



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 697 32 569 T2** 2006.01.26

(12)

Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 0 909 380 B1**

(51) Int Cl.⁸: **G01M 15/00** (2006.01)

(21) Deutsches Aktenzeichen: **697 32 569.5**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/TR97/00008**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **97 927 586.4**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 97/049977**

(86) PCT-Anmeldetag: **20.06.1997**

(87) Veröffentlichungstag
der PCT-Anmeldung: **31.12.1997**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **21.04.1999**

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **23.02.2005**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **26.01.2006**

(30) Unionspriorität:

96527 24.06.1996 TR

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**AT, BE, CH, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LI,
LU, MC, NL, PT, SE**

(73) Patentinhaber:

**Arcelik A.S., Tuzla, Istanbul, TR; Duyar, Ahmet,
Istanbul, TR**

(72) Erfinder:

**DUYAR, Ahmet, Istanbul, TR; DURAKBASA,
Osman Tugrul, 81020 Istanbul, TR; ALBAS, Evren,
Sarikonak Apt. D. 11, 81090 Istanbul, TR;
SERAFETTINOGLU, Hakan, A., 81030
Ciftehavuzlar, TR**

(74) Vertreter:

LOUIS, PÖHLAU, LOHRENTZ, 90409 Nürnberg

(54) Bezeichnung: **SYSTEM ZUR ERKENNUNG VON STÖRUNGEN VON ELEKTROMOTOREN**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

ALGEMEINER STAND DER TECHNIK

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft Elektromotoren. Insbesondere betrifft die vorliegende Erfindung ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Zustandsüberwachung und prädiktiven Wartung von Elektromotoren.

[0002] Elektromotoren werden weithin in industriellen Anlagen und Prozessen genutzt, wo solche Motoren dazu verwendet werden, Produkte entlang eines Montagebandes von einer Arbeitsstation zu einer anderen zu bewegen, oder wo solche Motoren als Antriebsquelle für Elektrowerkzeuge dienen, die von den Montagearbeitern benutzt werden.

[0003] Ein Beispiel wären Luftkompressoren, die mechanische Schraubendreher, Spritzpistolen und andere kleine handgehaltene Werkzeuge mit Druckluft versorgen. Leistungsstarke Elektromotoren helfen bei der Klimatisierung der Umgebung, indem sie Luft mittels der Klimaanlage in Gebäuden und Fahrzeugen kühlen, erwärmen und transportieren. In Haushalt- und Büroumgebungen werden Elektromotoren in Geräten eingesetzt, die von Computern bis Staubsaugern reichen. Wie allgemein bekannt ist, sind derartige Geräte eine der Hauptquellen von Geräuschen und Vibrationen. Aus diesem Grund kann die stetig zunehmende Nachfrage des Marktes nach leiseren und vibrationsfreien Motoren nur durch die Konstruktion und Produktion von störungsfrei und leiser arbeitenden Motoren befriedigt werden.

[0004] In Produktionsumgebungen ist der unerwartete Ausfall des Motors ebenso unerwünscht wie kostspielig. In der Industrie könnte ein Motorausfall drastische finanzielle Auswirkungen haben, wenn ein Montageband für die Dauer der Reparatur oder des Austauschs des Motors abgeschaltet wird. Außerdem könnte bei einigen Fertigungsprozessen, wie beispielsweise in einer Halbleiterproduktionsstätte, der Ausfall eines wichtigen Motors zu Schäden am Produkt führen, wenn die Kontrolle über die Umgebungsbedingungen verloren geht.

[0005] Dementsprechend gibt es den zunehmenden Wunsch nach Verbesserung der Zuverlässigkeit von Elektromotoren im Allgemeinen und nach Erkennung bevorstehender Defekte in industriellen Maschinen und Anlagen im Besonderen, damit die Motoren während der planmäßigen Wartung repariert und ausgetauscht werden können, anstatt nach einem plötzlichen Ausfall. Es ist ebenso wünschenswert, die Zuverlässigkeit von Elektromotoren durch eine verbesserte Qualitätskontrolle während der Herstellung der Elektromotoren zu verbessern. Es ist des Weiteren wünschenswert, Motordefekte vor einem plötzlichen Totalausfall durch eine Leistungsüberwachung während des Betriebes zu erkennen.

