ausführungsform 2 der Betrieb außer demjenigen, der sich auf die Speicherstruktur bezieht (Schritt S2240 bis Schritt S2290), der gleiche ist wie der bei der Ausführungsform 1 beschriebene. Somit werden hauptsächlich Teile beschrieben, die sich von denjenigen der Ausführungsform 1 unterscheiden, und es wird Bezug auf die bei der Ausführungsform 1 verwendeten Zeichnungen genommen.

[0062] Auch in dem Fall, in dem eine Verlagerungsänderung verwendet wird, wie in **Fig. 12** gezeigt, ist ein Spaltenvektor $Dis(0, 0)$ der Verlagerungsänderung der Beobachtungsebene 7fo ein solcher, dass die Verlagerungsänderungsdaten der Knoten der Beobachtungsebene 7fo in der Reihenfolge angeordnet werden, wie in dem Formmodell-Vorgabeschritt S2120 bestimmt. $d_{i,j}(k,l)$ in dem Spaltenvektor

$Dis(0, 0)$ gibt die Verlagerungsänderung des Knotens an den Koordinaten $(k, 1)$ in der Beobachtungsebene 7fo an. Ferner wird der Spaltenvektor $Dis(i, j)$ mit den Koordinaten (i, j) in der Risskandidatenebene 7fc als Information über die Position (Koordinaten) zum Lernen erzeugt, an der der Riss 9 auftreten gelassen werden soll, und es werden Komponenten in dem Spaltenvektor mit $d_{i,j}(k,l)$ angegeben.

[0063] $d_{i,j}(k,l)$ gibt die Verlagerungsänderung an dem Knoten der Koordinaten $(k, 1)$ in der Risskandidatenebene 7fc in einem Ergebnis der Strukturanalyse an, in dem der Knoten der Koordinaten (i, j) in der Risskandidatenebene 7fc als im Risszustand befindlich betrachtet wird. Dieser Spaltenvektor wird in Zeilen in der Reihenfolge der Position angeordnet, an der der Riss 9 auftritt, wie in dem Formmodell-Vorgabeschritt S2120 bestimmt, um eine Matrix Dismearse zu erzeugen.

[0064] Auch in dem Fall, in dem eine Winkeländerung verwendet wird, wie in **Fig. 13** gezeigt, ist ein Spaltenvektor $A(0,0)$ der Verlagerungsänderung der Beobachtungsebene 7fo ein solcher, dass die Winkeländerungsdaten der Knoten der Beobachtungsebene 7fo in der Reihenfolge angeordnet werden, wie in dem Formmodell-Vorgabeschritt S2120 bestimmt. $a_{i,j}(k,l)$ in dem Spaltenvektor $A(0,0)$ gibt die Winkeländerung des Knotens an den Koordinaten $(k, 1)$ in der Beobachtungsebene 7fo an. Ferner wird der Spaltenvektor von $A(i, j)$ mit den Koordinaten (i, j) in der Risskandidatenebene 7fc als Information über die Position (Koordinaten) zum Lernen erzeugt, an der der Riss 9 auftreten gelassen werden soll, und es werden Komponenten in dem Spaltenvektor mit $a_{i,j}(k,l)$ angegeben.

[0065] $a_{i,j}(k,l)$ gibt die Winkeländerung des Knotens der Koordinaten $(k, 1)$ in der Risskandidatenebene 7fc als ein Ergebnis der Strukturanalyse an, in dem der Knoten der Koordinaten (i, j) in der Risskandidatenebene 7fc als im Risszustand befindlich betrachtet wird. Dieser Spaltenvektor wird zeilenweise in der Reihenfolge der Position angeordnet, an der der Riss 9 auftritt, wie in dem Formmodell-Vorgabeschritt S2120 bestimmt, um eine Matrix Ameasure zu erzeugen.

[0066] Auf diese Weise ist es durch Verwendung der Verlagerungsänderung oder der Winkeländerung möglich, den Bereich zum Erzeugen der Lerndaten, die allen Formen des Risses 9 entsprechen, die in der Risskandidatenebene 7fc auftreten, zu automatisieren. Folglich ist es möglich, die Position und die Größe des Risses 9 in dem von irgendeiner Oberfläche aus verborgenen Bereich aus der Änderung der Beobachtungsebene 7fo durch effizientes Lernen mit einer geringeren Menge von Rissdaten zu schätzen. Durch die Verwendung nicht nur von der Dehnungsänderung, sondern auch von der Verlagerungsände-

itung und der Winkeländerung als einer Verformung der Beobachtungsebene 7fo, können ferner die Typen des Messverfahrens erweitert werden, und es kann die Messung in kürzerer Zeit und mit höherer Genauigkeit als mit einer Dehnungsmessung durchgeführt werden.

Ausführungsform 3

[0067] Da bei der Ausführungsform 1 oder 2 die durch die Risse bewirkte Verformung zur Zeit der Überprüfung in der Beobachtungsebene auftreten muss, ist die Zielstruktur auf eine Struktur beschränkt, auf die im Vorhinein eine Kraft aufgebracht wird, wie z. B. ein Schrumpfverbindungsbereich. Aber selbst dann, wenn vorher keine Kraft auf die Zielstruktur aufgebracht wird, kann die gleiche Messung durch Aufbringen einer konstanten Last auf die Zielstruktur in dem Zustand ohne Riss und zur Zeit der Überprüfung durchgeführt werden. Mit einer Risschätzvorrichtung bzw. einem Risschätzverfahren gemäß Ausführungsform 3 kann der Risszustand auch dann, wenn keine Kraft im Vorhinein auf die Zielstruktur aufgebracht wird, durch Aufbringen einer konstanten Last auf die Zielstruktur geschätzt werden.

[0068] **Fig. 14** und **Fig. 15** dienen der Erläuterung einer Struktur und eines Betriebs der Risschätzvorrichtung, des Risschätzverfahrens oder eines Überprüfungsverfahrens einer rotierenden Maschine gemäß Ausführungsform 3. **Fig. 14** ist ein Blockdiagramm zur Erläuterung der Struktur der Risschätzvorrichtung und **Fig. 15** ist ein Ablaufdiagramm, das den Betrieb der Risschätzvorrichtung bzw. des Risschätzverfahrens zeigt. Es sei angemerkt, dass in der Risschätzvorrichtung bzw. dem Risschätzverfahren gemäß Ausführungsform 3 die Beschreibung mit Ausnahme der Konfiguration der Formmodell-Vorgabeeinheit und der Messdaten-Erfassungseinheit, die bei der Ausführungsform 1 und Ausführungsform 2 beschrieben sind, sowie der Betrieb in Bezug auf eine Prüflast (Schritt S2115, Schritt S3090) die gleichen wie sie bei der Ausführungsform 1 beschrieben sind. Somit werden hauptsächlich Teile beschrieben, die sich von denen der Ausführungsform 1 unterscheiden, und es wird Bezug auf die bei der Ausführungsform 1 verwendeten Zeichnungen genommen.

[0069] Wie in **Fig. 14** gezeigt, ist die Formmodell-Vorgabeeinheit 21 mit einer Prüflast-Vorgabeeinheit 211 zum Vorgeben einer Größe und einer Position einer Last ausgestattet, die als eine externe Kraft auf die Zielstruktur 7 aufzubringen ist. Ferner ist die Messdaten-Erfassungseinheit 31 mit einer Prüflast-Angabeeinheit 311 zum Anzeigen der Größe und der Position der auf die Zielstruktur 7 aufzubringenden Last ausgestattet, die von der Prüflast-Vorgabeeinheit 211 vorgegeben wird.

[0070] Dann ist, wie in **Fig. 15** gezeigt, in der Lernphase ein Prüflast-Vorgabeschritt S2115 zum Vorgeben der Größe und der Position der Last für die Überprüfung enthalten, und es wird in einem Formmodell-Vorgabeschritt S2120 die vorgegebene Prüflast zu der Randbedingung zur Zeit der Strukturanalyse hinzugefügt. Ferner ist in der Risszustands-Analysephase ein Prüflast-Anweisungsschritt S3090 enthalten, und es wird in dem Messdaten-Erfassungsschritt S3100 eine externe Kraft in der angewiesenen Größe und Position auf die Zielstruktur 7 aufgebracht, um den Zustand der Oberfläche zu messen. Dies ermöglicht die Überprüfung der Zielstrukturen 7, auf die keine Kraft im Vorhinein aufgebracht worden ist, und erweitert den Bereich der Zielstrukturen 7, die überprüft werden können.

[0071] Es sei angemerkt, dass die funktionale Konfiguration der Prüflast-Angabeeinheit 311 zu einer funktionalen Konfiguration geändert werden kann, in der zusätzlich zu der Lastanzeige eine Last auf die Zielstruktur 7 automatisch aufgebracht wird, und der Prüflast-Anweisungsschritt S3090 in diesem Fall als ein Prüflast-Aufbringungsschritt gelesen werden kann.

[0072] Da auf diese Weise eine Last mit der zur Zeit der Überprüfung vorgegebenen Größe und Position auf die Zielstruktur 7 aufgebracht wird, kann die Überprüfung der Zielstruktur, auf die keine Kraft im Vorhinein aufgebracht wird, durchgeführt werden, und es kann das zu überprüfende Ziel erweitert werden.

Ausführungsform 4

[0073] In den vorstehend beschriebenen Ausführungsformen sind die Konfiguration und der Betrieb beschrieben, die zum Schätzen des Risszustands der Zielstruktur erforderlich sind. Bei der Ausführungsform 4 werden eine Fehlerdiagnosevorrichtung zum Durchführen einer Fehlerdiagnose einer rotierenden Maschine als eine Zielstruktur und ein Fehlerdiagnoseverfahren für eine rotierende Maschine beschrieben. **Fig. 16** und **Fig. 17** erläutern eine Konfiguration und einen Betrieb der Fehlerdiagnosevorrichtung und des Fehlerdiagnoseverfahrens für eine rotierende Maschine gemäß Ausführungsform 4. **Fig. 16** ist ein Diagramm, das eine Gesamtkonfiguration der Fehlerdiagnosevorrichtung zeigt, und **Fig. 17** ist ein Ablaufdiagramm, das zusätzliche Schritte zu dem in der Risszustandsschätzvorrichtung oder dem Risschätzverfahren beschriebenen Betrieb als den Betrieb der Fehlerdiagnosevorrichtung oder des Fehlerdiagnoseverfahrens für eine rotierende Maschine zeigt.

[0074] Es sei angemerkt, dass in der Fehlerdiagnosevorrichtung oder dem Fehlerdiagnoseverfahren für eine rotierende Maschine gemäß Ausführungsform 4

die Komponenten und der Betrieb, die für die Fehlerdiagnose notwendig sind, zu der Risschätzvorrichtung oder dem Risschätzverfahren hinzugefügt werden, die bei den jeweiligen Ausführungsformen 1 bis 3 beschrieben sind. Somit wird auf die Beschreibung bei der Ausführungsform 1 bis Ausführungsform 3 Bezug genommen, und es werden hauptsächlich zusätzliche Komponenten beschrieben.

[0075] Wie in **Fig. 16** gezeigt, ist die Fehlerdiagnosevorrichtung 5 gemäß Ausführungsform 4 mit der bei der Ausführungsform 1 bis Ausführungsform 3 beschriebenen Risschätzvorrichtung 1 und einem Endgerät 52 mit Funktionen zum Eingeben von Betriebsbedingungen, physikalischen Eigenschaften und dergleichen, die für die Fehlerdiagnose erforderlich sind, sowie zum Anzeigen eines Diagnoseergebnisses ausgestattet. Und das System ist derart ausgelegt, dass Messdaten von einer Messeinrichtung 6 zum Messen eines Oberflächenzustands eines Rotors in der rotierenden Maschine 70, die die Zielstruktur 7 ist, erfasst werden können und somit die Größe und die Position des Risses 9 aus dem Oberflächenzustand des Rotors geschätzt werden.

[0076] Ferner berechnet die Risschätzvorrichtung 1 durch Verwendung z. B. einer externen Kraft, die auf den Rotor aufgebracht wird, physikalischer Eigenschaften des Rotors und des Grenzwerts, die über das Endgerät 52 eingegeben werden, die Einsatzdauer, bis der Grenzwert erreicht ist. Es sei angemerkt, dass bei der Ausführungsform 5 eine Alarmeinrichtung 53 verwendet wird, die später beschrieben wird.

[0077] Somit wird, wie in **Fig. 17** gezeigt, ein Prozess (Schritt S3300) hinzugefügt, in dem Daten der externen Kraft, die auf die Zielstruktur 7, wie z. B. den Rotor, aufgebracht wird, die physikalischen Eigenschaften der Zielstruktur und der Grenzwert für die Größe und die Position eines Risses, der die Zielstruktur 7 unbrauchbar macht, z. B. über das Endgerät 52 eingegeben werden. Es sei angemerkt, dass diese Daten bereits in einem Produktentwicklungsstadium verfügbar sind.

[0078] Dann wird ein Schritt (Schritt S3310) hinzugefügt, in dem ein Ausmaß der Rissausdehnung unter den Einsatzbedingungen des Zielprodukts von der Risszustands-Schätzeinheit 32 aus der Position und der Größe des Risses 9, die im Schritt S3290 berechnet worden sind, und den Eingabedaten unter Verwendung des Wissens über die Bruchmechanik berechnet wird. Es sei angemerkt, dass hinsichtlich der Berechnung des Ausdehnungsausmaßes das Ausdehnungsausmaß nicht nur aus dem Wissen über die Bruchmechanik, sondern auch aus dem Ergebnis der Schätzung der Größe und der Position des Risses 9 in der Zeitreihe geschätzt werden kann. Ferner wird ein Schritt (Schritt S3320) hin-

zugefügt, um die Einsatzdauer zu berechnen, bis der Riss 9 die Größe und Stelle erreicht, die die Zielstruktur unbrauchbar machen.

[0079] Somit gibt die Analyseergebnis-Ausgabeeinheit 4 zusätzlich zu der Ausgabe des Schätzergebnisses Information über die verbleibende Einsatzdauer an das Endgerät 52 aus (Schritt S4000). Das Endgerät 52 legt Information vor, die die verbleibende Einsatzdauer gemäß den Ausgabeinhalten von der Analyseergebnis-Ausgabeeinheit 4 enthält (Schritt S5100). Es sei angemerkt, dass die Funktion des Endgeräts 52 durch die bei der Ausführungsform 1 bis Ausführungsform 3 beschriebene Analyseergebnis-Ausgabeeinheit 4 ersetzt werden kann.

[0080] Folglich kann, zusätzlich zu der Position und der Größe des Risses 9, die verbleibende Einsatzdauer der Ausrüstung verstanden werden, es kann die Ausrüstung in geplanter Weise repariert oder erneuert werden, und es kann die Vorrichtung als Fehlerdiagnosevorrichtung 5 oder als Fehlerdiagnoseverfahren für eine rotierende Maschine dienen.

Ausführungsform 5

[0081] In der vorstehend beschriebenen Ausführungsform 4 ist ein Beispiel beschrieben, in dem die verbleibende Einsatzdauer der Ausrüstung als eine Fehlerdiagnose dargestellt wird, was jedoch keine Einschränkung ist. Bei der Ausführungsform 5 ist eine Alarmeinrichtung angeordnet, um Fehleranzeichen nachdrücklicher anzugeben. **Fig. 18** ist ein Ablaufdiagramm zur Erläuterung des Betriebs einer Fehlerdiagnosevorrichtung und eines Fehlerdiagnoseverfahrens einer rotierenden Maschine gemäß Ausführungsform 5 und zeigt zusätzliche Schritte zu dem für die Risschätzvorrichtung oder das Risschätzverfahren beschriebenen Betrieb als den Betrieb der Fehlerdiagnosevorrichtung oder des Fehlerdiagnoseverfahrens einer rotierenden Maschine.

[0082] Es sei angemerkt, dass bei der Fehlerdiagnosevorrichtung oder dem Fehlerdiagnoseverfahren einer rotierenden Maschine gemäß Ausführungsform 5 eine Konfiguration und ein Betrieb, die für die Fehlerdiagnose notwendig sind, zu der Risschätzvorrichtung oder dem Risschätzverfahren, die in jeglicher der Ausführungsformen 1 bis 3 beschrieben worden sind, hinzugefügt werden. Somit wird Bezug auf die Beschreibung bei der Ausführungsform 1 bis Ausführungsform 3 genommen und werden hauptsächlich die zusätzlichen Komponenten beschrieben. Ferner wird als Konfiguration der Fehlerdiagnosevorrichtung auf die bei der Ausführungsform 4 verwendete **Fig. 16** Bezug genommen.

[0083] Die Fehlerdiagnosevorrichtung 5 gemäß Ausführungsform 5 weist zusätzlich zu den mit

Bezugnahme auf **Fig. 16** gemäß Ausführungsform 4 beschriebenen Inhalten die Alarmeinrichtung 53 zum Ausgeben eines Alarms auf. Ferner werden die Größe und die Position des Risses 9, die als Grenzwert verwendet werden können, über das Endgerät 52 eingegeben. Dann bestimmt die Risschätzvorrichtung 1 z. B. unter Verwendung eines von dem Endgerät 52 eingegebenen Grenzwerts, ob einer der geschätzten Risse 9 den Grenzwert überschreitet oder nicht.

[0084] Wie in **Fig. 18** gezeigt, wird somit nach dem Schritt S3290 ein Schritt des Eingebens des Grenzwerts (Schritt S3340) hinzugefügt. Ferner wird ein Schritt (Schritt S3350) hinzugefügt, um aus der Information, die auf der im Schritt S3290 berechneten Position und Größe des Risses 9 basiert, und den Daten des eingegebenen Grenzwerts zu bestimmen, ob ein Riss 9, der eine für den Einsatz ungeeignete Größe (Grenzwert) überschreitet, an einer gewissen Position vorhanden ist.

[0085] Wenn ein Riss 9 vorhanden ist, der den Grenzwert überschreitet („Ja“ im Schritt S3350), werden Anzeigedaten zum Anzeigen eines Alarms erzeugt, der zum Beenden des Einsatzes drängt (Schritt S3360). Dahingegen werden, wenn kein Riss 9 vorhanden ist, der den Grenzwert überschreitet („Nein“ im Schritt S3350), Anzeigedaten zum Anzeigen des Vorhandenseins oder Nichtvorhandenseins eines Risses oder der Anzahl von Rissen erzeugt (Schritt S3360).

[0086] Somit gibt die Analyseergebnis-Ausgabeeinheit 4 den Alarm oder die Anzeigedaten, wie z. B. das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein eines Risses, an die Alarmeinrichtung 53 aus (Schritt S4000). Die Alarmeinrichtung 53 zeigt den Alarm an, der entsprechend dem Ausgabeinhalt von der Analyseergebnis-Ausgabeeinheit 4 das Beenden des Einsatzes oder das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein eines Risses angibt (Schritt S5200). Es sei angemerkt, dass die Funktion der Alarmeinrichtung 53 durch die bei der Ausführungsform 1 bis Ausführungsform 3 beschriebene Analyseergebnis-Ausgabeeinheit 4 ersetzt werden kann.

[0087] Somit ist es möglich, das Beenden des Einsatzes der Ausrüstung schnell zu bestimmen. Es sei angemerkt, dass die Einsatzdauer bis zum Erreichen des bei der Ausführungsform 4 beschriebenen Grenzwertes oder der geschätzten Größe und Position des Risses 9 auf dem Endgerät 52 angezeigt werden kann.

Ausführungsform 6

[0088] Die bei der Ausführungsform 1 bis Ausführungsform 5 beschriebene Risskandidatenebene 7fc kann wie nachstehend beschrieben vorgegeben

werden. Die Verteilung der auftretenden Spannung der Zielstruktur 7 wird im Vorhinein durch eine Messung oder eine Strukturanalyse erhalten, eine geeignete Bewertungsspannung wird zum Bestimmen der Stelle des Auftretens des Risses 9 auf der Grundlage des Materials und der Spannungsverteilung ausgewählt, und der Punkt, an dem die Spannung maximal ist, wird als eine Stelle des Auftretens des Risses genommen.

[0089] Ferner wird die Risskandidatenebene 7fc so vorgegeben, dass sie eine Ebene ist, die rechtwinklig zu der Richtung der maximalen Hauptspannung an der Stelle des Auftretens verläuft und eine Ebene schneidet, die der Stelle des Auftretens des Risses 9 in der Zielstruktur 7 zugewandt ist. Mit dieser Vorgabe können die Lerndaten vor der Durchführung der Überprüfung erstellt werden, und es kann die für die Überprüfung benötigte Zeit verkürzt werden.

[0090] Obwohl in der vorliegenden Anmeldung verschiedene beispielhafte Ausführungsformen und Beispiele beschrieben sind, sei angemerkt, dass verschiedene Merkmale, Aspekte und Funktionen, die bei einer oder mehreren Ausführungsformen beschrieben werden, nicht einer bestimmten Ausführungsform inhärent sind und allein oder in ihren verschiedenen Kombinationen auf jede Ausführungsform anwendbar sein können. Dementsprechend sind im Umfang der hier offenbarten Technik zahllose Varianten denkbar, die nicht dargestellt sind. Dazu gehören z. B. der Fall, dass zumindest eine Komponente modifiziert, hinzugefügt oder weggelassen wird, sowie der Fall, dass zumindest eine Komponente herausgenommen und mit einer bei einer anderen Ausführungsform gezeigten Komponente kombiniert wird.

[0091] Wie vorstehend beschrieben, ist die Riss-schätzvorrichtung 1 gemäß jeder Ausführungsform so ausgelegt, dass sie Folgendes aufweist: die Formmodell-Vorgabeeinheit 21 zum Vorgeben des Formmodells der zu überprüfenden Zielstruktur 7, auf die eine externe Kraft (z. B. Zuglast Lt, Biegemoment Mb, Innendruck Pi usw.) aufgebracht wird, der Risskandidatenebene 7fc, in der das Auftreten eines Risses in einem von Oberflächen des Formmodells aus verborgenen Bereich erwartet wird, und der Beobachtungsebene 7fo, die als eine der Oberflächen des Formmodells zu messen ist; die Schätzmodell-Erzeugungseinheit 22 zum Erzeugen einer Matrix zum Schätzen des Zustands der Risskandidatenebene 7fc aus dem Zustand der Beobachtungsebene 7fo unter Verwendung von Matrizen zum Zuordnen des Zustands der Risskandidatenebene 7fc zu dem Zustand der Beobachtungsebene 7fo, wobei die Matrizen durch eine numerische Analyse eines aus dem Formmodell erzeugten Strukturanalysemodells erhalten werden; und die Risszustands-Analyseeinheit 3 zum Schät-

zen der Position und der Größe des Risses 9 durch gleichzeitiges Erlangen der Verteilung der Last und der Verlagerung in der Risskandidatenebene 7fc durch probabilistische Inferenz mittels Anwendung eines Beobachtungsebenen-Verformungsvektors, der die Verformung der Beobachtungsebene 7fo angibt und der aus tatsächlichen Messwerten der Beobachtungsebene 7fo, dem Schätzmodell und der latenten Variablen, die das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein des Risses 9 in der Risskandidatenebene 7fc angibt, erhalten wird. Dadurch können die Größe und die Position des Risses 9, der in dem von den Oberflächen aus verborgenen Bereich auftritt, wo die Beobachtung schwierig ist, aus der Formänderung der Beobachtungsebene 7fo, die direkt gemessen werden kann, genau geschätzt werden.

[0092] Insbesondere ist die Risszustands-Analyseinheit 3 dazu ausgelegt, die Größe und die Position des Risses 9 aus der A-posteriori-Verteilung (Verlagerungsverteilung Δ_{ans}) zu der Zeit zu bestimmen, zu der die A-posteriori-Verteilung (Verlagerungsverteilung Δ_{ans}) mittels der latenten Variablen aktualisiert und konvergiert ist, wobei die A-priori-Verteilung als Wahrscheinlichkeitsverteilung der Verlagerung der Risskandidatenebene 7fc definiert ist, die gleichzeitig mit der Last mittels der latenten Variablen erhalten wird, die die Spärlichkeit der Verlagerung und der Last zeigt, die Reziprozität aufweisen, wobei die A-posteriori-Verteilung als Wahrscheinlichkeitsverteilung (Verlagerungsverteilung Δ_{ans}) der Verlagerung der Beobachtungsebene 7fo definiert ist, die aus der A-priori-Verteilung und dem Schätzmodell berechnet wird. Dadurch können die Größe und die Position des Risses 9, der in dem von den Oberflächen aus verborgenen Bereich auftritt, wo die Beobachtung schwierig ist, zuverlässig und mit hoher Genauigkeit geschätzt werden.

[0093] Die Verlagerungsverteilung Δ_{ans} kann durch eine einfache Berechnung geschätzt werden, wenn die Bayessche Schätzung für die probabilistische Inferenz verwendet wird, insbesondere wenn die MAP-Schätzung davon verwendet wird.

[0094] Wenn irgendeine der Verlagerungsänderung, der Dehnungsänderung und der Winkeländerung der Beobachtungsebene 7fo für den Beobachtungsebenen-Verformungsvektor verwendet wird, kann die Anwendung auf eine Struktur mit verschiedenen Formen als Zielstruktur 7 für die Schätzung des Risses 9 erfolgen.

[0095] Die externe Kraft ist die Prüflast, die zur Zeit der Überprüfung der Zielstruktur 7 aufgebracht wird, und wenn die Prüflast-Vorgabeeinheit 211 zum Vorgeben der Position und der Größe der Prüflast und die Prüflast-Angabeeinheit 311 zum Anzeigen der Position und der Größe der vorgegebenen Prüflast

zur Zeit der Überprüfung angeordnet sind, kann die Anwendung auf eine Struktur, auf die aufgrund der Struktur keine externe Kraft aufgebracht wird, als Zielstruktur 7 für die Schätzung des Risses 9 erfolgen.