[0006] Die europäische Patentanmeldung Nr. 0.632.283 offenbart ein Verfahren zum Ermitteln wenigstens eines Betriebsparameters zur Feststellung des Betriebszustandes eines mehrphasigen Elektromotorensystems, welches das Erfassen des augenblicklichen Stromsignals und des augenblicklichen Spannungssignals in Abhängigkeit von der Zeit für mehr als eine einzige elektrische Phase des Motors umfasst. Die erfassten Stromsignale und die erfassten Spannungssignale werden sowohl amplituden- als auch phasendemoduliert. Die resultierenden amplituden- und phasendemodulierten Signale dienen der Ermittlung eines oder mehrerer der folgenden elektrischen Parameter in Abhängigkeit von der Zeit: Gesamtwirkleistung, Wirkleistung je Phase, Gesamtblindleistung, Blindleistung je Phase, Gesamtscheinleistung, Scheinleistung je Phase, Gesamtleistungsfaktor, Leistungsfaktor je Phase, elektrischer Scheinwiderstand je Phase und elektrisches Gleichgewicht. Diese Berechnungen sind jedoch langwierig und verringern die Gesamtleistung des Störungserkennungssystems.

[0007] Das Dokument EP 0.659.996, das zum Stand der Technik gehört, erklärt eine Erfindung, die eine Vorrichtung zum Diagnostizieren und Steuern eines Verbrennungsmotors oder Elektromotors betrifft, wobei in der Vorrichtung Signale wie beispielsweise Klang, Temperatur, Spannung und andere Signale von entsprechenden Sensoren empfangen und unter Verwendung eines neuronalen Netzes mittels einer Fuzzy-Logik ausgewertet werden und dazu benutzt werden, den Verbrennungs- oder Elektromotor zu steuern und Störungen zu diagnostizieren und zu lokalisieren. Ein Nachteil eines solchen Systems ist, dass zum Messen von Klang und Temperatur Spannungs- oder Stromsignale, die von den Sensoren erzeugt werden, entsprechend einer Kalibrierungskurve zu diesen Werten umgewandelt werden müssen. Diese Vorgehensweise verkompliziert das Störungserkennungsverfahren zusätzlich und trägt unvermeidliche Fehler in dieses Verfahren hinein.

[0008] In jüngster Vergangenheit wurden Störungserkennungs- und Diagnoseverfahren entwickelt, welche die Ausgabesignale komplexer Systeme mit den Ausgabesignalen vergleichen, die von einem mathematischen Modell des störungsfreien Systems stammen. Der Vergleich dieser Signale wird in Form eines "Residuums" quantifiziert, bei dem es sich um die Differenz zwischen den beiden Signalen handelt. Um die Störungsart

zu ermitteln, werden die Residuen analysiert. Diese Analyse beinhaltet statistische Verfahren zum Vergleichen der Residuen mit einer Datenbank aus Residuen für Systeme mit bekannten Störungen.

[0009] Noch bis vor kurzem war es schwierig, präzise Echtzeitmodelle für Mehrvariablensysteme zu erhalten, d. h. Systeme mit mehr als einem einzigen Eingabe- und/oder Ausgabewert. Wenn das Modell des Systems nicht präzise ist, so enthalten die Residuen Modellierungsfehler, die nur sehr schwer von den Wirkungen echter Störungen zu trennen sind.

[0010] Ein weiterer Schwachpunkt solcher FDD-Verfahren betrifft die Schwierigkeit beim Erstellen einer Datenbank zum statistischen Testen von Residuen zur Klassifizierung von Störungen. Um eine solche Datenbank zu entwickeln, braucht man von vornherein vorliegende Informationen über alle möglichen Störungen und die Art und Weise, in der sich jede dieser Störungen auf die Residuen auswirkt.