[0096] Ferner weist die Fehlerdiagnosevorrichtung 5 der vorliegenden Anmeldung die vorstehend beschriebene Risschätzvorrichtung 1 und das Endgerät 52 auf, wobei die Risschätzvorrichtung 1 mit dem Messinstrument (der Messeinrichtung 6) zum Messen der Beobachtungsebene 7fo der Zielstruktur 7 verbunden ist und die Messdaten-Erfassungseinheit 31 aufweist, die Messwerte von dem Messinstrument (der Messeinrichtung 6) erhalten, wobei das Endgerät 52 Information über die Grenzbedingung des Risses in der Zielstruktur 7 empfängt, die empfangene Information über die Grenzbedingung an die Risschätzvorrichtung ausgibt und das Analyseergebnis der Risschätzvorrichtung 1 dann anzeigt.

[0097] Die Risszustands-Analyseeinheit 3 ist dazu ausgelegt zu bestimmen, ob die erhaltene Größe und Position des Risses 9 die Grenzbedingung überschreiten oder nicht, und eine Fehlerauftittswarnung auf dem Endgerät 52 (das die Alarminrichtung 53 aufweist) anzuzeigen, wenn die Größe und die Position die Grenzbedingung überschreiten, so dass der Fehler der Zielstruktur 7 genau diagnostiziert und mitgeteilt werden kann.

[0098] Oder die Fehlerdiagnosevorrichtung 5 der vorliegenden Anmeldung weist die vorstehend beschriebene Risschätzvorrichtung 1 und das Endgerät 52 auf, wobei die Risschätzvorrichtung 1 mit dem Messinstrument (der Messeinrichtung 6) zum Messen der Beobachtungsebene 7fo der Zielstruktur 7 verbunden ist und die Messdaten-Erfassungseinheit 31 aufweist, die Messwerte von dem Messinstrument (der Messeinrichtung 6) erhalten, wobei das Endgerät 52 Elementinformation empfängt, die die während des Betriebs der Ausrüstung mit der Zielstruktur 7 auf die Zielstruktur 7 aufgebrachte Kraft sowie physikalische Eigenschaften des Materials, das die Zielstruktur 7 bildet, enthält, die empfangene Elementinformation an die Risschätzvorrichtung 1 ausgibt und das Analyseergebnis der Risschätzvorrichtung 1 dann anzeigt.

[0099] Die Risszustands-Analyseeinheit 3 ist dazu ausgelegt, eine Ausbreitungslebensdauer des Risses 9 aus der erhaltenen Größe und Position des Risses 9 und der Elementinformation zu bestimmen und Information über die verbleibende Einsatzdauer auf dem Endgerät 52 anzuzeigen, so dass die verbleibende Einsatzdauer bis zum Ausfall der Ausrüstung mit der Zielstruktur 7 genau diagnostiziert und mitgeteilt werden kann.

[0100] Ferner ist das Risschätzverfahren gemäß jeder Ausführungsform so ausgelegt, dass es Folgendes aufweist: den Formmodell-Vorgabeschritt (Schritt S2120) zum Vorgeben des Formmodells der zu überprüfenden Zielstruktur 7, auf die eine externe Kraft (z. B. Zuglast Lt, Biegemoment Mb, Innendruck Pi usw.) aufgebracht wird, der Risskandidatenebene 7fc, in der das Auftreten eines Risses in einem von den Oberflächen des Formmodells aus verborgenen Bereich erwartet wird, und der Beobachtungsebene 7fo, die als eine der Oberflächen des Formmodells zu messen ist; den Schätzmodell-Erzeugungsschritt (Schritt S2200 (Schritte S2210 bis S2320)) zum Erzeugen der Matrix zum Schätzen des Zustands der Risskandidatenebene 7fc aus dem Zustand der Beobachtungsebene 7fo unter Verwendung der Matrizen, die den Zustand der Risskandidatenebene 7fc dem Zustand der Beobachtungsebene 7fo zuordnen, wobei die Matrizen durch eine numerische Analyse eines Strukturanalysemodells durch sequentielles Ändern der Randbedingung der Risskandidatenebene 7fc in dem aus dem Formmodell erzeugten Strukturanalysemodell erhalten werden; den Schritt (Schritt S3100) zum Empfangen tatsächlicher Messwerte der Beobachtungsebene 7fo und den Risszustands-Analyseschritt (Schritt S3200 (Schritte S3210 bis S3290)) zum Schätzen der Position und der Größe des Risses 9 durch gleichzeitiges Erlangen der Verteilung der Last und der Verlagerung in der Risskandidatenebene 7fc durch eine probabilistische Inferenz mittels Anwendung des Beobachtungsebenen-Verformungsvektors, der die Verformung der Beobachtungsebene 7fo angibt und aus den Messwerten, dem Schätzmodell und der latenten Variablen, die das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein des Risses 9 in der Risskandidatenebene 7fc angibt, erhalten wird. Dadurch können die Größe und die Position des Risses 9, der in dem von den Oberflächen aus verborgenen Bereich auftritt, wo die Beobachtung schwierig ist, aus der Formänderung der Beobachtungsebene 7fo, die direkt gemessen werden kann, genau geschätzt werden.

[0101] Insbesondere ist der Risszustands-Analyseschritt (Schritt S3200) wie folgt ausgelegt. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Verlagerung der Risskandidatenebene 7fc, die aus dem Beobachtungsebenen-Verformungsvektor und der Vorwärtskoeffizientenmatrix D mittels der latenten Variablen geschätzt wird, wird als Likelihood-Verteilung berechnet (Schritt S3250), wobei die Vorwärtskoeffizientenmatrix D von der Rissebenenmatrix $\Delta_{\text{crack diff}}$, die das Analyseergebnis der Risskandidatenebene 7fc in einer Matrix darstellt, auf die Beobachtungsebenenmatrix E_{measure} , die das Analyseergebnis der Beobachtungsebene 7fo in einer Matrix darstellt, abbildet und in den Matrizen enthalten ist, die das Schätzmodell bilden, wobei der Beobachtungsebenen-Verformungsvektor, der die Verformung der Beobachtungsebene 7fo der Ziel-

struktur 7 darstellt, und werden die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Last und der Verlagerung der Risskandidatenebene 7fc gleichzeitig mittels der latenten Variablen geschätzt, die die Spärlichkeit der Last und der Verlagerung zeigt, um die erhaltene Wahrscheinlichkeitsverteilung der Verlagerung der Risskandidatenebene 7fc als A-priori-Verteilung zu berechnen (Schritt S3240), wobei die Last und Verlagerung Reziprozität aufweisen, und es wird dann die Verlagerungsverteilung der Risskandidatenebene 7fc durch die probabilistische Inferenz aus der Likelihood-Verteilung und der A-priori-Verteilung berechnet (Schritt S3260). Dadurch können die Größe und die Position des Risses 9 zuverlässig und mit hoher Genauigkeit geschätzt werden.

[0102] Ferner ist der Schätzmodell-Erzeugungsschritt (Schritt S2200) so ausgelegt, dass er Folgendes aufweist: den Schritt (Schritt S2260), in dem ein Strukturanalysemodell aus dem Formmodell erzeugt wird, und aus dem Analyseergebnis, das durch Durchführen einer numerischen Analyse an allen Bereichen der Risskandidatenebene 7fc durch sequentielles Ändern der Randbedingung, an der der Riss 9 auftritt, erhalten wird, Information über Rissbereiche, die auftreten gelassen werden sollen, und das Analyseergebnis der Risskandidatenebene 7fc in Zuordnung zu dem Analyseergebnis der Beobachtungsebene 7fo gespeichert werden, und den Schritt (Schritte S2290 bis S2320), in dem die Vorrätskoeffizientenmatrix D und die Steifigkeitsmatrix G berechnet werden, um sie als die zugeordneten Informationen auszugeben, die für die Schätzung zu verwenden sind, wobei die Vorrätskoeffizientenmatrix D von der Rissebenenmatrix Δ_{crack} diff, die das gespeicherte Analyseergebnis der Risskandidatenebene 7fc in einer Matrix darstellt, auf die Beobachtungsebenenmatrix E_{measure} , die das Analyseergebnis der Beobachtungsebene 7fo in einer Matrix darstellt, abbildet, wobei die Steifigkeitsmatrix G die Relation zwischen der Last und der Verlagerung des Analyseergebnisses der Risskandidatenebene 7fc in einer Matrix darstellt. Dadurch kann der Riss 9 durch effizientes Lernen mit einer geringeren Menge an Rissdaten geschätzt werden.

[0103] In dem Schätzmodell-Erzeugungsschritt (Schritt S2200) ist es durch die Durchführung einer numerischen Analyse, bei der die Form oder die Bedingung derart geändert wird, dass die Freigabe von Verbindungen von einer der Mehrzahl von Elementen Efc, die durch Aufteilung der Risskandidatenebene 7fc oder der Verlagerung der Risskandidatenebene 7fc erhalten wird, zu dem gleichen Ergebnis führt wie in dem Fall, in dem der Riss 9 auftritt, auch möglich, einen Riss 9 durch effizientes Lernen mit einer geringeren Menge an Rissdaten zu schätzen.

[0104] Der Formmodell-Vorgabeschritt (Schritt S2100) ist so ausgelegt, dass er Folgendes aufweist: den Schritt zum Erlangen der Verteilung der auftretenden Spannung in der Zielstruktur 7 aus einer Messung oder einer Strukturanalyse, den Schritt zum Auswählen einer geeigneten Bewertungsspannung zum Bestimmen der Stelle des Auftretens des Risses 9 auf der Grundlage des Materials, das die Zielstruktur 7 bildet, und der Verteilung der auftretenden Spannung und den Schritt zum Bestimmen der Risskandidatenebene 7fc als einer Ebene, die rechtwinklig zu der Richtung der maximalen Hauptspannung an der Stelle des Auftretens verläuft und eine Ebene schneidet, die der Stelle des Auftretens in der Zielstruktur 7 zugewandt ist, wobei die Stelle des Auftretens des Risses 9 der Punkt ist, an dem die auftretende Spannung maximal ist. Dadurch können die Lerndaten vor der Durchführung der Überprüfung erstellt und die für die Überprüfung erforderliche Zeit verkürzt werden.

[0105] Ferner ist gemäß dem Fehlerdiagnoseverfahren einer rotierenden Maschine in der vorliegenden Anmeldung die Zielstruktur 7 ein rotierendes Maschinenelement, das einen von dem Rotor, der die rotierende Maschine 70 bildet, und dem Halterring, der auf das Ende des Rotors geschrumpft ist, aufweist, und das Verfahren ist dazu ausgelegt, jeden der Schritte aufzuweisen, die durch das vorstehend genannte Risschätzverfahren durchgeführt werden, den Schritt (Schritt S3300) zum Empfangen der Elementinformation, die die während des Betriebs der rotierenden Maschine 70 auf das rotierende Maschinenelement aufgebrachte Kraft sowie physikalische Eigenschaften des Materials, das das rotierende Maschinenelement bildet, enthält, den Schritt (Schritte S3310 bis S3320) zum Berechnen der verbleibenden Einsatzdauer durch Bestimmen der Ausbreitungslebensdauer des Risses unter Verwendung von Information über die Größe und die Position des Risses 9, die in dem Risszustands-Analyseschritt (Schritt S3200) erhalten worden ist, und Zielstrukturinformation und den Schritt (Schritt S5100) zum Anzeigen der berechneten Einsatzdauer. Dadurch kann die verbleibende Zeit bis zum Ausfall der rotierenden Maschine 70 genau diagnostiziert und mitgeteilt werden.

[0106] Oder die Zielstruktur 7 ist gemäß dem Fehlerdiagnoseverfahren einer rotierenden Maschine der vorliegenden Anmeldung das rotierende Maschinenelement, das einen von dem Rotor, der die rotierende Maschine 70 bildet, und dem Halterring, der auf das Ende des Rotors geschrumpft ist, aufweist, wobei dieses dazu ausgelegt ist, die Schritte aufzuweisen, die durch das vorstehend beschriebene Risschätzverfahren durchgeführt werden, den Schritt (Schritt S3340) zum Empfangen von Information über die Grenzbedingung des Risses, der in dem rotierenden Maschinenelement auftritt, und den Schritt (Schritte

S3350 bis S3370, Schritt S5200) zum Bestimmen, ob die Größe und die Position des Risses 9, die in dem Risszustands-Analyseschritt (Schritt S3200) erhalten worden sind, die Grenzbedingung überschreiten oder nicht, und zum Mitteilen des Auftretens eines Fehlers, wenn die Größe und die Position die Grenzbedingung überschreiten. Dadurch kann der Fehler der rotierenden Maschine 70 genau diagnostiziert und mitgeteilt werden.

Bezugszeichenliste

1	Risschätzvorrichtung
2	Modellerzeugungseinheit
21	Formmodell-Vorgabeeinheit
211	Prüflast-Vorgabeeinheit
22	Schätzmodell-Erzeugungseinheit
3	Risszustands-Analyseeinheit
31	Messdaten-Erfassungseinheit
311	Prüflast-Angabeeinheit
32	Risszustands-Schätzeinheit
5	Fehlerdiagnosevorrichtung
52	Endgerät
53	Alarmeinrichtung
6	Messeinrichtung (Messinstrument)
7	Zielstruktur
70	rotierende Maschine
7fc	Risskandidatenebene
7fo	Beobachtungsebene,
9	Riss
D	Vorwärtskoeffizientenmatrix
Efc	Element
Efo	Element
$E_{measure}$	Beobachtungsebenenmatrix
G	Steifigkeitsmatrix
Lt	Zuglast (externe Kraft)
Mb	Biegemoment (externe Kraft)
Pi	Innendruck (externe Kraft)
Δ_{ans}	Verlagerungsverteilung
Δ_{crack_diff}	Rissebenenmatrix
λ	Referenzwert (Bestimmungskriterien)

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

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

Zitierte Patentliteratur

- JP 2012 [0004]
- JP 159477 A [0004]

Patentansprüche

1. Risschätzvorrichtung, die Folgendes aufweist:

- eine Formmodell-Vorgabeeinheit zum Vorgeben eines Formmodells einer zu überprüfenden Zielstruktur, auf die eine externe Kraft aufgebracht wird, einer Risskandidatenebene, in der das Auftreten eines Risses in einem von Oberflächen des Formmodells aus verborgenen Bereich erwartet wird, und einer Beobachtungsebene, die als eine der Oberflächen des Formmodells zu messen ist,
- eine Schätzmodell-Erzeugungseinheit zum Erzeugen einer Matrix zum Schätzen eines Zustands der Risskandidatenebene aus einem Zustand der Beobachtungsebene unter Verwendung von Matrizen zum Zuordnen des Zustands der Risskandidatenebene zu dem Zustand der Beobachtungsebene, wobei die Matrizen durch eine numerische Analyse eines aus dem Formmodell erzeugten StrukturanalysemodeLLs erhalten werden; und
- eine Risszustands-Analyseeinheit zum Schätzen einer Position und einer Größe des Risses durch gleichzeitiges Erlangen der Verteilung von Last und Verlagerung in der Risskandidatenebene durch eine probabilistische Inferenz mittels Anwendung eines Beobachtungsebenen-Verformungsvektors, der eine Verformung der Beobachtungsebene angibt und der aus tatsächlichen Messwerten der Beobachtungsebene, der Matrix und einer latenten Variablen, die das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein des Risses in der Risskandidatenebene angibt, erhalten wird.

2. Risschätzvorrichtung nach Anspruch 1, wobei die Risszustands-Analyseeinheit die Größe und die Position des Risses aus einer A-posteriori-Verteilung zu einer Zeit bestimmt, zu der die A-posteriori-Verteilung mittels der latenten Variablen aktualisiert und konvergiert ist, wobei eine A-priori-Verteilung als eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Verlagerung der Risskandidatenebene definiert ist, die gleichzeitig mit der Last mittels der latenten Variablen erhalten wird, die eine Spärlichkeit der Verlagerung und der Last zeigt, die Reziprozität aufweisen, wobei die A-posteriori-Verteilung als eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Verlagerung der Beobachtungsebene definiert ist, die aus der A-priori-Verteilung und der Matrix berechnet wird.

3. Risschätzvorrichtung nach Anspruch 1 oder Anspruch 2, wobei eine Bayessche Schätzung für die probabilistische Inferenz verwendet wird.

4. Risschätzvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei für den Beobachtungsebenen-Verformungsvektor irgendeine von einer Verlagerungsänderung, einer Dehnungsänderung oder einer Winkeländerung der Beobachtungsebene verwendet wird.

5. Risschätzvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei

die externe Kraft eine Prüflast ist, die zu einer Zeit der Überprüfung der Zielstruktur aufgebracht wird; und ferner eine Prüflast-Vorgabeeinheit zum Vorgeben einer Position und einer Größe der Last und eine Prüflast-Angabeeinheit zum Anzeigen der Position und der Größe der vorgegebenen Prüflast zur Zeit der Überprüfung angeordnet sind.

6. Fehlerdiagnosevorrichtung, die Folgendes aufweist:

- eine Risschätzvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die Risschätzvorrichtung mit einem Messinstrument zum Messen der Beobachtungsebene der Zielstruktur verbunden ist und die Messdaten-Erfassungseinheit aufweist, die die Messwerte von dem Messinstrument erhält; und
- ein Endgerät zum Empfangen von Information über eine Grenzbedingung eines Risses in der Zielstruktur, zum Ausgeben der empfangenen Information über die Grenzbedingung an die Risschätzvorrichtung und zum Anzeigen eines Analyseergebnisses der Risschätzvorrichtung, wobei die Risszustands-Analyseeinheit bestimmt, ob die erhaltene Größe und Position des Risses die Grenzbedingung überschreiten oder nicht, und eine Fehlerauftretswarnung auf dem Endgerät anzeigt, wenn die Größe und die Position die Grenzbedingung überschreiten.

7. Fehlerdiagnosevorrichtung, die Folgendes aufweist:

- eine Risschätzvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die Risschätzvorrichtung mit einem Messinstrument zum Messen der Beobachtungsebene der Zielstruktur verbunden ist und die Messdaten-Erfassungseinheit aufweist, die die Messwerte von dem Messinstrument erhält; und
- ein Endgerät zum Empfangen von Elementinformation, die während des Betriebs einer Ausrüstung mit der Zielstruktur auf die Zielstruktur aufgebrachte Kraft sowie physikalische Eigenschaften eines Materials, das die Zielstruktur bildet, enthält, zum Ausgeben der empfangenen Elementinformation an die Risschätzvorrichtung und zum Anzeigen eines Analyseergebnisses der Risschätzvorrichtung, wobei die Risszustands-Analyseeinheit eine Ausbreitungslebensdauer des Risses aus der erhaltenen Größe und Position des Risses und der Elementinformation bestimmt und Information über eine verbleibende Einsatzdauer auf dem Endgerät anzeigt.

8. Risschätzverfahren, das Folgendes aufweist:

- einen Formmodell-Vorgabeschritt zum Vorgeben eines Formmodells einer zu überprüfenden Zielstruktur, auf die eine externe Kraft aufgebracht wird, einer Risskandidatenebene, in der das Auftreten eines Risses in einem von Oberflächen des Formmodells aus verborgenen Bereich erwartet wird;

ten eines Risses in einem von Oberflächen des Formmodells aus verborgenen Bereich erwartet wird, und einer Beobachtungsebene, die als eine der Oberflächen des Formmodells zu messen ist, - einen Schätzmodell-Erzeugungsschritt zum Erzeugen einer Matrix zum Schätzen eines Zustands der Risskandidatenebene aus einem Zustand der Beobachtungsebene unter Verwendung von Matrizen zum Zuordnen des Zustands der Risskandidatenebene zu dem Zustand der Beobachtungsebene, wobei die Matrizen durch eine numerische Analyse eines aus dem Formmodell erzeugten Strukturanalysemodells erhalten werden;

- einen Schritt zum Empfangen tatsächlicher Messwerte der Beobachtungsebene; und

- einen Risszustands-Analyseschritt zum Schätzen einer Position und einer Größe des Risses durch gleichzeitiges Erlangen der Verteilung von Last und Verlagerung in der Risskandidatenebene durch probabilistische Inferenz mittels Anwendung eines Beobachtungsebenen-Verformungsvektors, der die Verformung der Beobachtungsebene angibt und der aus den Messwerten, der Matrix und einer latenten Variablen, die das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein des Risses in der Risskandidatenebene angibt, erhalten wird.

9. Rissschätzverfahren nach Anspruch 8, wobei

in dem Risszustands-Analyseschritt eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Verlagerung der Risskandidatenebene, die aus dem Beobachtungsebenen-Verformungsvektor und einer Vorwärtskoeffizientenmatrix mittels der latenten Variablen geschätzt wird, als eine Likelihood-Verteilung berechnet wird, wobei die Vorwärtskoeffizientenmatrix von einer Rissebenenmatrix, die ein Analyseergebnis der Risskandidatenebene in einer Matrix darstellt, auf eine Beobachtungsebenenmatrix, die ein Analyseergebnis der Beobachtungsebene in einer Matrix darstellt, abbildet, wobei die Rissebenenmatrix und die Beobachtungsebenenmatrix in der Matrix enthalten sind, wobei der Beobachtungsebenen-Verformungsvektor eine Verformung der Beobachtungsebene der Zielstruktur darstellt;

eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Last und der Verlagerung in der Risskandidatenebene mittels der latenten Variablen geschätzt wird, die die Spärlichkeit der Last und der Verlagerung zeigt, um die erhaltene Wahrscheinlichkeitsverteilung der Last und der Verlagerung in der Risskandidatenebene als eine A-priori-Verteilung zu berechnen, wobei die Last und die Verlagerung Reziprozität aufweisen; und

eine Verlagerungsverteilung in der Risskandidatenebene durch eine probabilistische Inferenz aus der Likelihood-Verteilung und der A-priori-Verteilung berechnet wird.

10. Rissschätzverfahren nach Anspruch 8 oder 9, wobei der Schätzmodell-Erzeugungsschritt Folgendes aufweist:

einen Schritt, in dem das Strukturanalysemodell aus dem Formmodell erzeugt wird, und aus einem Analyseergebnis, das durch das Durchführen einer numerischen Analyse an allen Bereichen in der Risskandidatenebene durch sequentielles Ändern einer Randbedingung, an der der Riss auftritt, erhalten wird, Information über Rissbereiche, die auftreten gelassen werden sollen, und das Analyseergebnis der Risskandidatenebene in Zuordnung zu dem Analyseergebnis der Beobachtungsebene gespeichert werden, und einen Schritt, in dem die Vorwärtskoeffizientenmatrix und eine Steifigkeitsmatrix berechnet werden, um sie als zugeordnete Informationen auszugeben, die für die Schätzung zu verwenden sind, wobei die Vorwärtskoeffizientenmatrix von der Rissebenenmatrix, die das gespeicherte Analyseergebnis der Risskandidatenebene in einer Matrix darstellt, auf die Beobachtungsebenenmatrix, die das Analyseergebnis der Beobachtungsebene in einer Matrix darstellt, abbildet, wobei die Steifigkeitsmatrix eine Relation zwischen der Last und der Verlagerung des Analyseergebnisses der Risskandidatenebene darstellt.

11. Rissschätzverfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 10, wobei in dem Schätzungsmodell-Erzeugungsschritt eine numerische Analyse durchgeführt wird, bei der eine Form oder eine Bedingung derart geändert wird, dass die Freigabe von Verbindungen von einer Mehrzahl von Elementen, die durch Aufteilung der Risskandidatenebene oder der Verlagerung der Risskandidatenebene erhalten wird, zu dem gleichen Ergebnis führt wie in einem Fall, in dem der Riss auftritt.

12. Rissschätzverfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 11, wobei der Formmodell-Vorgabeschritt Folgendes aufweist:

einen Schritt zum Bestimmen einer Verteilung einer auftretenden Spannung in der Zielstruktur aus einer Messung oder einer Strukturanalyse, einen Schritt zum Auswählen einer geeigneten Bewertungsspannung zum Bestimmen einer Stelle des Auftretens des Risses auf der Grundlage eines Materials, das die Zielstruktur bildet, und einer Verteilung der auftretenden Spannung und einen Schritt zum Bestimmen der Risskandidatenebene als eine Ebene, die rechtwinklig zu einer Richtung der maximalen Hauptspannung an einer Stelle des Auftretens verläuft und eine Ebene schneidet, die der Stelle des Auftretens in der Zielstruktur zugewandt ist, wobei die Stelle des Auftretens des Risses ein Punkt ist, an dem die auftretende Spannung maximal ist.

13. Fehlerdiagnoseverfahren einer rotierenden Maschine, das Folgendes aufweist:

- jeden Schritt, der von dem Rissschätzverfahren

nach einem der Ansprüche 8 bis 12 durchgeführt wird; einen Schritt zum Empfangen von Elementinformation, die eine auf ein rotierendes Maschinenelement während des Betriebs der rotierenden Maschine aufgebrachte Kraft sowie physikalische Eigenschaften eines Materials, das das rotierende Maschinenelement bildet, enthält:

- einen Schritt zum Berechnen einer verbleibenden Einsatzdauer durch Bestimmen einer Ausbreitungslebensdauer eines Risses, die durch Verwendung von Information über eine Größe und Position des Risses, die in dem Risszustands-Analyseschritt erhalten worden ist, und der Elementinformation erhalten wird; und
- einen Schritt zum Anzeigen der berechneten Einsatzdauer, wobei die Zielstruktur das rotierende Maschinenelement ist, das einen von einem Rotor, der die rotierende Maschine bildet, und einem Halte ring, der auf ein Ende des Rotors geschrumpft ist, aufweist.