[0011] Dementsprechend ist ein Zeitraum erforderlich, um defekte und normale Ausrüstung zu überwachen und eine Datenbank zu erstellen, die Störungssignaturen enthält, um Störungen klassifizieren zu können. Dieser Prozess ist ebenso kostspielig wie zeitaufwändig. Des Weiteren muss die Datenbank den spezifischen Anforderungen eines bestimmten FDD-Regimes entsprechen.

[0012] Da mechanische Störungen das Ergebnis von Vibrationen sind, ist das Erkennen und die Analyse von Vibrationen ein übliches Element vieler Erkennungsregimes nach dem Stand der Technik. Derartige Techniken erfordern die Erstellung einer Bibliothek, die bekannte Motorvibrationsmuster enthält, die mit der erkannten Störung korreliert werden.

[0013] Ein häufiger Nachteil bei der Erkennung von mechanischen Störungen besteht darin, dass das Regime bereits vorliegende Informationen über die Störungssignatur erfordert, um die echte Störung mit der erkannten Signatur zu korrelieren. Eine derartige Korrelation erfordert die Erstellung einer umfassenden Datenbank und eine aufwändige Analyse sowie eine gewisse Kenntnis des Motors.

[0014] Ein weiterer Nachteil bei der Erkennung von mechanischen Störungen erwächst aus der Schwierigkeit, die Messungen zu reproduzieren. Beispielsweise hängen Vibrationsmessungen mit Hilfe eines Beschleunigungsmessers stark von der Anbringungsmethode und der Positionierung des Sensors ab, um eine wiederholbare Erkennung der Signatur zu gewährleisten.

[0015] Doch selbst bei ordnungsgemäßer Anbringung und Positionierung des Sensors kann die Signaturerkennung durch Hintergrundvibrationen und Veränderungen bei den Betriebsbedingungen wie beispielsweise Drehzahl, Eingangsspannung und Motorlast beeinträchtigt werden.

[0016] Es leuchtet ein, dass die Wahrscheinlichkeit einer fehlerhaften Anzeige von Störungen in einem System, das sich auf die Erkennung mechanischer Störungen gründet, hoch ist. Beispielsweise erfordert die Beurteilung des Zustandes der Lager des Motors die Analyse der mechanischen Schwingungen des Motors und das Herausfiltern der spezifischen Frequenzen, die sich nur auf Lagerschäden beziehen (und/oder aller Summen- und Differenzfrequenzen und zugehörigen Oberschwingungen). Leider stören das Vorhandensein anderer Schwingungen im Vibrationsspektrum sowie die mögliche Übereinstimmung mit anderen Schwingungen im Vibrationsspektrum die Erkennung des gewünschten Signals. Es sind teure und hoch-komplizierte Mittel erforderlich, um die gewünschten Informationen zu gewinnen, und der Erfolg eines solchen Systems beim Erkennen oder Vorhersagen einer Störung lässt stark zu wünschen übrig.

[0017] Dementsprechend ist es wünschenswert, die Komplikationen zu beseitigen, die durch Modellierungsfehler und durch falsche oder ausbleibende Anzeigen von Motorstörungen verursacht werden. Es ist ebenfalls wünschenswert, keine umfassende Datenbank erstellen und keine Expertise bei der Analyse der Ursachen für Störungen in Elektromotoren mühevoll erwerben zu müssen. Es ist des Weiteren wünschenswert, keine teuren und komplizierten Mittel zum Gewinnen und Verarbeiten von Informationen, die das Vorliegen einer Störung anzeigen können, mehr zu benötigen.

KURZDARSTELLUNG DER ERFINDUNG

[0018] Die vorliegende Erfindung betrifft ein modellgestütztes System zur Erkennung von Störungen und ein Verfahren zum Überwachen und Vorhersagen von Wartungsbedarf von Elektromotoren und insbesondere von Kleinelektromotoren. Mittels dieses Systems ist es möglich, Informationen zur Frühdiagnose eines bevorstehenden mechanischen Ausfalls des Elektromotors in der Betriebsumgebung unter unbekannten Lastzustän-

den zu gewinnen. Da das Verfahren und das System der vorliegenden Erfindung softwaregestützt sind und mit Daten arbeiten, die mittels nicht-intrusiver Messungen gewonnen werden, sind die Implementierungskosten wesentlich niedriger als Wartungsverfahren nach dem Stand der Technik.