14. Fehlerdiagnoseverfahren einer rotierenden Maschine, das Folgendes aufweist:

jeden Schritt, der von dem Riss schätzverfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 12 durchgeführt wird;

einen Schritt zum Empfangen von Information über eine Grenzbedingung eines Risses, der in einem rotierenden Maschinenelement auftritt, und

einen Schritt zum Bestimmen, ob eine Größe und eine Position des Risses, die in dem Risszustands-Analyseschritt erhalten worden sind, die Grenzbedingung überschreiten oder nicht, und zum Mitteilen eines Auftretens eines Fehlers, wenn die Größe und die Position die Grenzbedingung überschreiten, wobei die Zielstruktur das rotierende Maschinenelement ist, das einen von einem Rotor,

der die rotierende Maschine bildet, und einem Halte ring, der auf ein Ende des Rotors geschrumpft ist, aufweist.

Es folgen 18 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

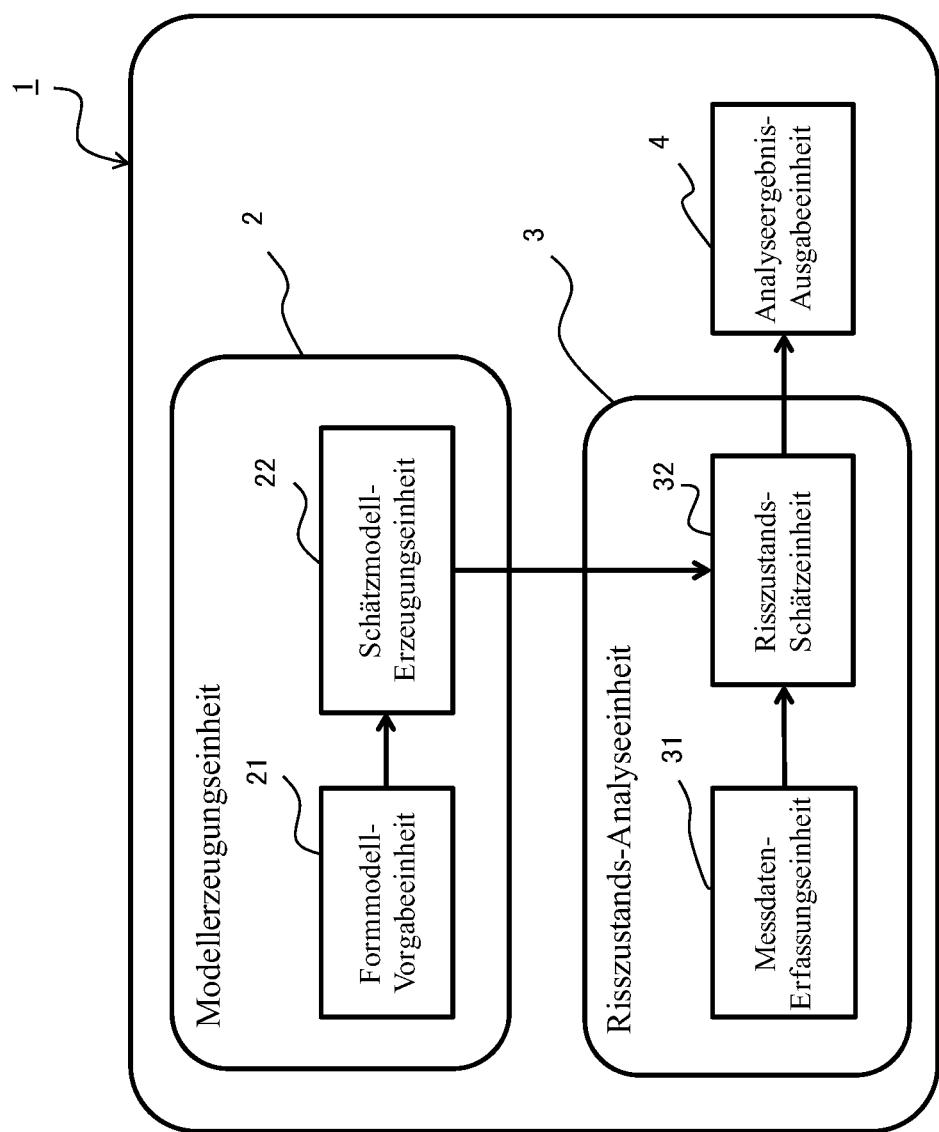


FIG. 1

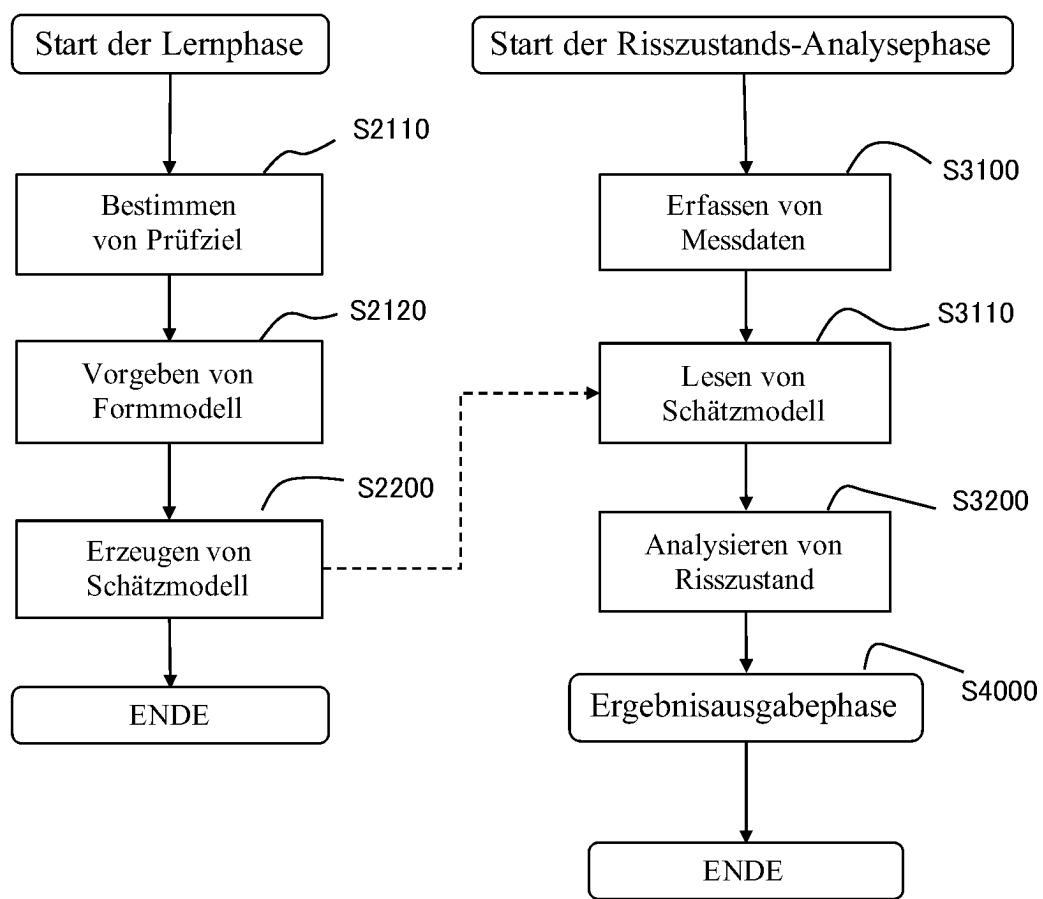


FIG. 2

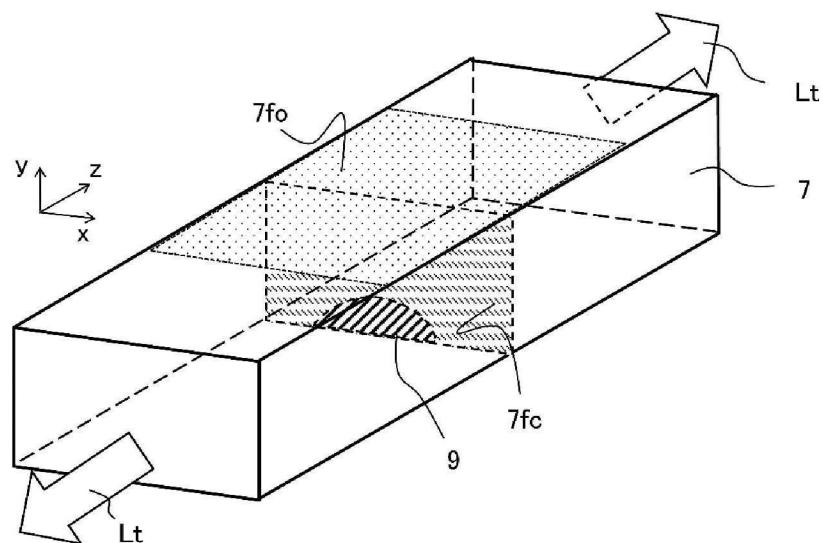


FIG. 3A

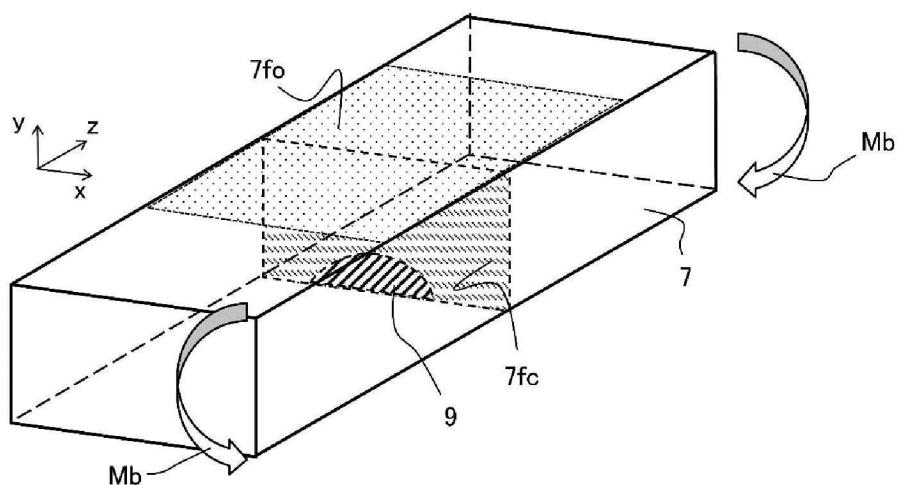


FIG. 3B

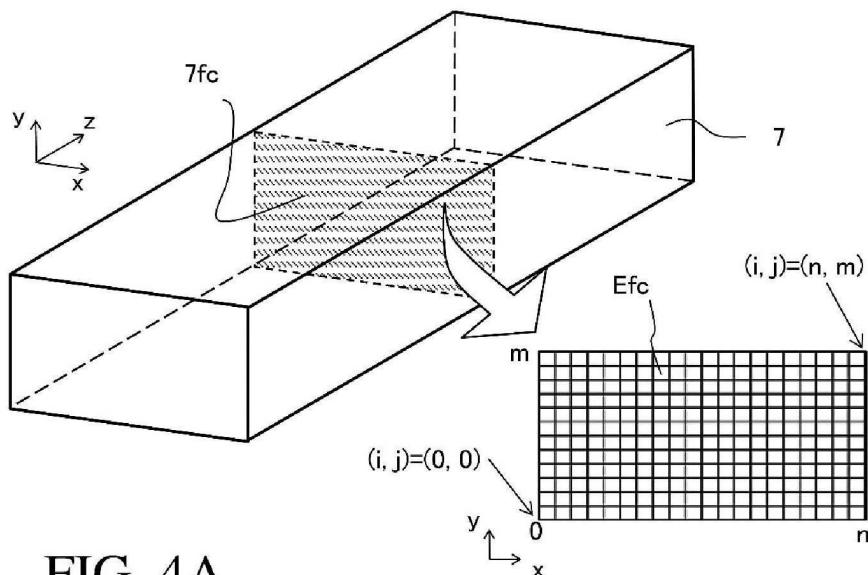


FIG. 4A

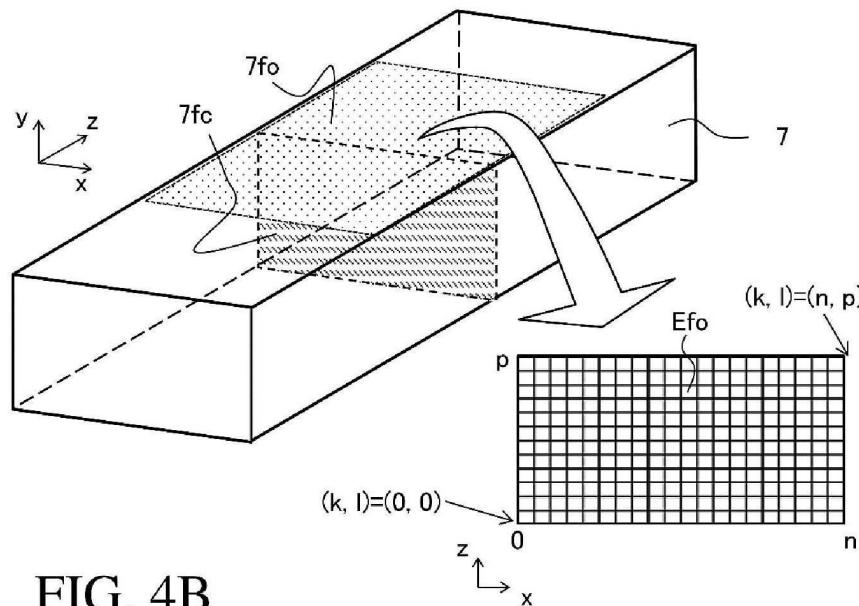


FIG. 4B

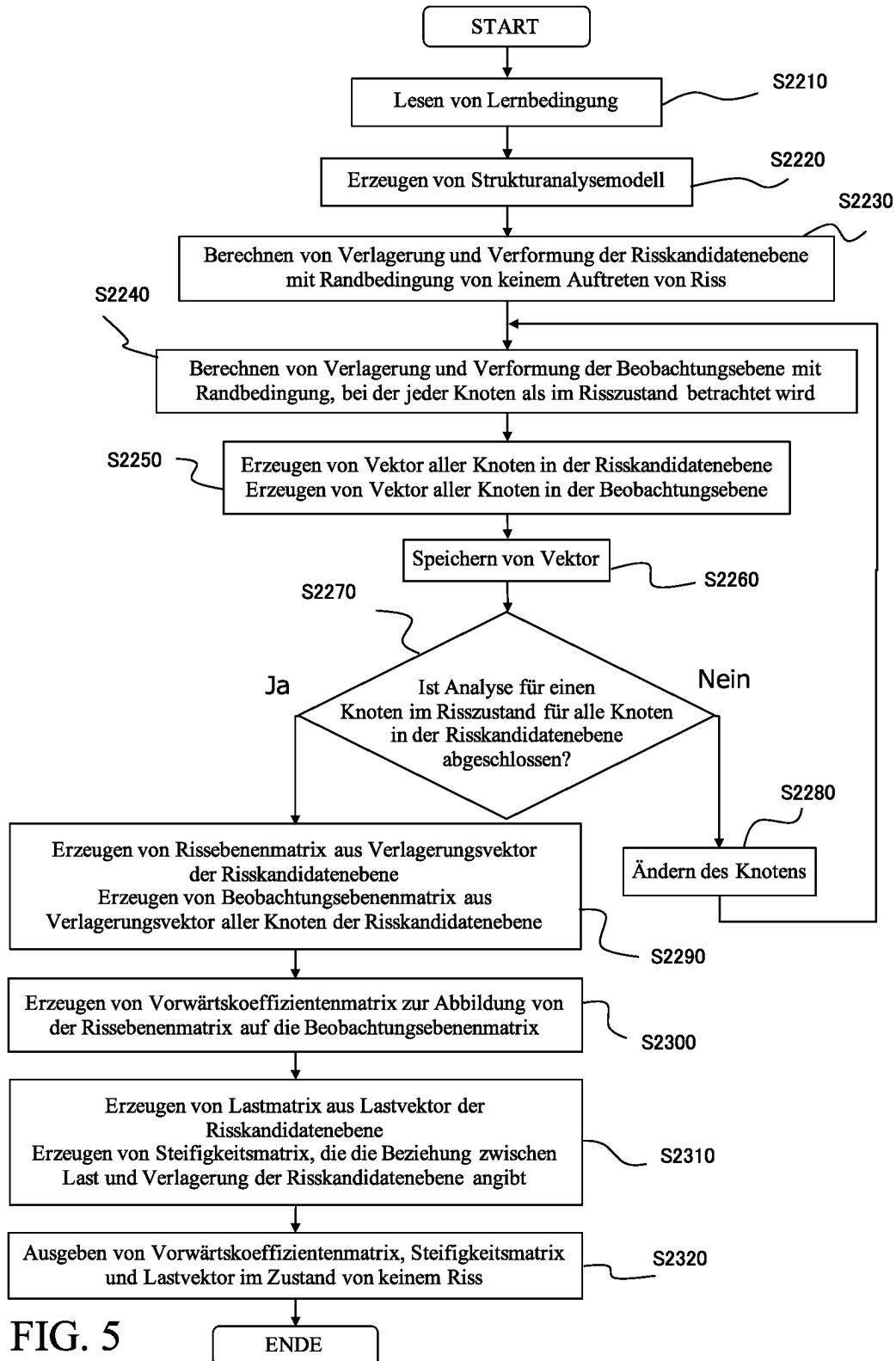


FIG. 5

Spaltenvektor der Verlagerungsänderung in der Risskandidatenebene

$$\Delta(0,0) = \begin{pmatrix} \delta(0,0) \\ \delta(1,0) \\ \vdots \\ \delta(n,0) \\ \delta(0,1) \\ \vdots \\ \delta(i,j) \\ \vdots \\ \delta(n,m) \end{pmatrix}$$

$$\Delta_{track_diff} = \begin{bmatrix} \Delta(0,0) & \cdots & \Delta(i,j) & \cdots & \Delta(n,m) \\ \delta_{0,0}(0,0) & \cdots & \delta_{i,j}(0,0) & \cdots & \delta_{n,m}(0,0) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{0,0}(i,j) & \cdots & \delta_{i,j}(i,j) & \cdots & \delta_{n,m}(i,j) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{0,0}(n,m) & \cdots & \delta_{i,j}(n,m) & \cdots & \delta_{n,m}(n,m) \end{bmatrix}$$

$\delta_{i,j}(i,j)$: Verlagerungsänderung am Knoten der Koordinaten (i, j) in der Risskandidatenebene im Ergebnis der Strukturanalyse, in dem der Knoten der Koordinaten (i, j) in der Risskandidatenebene als im Risszustand betrachtet wird.

$$\Delta(0,0) = \begin{pmatrix} \delta_{0,0}(0,0) \\ \vdots \\ \delta_{0,0}(i,j) \\ \vdots \\ \delta_{0,0}(n,m) \end{pmatrix} \cdots \Delta(i,j) = \begin{pmatrix} \delta_{i,j}(0,0) \\ \vdots \\ \delta_{i,j}(i,j) \\ \vdots \\ \delta_{i,j}(n,m) \end{pmatrix} \cdots \Delta(n,m) = \begin{pmatrix} \delta_{n,m}(0,0) \\ \vdots \\ \delta_{n,m}(i,j) \\ \vdots \\ \delta_{n,m}(n,m) \end{pmatrix}$$

FIG. 6

Spaltenvektor der Dehnungsänderung
in der Beobachtungsebene

$$\mathbf{E}(0,0) = \begin{pmatrix} \varepsilon(0,0) \\ \varepsilon(1,0) \\ \vdots \\ \varepsilon(n,0) \\ \varepsilon(0,1) \\ \vdots \\ \varepsilon(k,l) \\ \vdots \\ \varepsilon(n,p) \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{Matrix der Dehnungsänderung in der Beobachtungsebene}} \mathbf{E}_{\text{measure}}$$

$$\mathbf{E}_{\text{measure}} = [\mathbf{E}(0,0) \ \cdots \ \mathbf{E}(i,j) \ \cdots \ \mathbf{E}(n,p)]$$

$$= \begin{bmatrix} \varepsilon_{0,0}(0,0) & \cdots & \varepsilon_{i,j}(0,0) & \cdots & \varepsilon_{n,p}(0,0) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varepsilon_{0,0}(k,l) & \cdots & \varepsilon_{i,j}(k,l) & \cdots & \varepsilon_{n,p}(k,l) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varepsilon_{0,0}(n,p) & \cdots & \varepsilon_{i,j}(n,p) & \cdots & \varepsilon_{n,p}(n,p) \end{bmatrix}$$

$\varepsilon_{i,j}(k,l)$: Dehnungsänderung am Knoten der Koordinaten (k, l) in der Beobachtungsebene
im Ergebnis der Strukturanalyse, in dem der Knoten der Koordinaten (i, j) in der
Risskandidatenebene als im Risszustand betrachtet wird.

$$\mathbf{E}(0,0) = \begin{pmatrix} \varepsilon_{0,0}(0,0) \\ \vdots \\ \varepsilon_{0,0}(k,l) \\ \vdots \\ \varepsilon_{0,0}(n,p) \end{pmatrix} \cdots \mathbf{E}(i,j) = \begin{pmatrix} \varepsilon_{i,j}(0,0) \\ \vdots \\ \varepsilon_{i,j}(k,l) \\ \vdots \\ \varepsilon_{i,j}(n,p) \end{pmatrix} \cdots \mathbf{E}(n,p) = \begin{pmatrix} \varepsilon_{n,p}(0,0) \\ \vdots \\ \varepsilon_{n,p}(k,l) \\ \vdots \\ \varepsilon_{n,p}(n,p) \end{pmatrix}$$

FIG. 7

Spaltenvektor der Laständerung in der Risskandidatenebene

$$\begin{aligned}
 \mathbf{z}(0,0) &= \begin{pmatrix} \zeta(0,0) \\ \zeta(1,0) \\ \vdots \\ \zeta(n,0) \\ \zeta(0,1) \\ \vdots \\ \zeta(i,j) \\ \vdots \\ \zeta(n,m) \end{pmatrix} \\
 &= \mathbf{z}_{\text{rack_diff}} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}(0,0) & \cdots & \mathbf{z}(i,j) & \cdots & \mathbf{z}(n,m) \\ \zeta_{0,0}(0,0) & \cdots & \zeta_{i,j}(0,0) & \cdots & \zeta_{n,m}(0,0) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \zeta_{0,0}(i,j) & \cdots & \zeta_{i,j}(i,j) & \cdots & \zeta_{n,m}(i,j) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \zeta_{0,0}(n,m) & \cdots & \zeta_{i,j}(n,m) & \cdots & \zeta_{n,m}(n,m) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$\zeta_{i,j}(i,j)$: Reaktionskraftänderung am Knoten der Koordinaten (i, j) in der Risskandidatenebene im Ergebnis der Strukturanalyse, in dem der Knoten der Koordinaten (i, j) in der Risskandidatenebene als im Risszustand betrachtet wird.

$$\mathbf{z}(0,0) = \begin{pmatrix} \zeta_{0,0}(0,0) \\ \vdots \\ \zeta_{0,0}(i,j) \\ \vdots \\ \zeta_{0,0}(n,m) \end{pmatrix} \cdots \mathbf{z}(i,j) = \begin{pmatrix} \zeta_{i,j}(0,0) \\ \vdots \\ \zeta_{i,j}(i,j) \\ \vdots \\ \zeta_{i,j}(n,m) \end{pmatrix} \cdots \mathbf{z}(n,m) = \begin{pmatrix} \zeta_{n,m}(0,0) \\ \vdots \\ \zeta_{n,m}(i,j) \\ \vdots \\ \zeta_{n,m}(n,m) \end{pmatrix}$$

FIG. 8

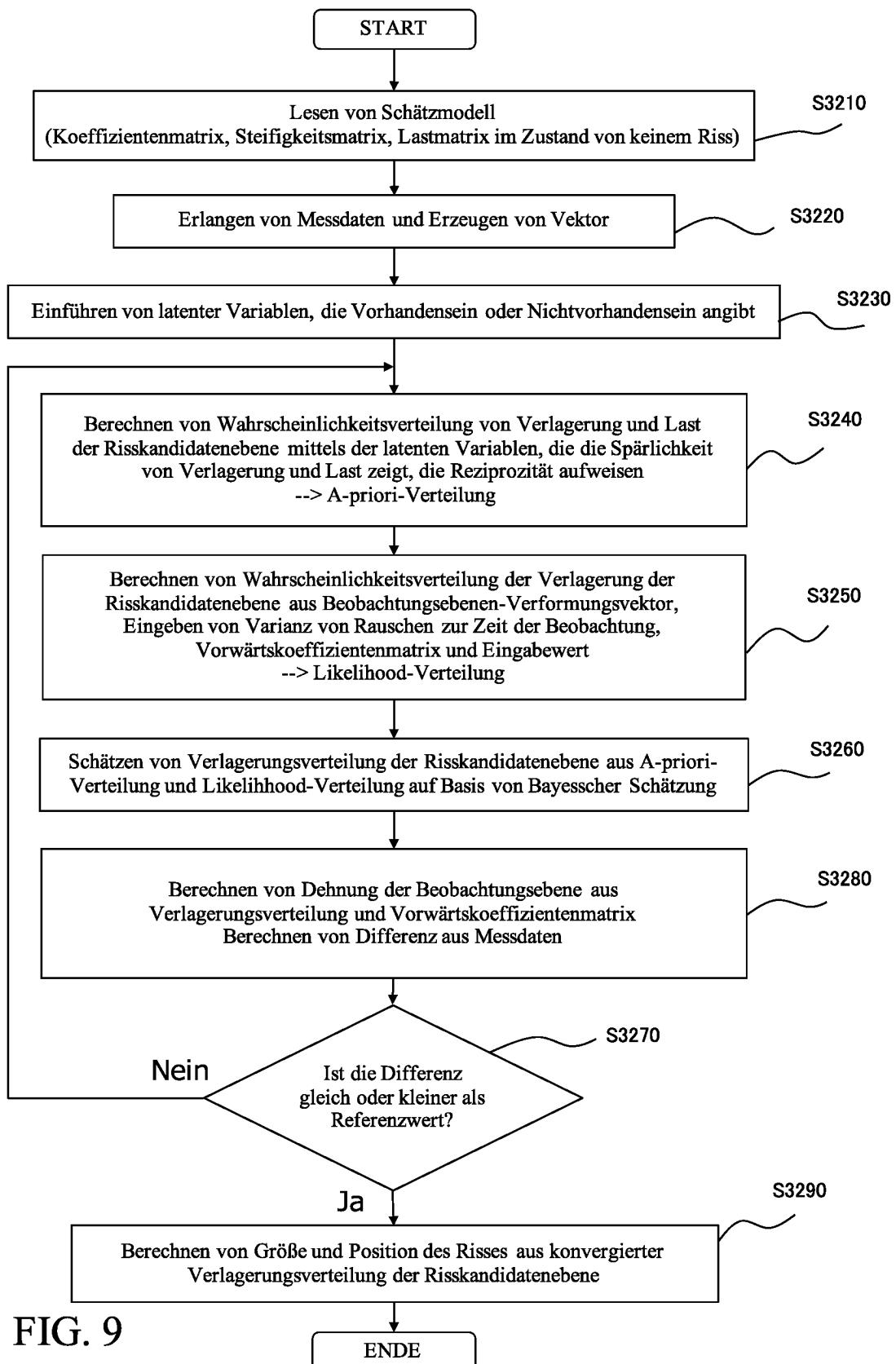


FIG. 9

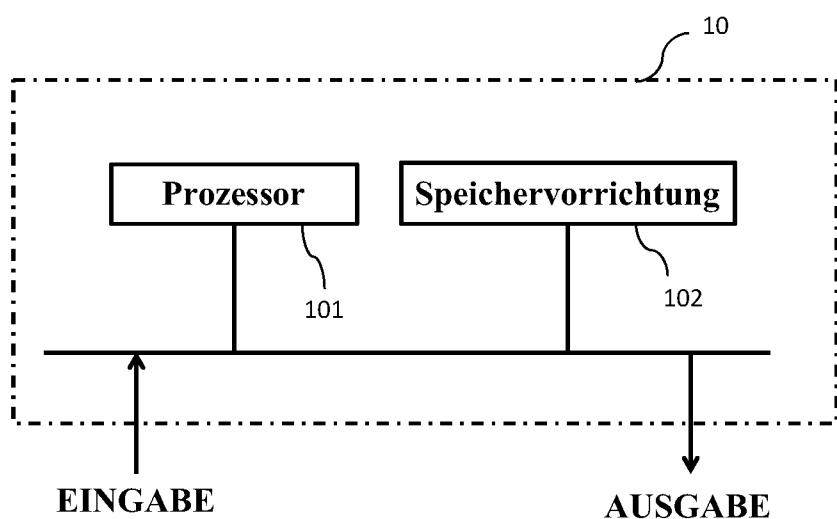


FIG. 10

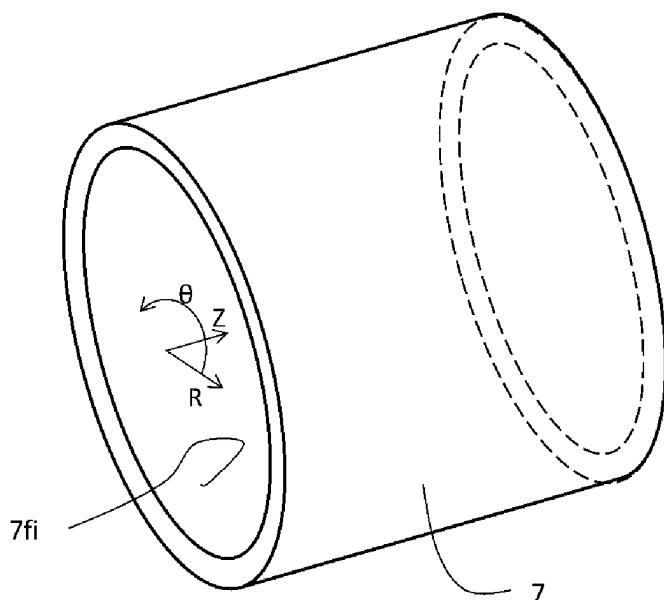


FIG. 11A

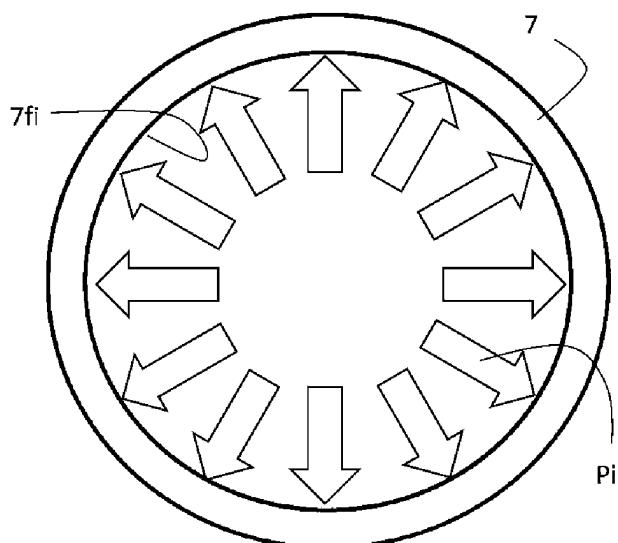


FIG. 11B

Spaltenvektor der Verlagerungsänderung in der Beobachtungsebene

$$\begin{aligned}
 \mathbf{d}(0,0) & \quad \text{Dis}_{\text{measure}} \\
 \mathbf{d}(1,0) & \\
 \vdots & \\
 \mathbf{d}(n,0) & \\
 \mathbf{d}(0,1) & \\
 \vdots & \\
 \mathbf{d}(k,1) & \\
 \vdots & \\
 \mathbf{d}(n,p) & \\
 \mathbf{d}(0,0) & \quad \text{Dis}(0,0) \quad \dots \quad \text{Dis}(i,j) \quad \dots \quad \text{Dis}(n,p) \\
 & = \begin{bmatrix} \text{Dis}(0,0) & \dots & \text{Dis}(i,j) & \dots & \text{Dis}(n,p) \\ d_{0,0}(0,0) & \dots & d_{i,j}(0,0) & \dots & d_{n,p}(0,0) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{0,0}(k,1) & \dots & d_{i,j}(k,1) & \dots & d_{n,p}(k,1) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{0,0}(n,p) & \dots & d_{i,j}(n,p) & \dots & d_{n,p}(n,p) \end{bmatrix} \\
 \mathbf{d}(0,0) & = \begin{pmatrix} d_{0,0}(0,0) \\ \vdots \\ d_{0,0}(k,1) \\ \vdots \\ d_{0,0}(n,p) \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

$d_{i,j}(k,1)$: Verlagerungsänderung am Knoten der Koordinaten $(k, 1)$ in der Beobachtungsebene im Ergebnis der Strukturanalyse, in dem der Knoten der Koordinaten (i, j) in der Risskandidatenebene als im Risszustand betrachtet wird.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{d}(0,0) & \quad \text{Dis}(0,0) \\
 & = \begin{pmatrix} d_{0,0}(0,0) \\ \vdots \\ d_{0,0}(k,1) \\ \vdots \\ d_{0,0}(n,p) \end{pmatrix} \quad \dots \quad \text{Dis}(i,j) = \begin{pmatrix} d_{i,j}(0,0) \\ \vdots \\ d_{i,j}(k,1) \\ \vdots \\ d_{i,j}(n,p) \end{pmatrix} \quad \dots \quad \text{Dis}(n,p) = \begin{pmatrix} d_{n,p}(0,0) \\ \vdots \\ d_{n,p}(k,1) \\ \vdots \\ d_{n,p}(n,p) \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

FIG. 12

Spaltenvektor der Winkeländerung
in der Beobachtungsebene

A_{measure}

$$A(0,0) = \begin{pmatrix} a(0,0) \\ a(1,0) \\ \vdots \\ a(n,0) \\ a(0,1) \\ \vdots \\ a(k,l) \\ \vdots \\ a(n,p) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A(0,0) & \cdots & A(i,j) & \cdots & A(n,p) \\ a_{0,0}(0,0) & \cdots & a_{i,j}(0,0) & \cdots & a_{n,p}(0,0) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{0,0}(k,l) & \cdots & a_{i,j}(k,l) & \cdots & a_{n,p}(k,l) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{0,0}(n,p) & \cdots & a_{i,j}(n,p) & \cdots & a_{n,p}(n,p) \end{bmatrix}$$

Matrix der Winkeländerung
in der Beobachtungsebene

$a_{i,j}(k,l)$: Winkeländerung am Knoten der Koordinaten (k, l) in der Beobachtungsebene
im Ergebnis der Strukturanalyse, in dem der Knoten der Koordinaten (i, j) in der
Risskandidatenebene als im Risszustand betrachtet wird.

$$A(0,0) = \begin{pmatrix} a_{0,0}(0,0) \\ a_{0,0}(k,l) \\ \vdots \\ a_{0,0}(n,p) \end{pmatrix} \cdots A(i,j) = \begin{pmatrix} a_{i,j}(0,0) \\ \vdots \\ a_{i,j}(k,l) \\ \vdots \\ a_{i,j}(n,p) \end{pmatrix} \cdots A(n,p) = \begin{pmatrix} a_{n,p}(0,0) \\ \vdots \\ a_{n,p}(k,l) \\ \vdots \\ a_{n,p}(n,p) \end{pmatrix}$$

FIG. 13

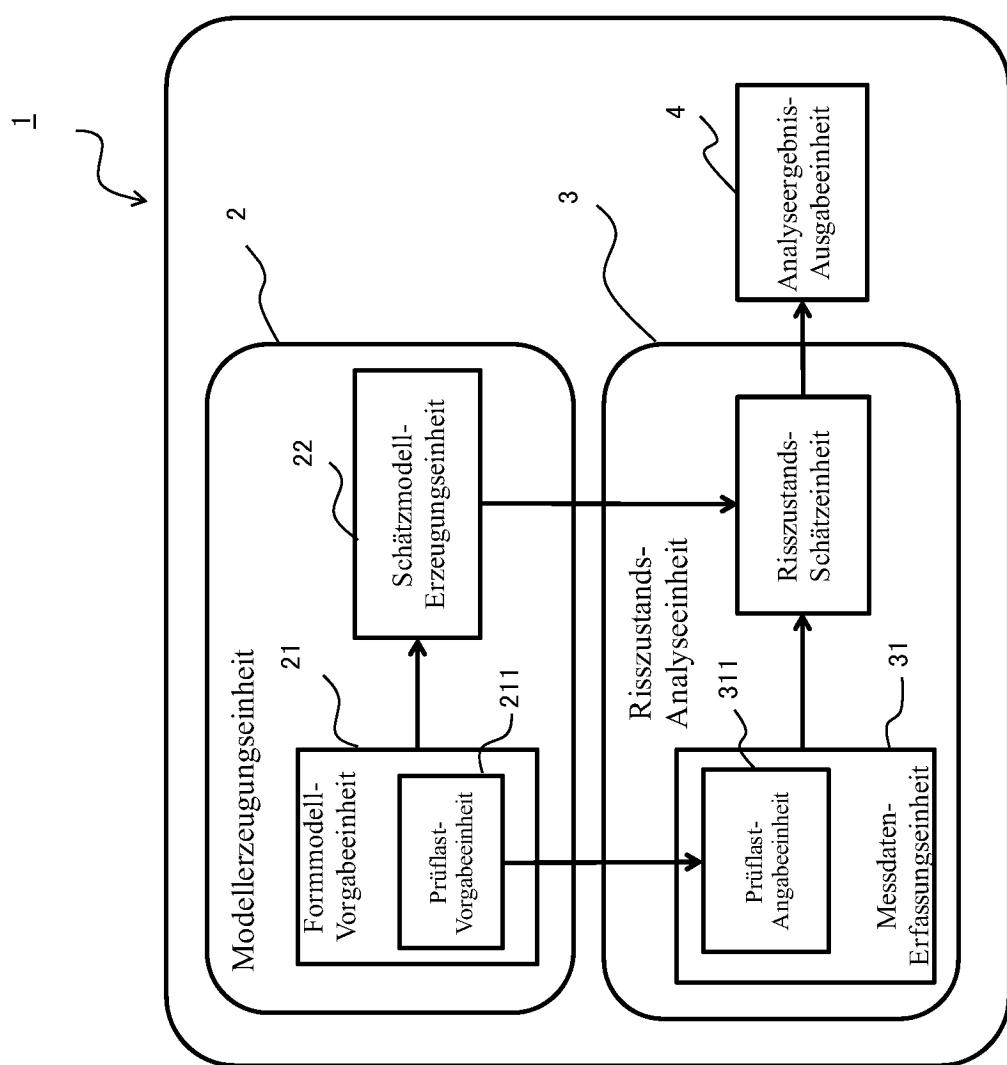


FIG. 14

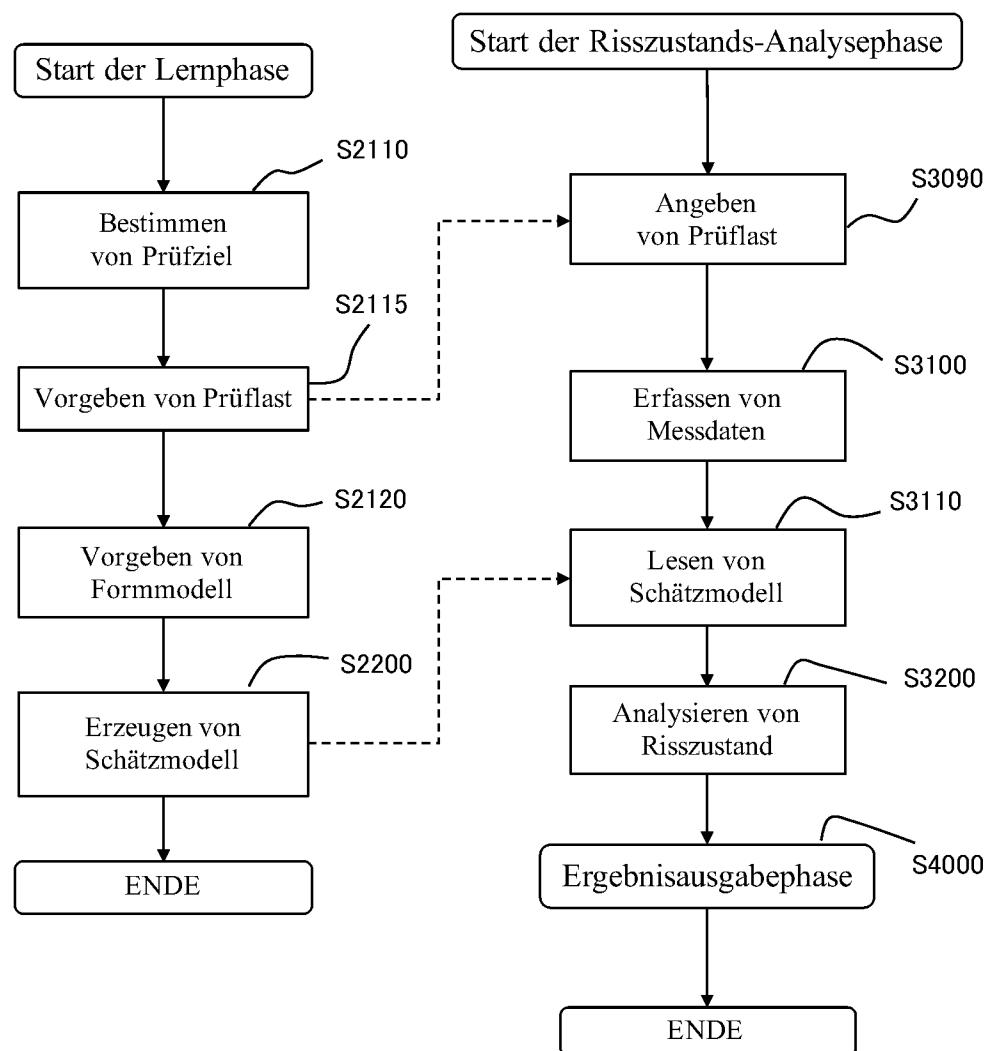


FIG. 15

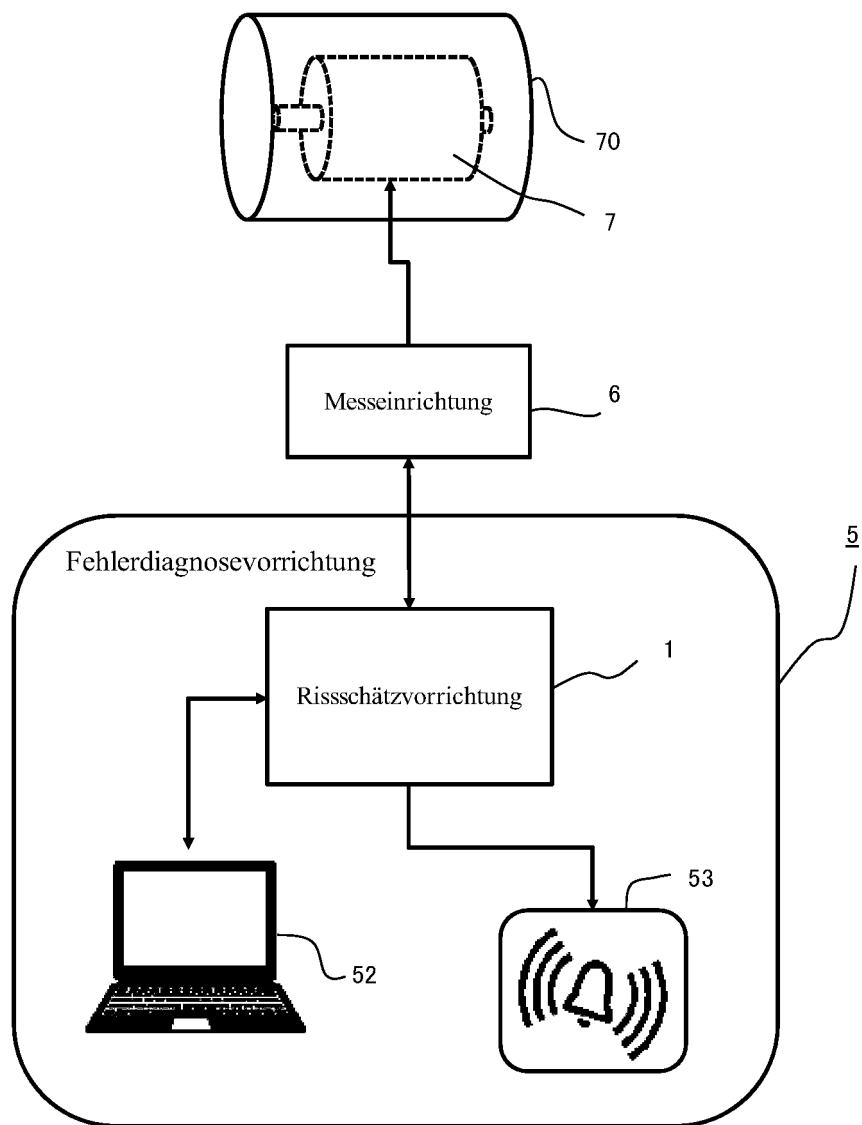


FIG. 16

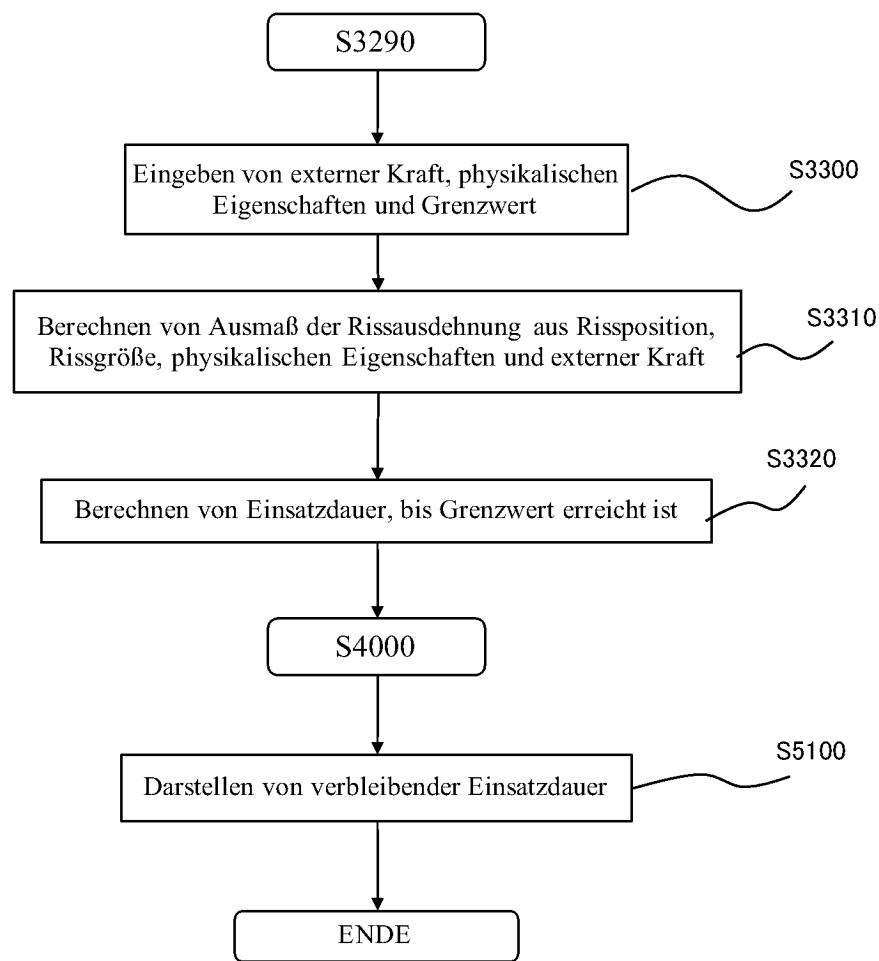


FIG. 17

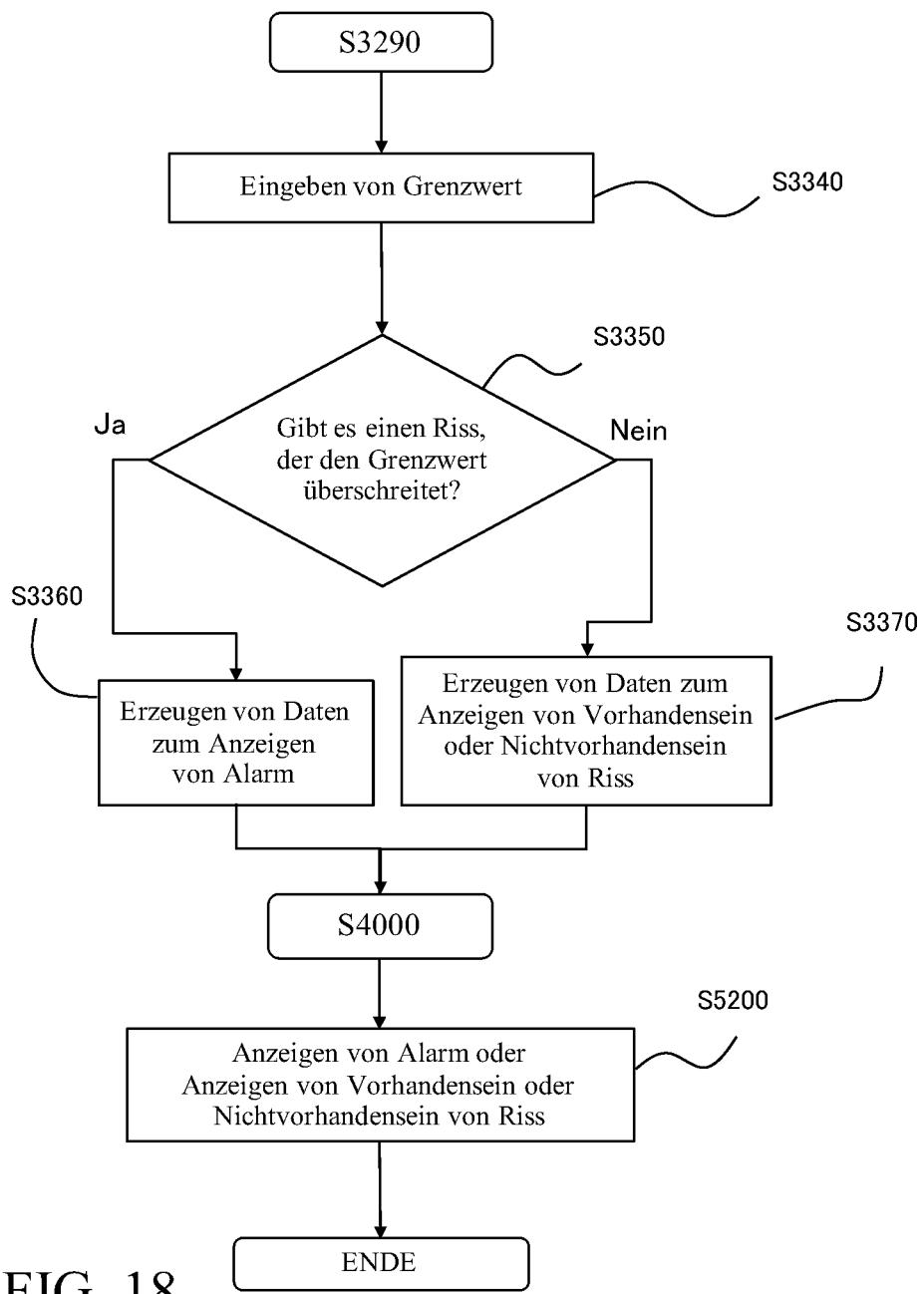


FIG. 18