[0019] Das System umfasst ein Computermittel, das über ein multifunktionales Datenerfassungsmittel an Spannungs-, Strom- und Drehzahlsensoren angeschlossen ist. Die Sensoren liefern kontinuierlich Echtzeitinformationen über Eingangsspannung und -strom und über das Ausgangsspannungssignal, das vom Drehzahlmesser des Motors erzeugt wird. Das Computermittel nutzt diese Informationen zur kontinuierlichen Ausführung eines Störungserkennungs- und Diagnosealgorithmus' in Verbindung mit einer Diagnosebeobachtungs-vorrichtung.

[0020] Das System und das Verfahren verwenden einen multivariablen experimentellen Modellierungsalgorithmus zur Erstellung eines Modells des Elektromotors durch Bestimmung der Struktur, d. h. der Reihenfolge der Differentialgleichungen, die den Motor mathematisch beschreiben, und der Motor-Invarianten, d. h. Parameter wie beispielsweise Induktivität, Motorwiderstand, Trägheitsmoment, nichtphysikalische Parameter wie beispielsweise A-, B- und C-Matrizes von Zustandsgleichungen, die den Motor beschreiben, und andere ausgewählte Parameter. Bei der bevorzugten Ausführungsform wird das Modell des Elektromotors erstellt, wenn man weiß, dass der Motor störungsfrei läuft, gewöhnlich nach der Erstinstallation des Motors. Später, während des Betriebes, wird das Ausgangsspannungssignal des Modells anhand der tatsächlichen Eingangsspannung und des tatsächlichen Eingangsstroms berechnet, die dem Motor zugeführt werden, und kontinuierlich mit dem gemessenen Ausgangsspannungssignal des Motors verglichen. Der Algorithmus quantifiziert den Vergleich anhand eines Residuums, das sich aus dem Subtrahieren der jeweiligen Signale ergibt.

[0021] Die Diagnosebeobachtungsvorrichtung analysiert das Residuum und bestimmt, ob der Motor störungsfrei arbeitet oder nicht. Bei störungsfreiem Betrieb ist das Residuum idealerweise gleich Null, obgleich im Betrieb eine bestimmte Toleranzschwelle ausgewählt werden kann, um Modellierungsfehler und Rauschen oder sonstige Störeffekte auszugleichen, die zu einem Residuum ungleich Null führen können.

[0022] Wenn eine Motorkomponente zu einem Grad verschleißt, dass der Motor außerhalb seiner Sollbetriebswerte arbeitet, oder wenn es zu einer tatsächlichen Störung kommt, so hat das Residuum einen Wert ungleich Null, der die Toleranzschwelle übersteigt. Wenn das Computermittel ein Residuum ungleich Null erkennt, so steht wahrscheinlich eine Störung unmittelbar bevor, und es wird eine Warnung ausgegeben, damit geeignete Maßnahmen ergriffen werden können, um die Auswirkungen zu minimieren, die andernfalls ein ausgefallener Motor verursachen würde. Wenn die bevorstehende Störung erkannt wurde, wertet die Diagnosebeobachtungsvorrichtung die gemessenen Variablen des Motors aus, stellt die Abweichung vom Referenzwert fest und erstellt eine Diagnose der mutmaßlichen ausgefallenen oder ausfallenden Komponente.

[0023] Gemäß einer anderen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird ein System zum Erkennen und Diagnostizieren von mechanischen Störungen bei Kleinelektromotoren offenbart. Anstatt der Erstellung einer umfassenden Datenbank zum Korrelieren von Störungen mit den gemessenen Signalen beinhaltet diese Ausführungsform ein mathematisches Modell eines störungsfreien Motors und misst Betriebsparameter des getesteten Motors, die gegenüber Umgebungseinflüssen, Betriebseinflüssen und falscher Montage unempfindlich sind.

[0024] Diese Ausführungsform eignet sich besonders für die Herstellung von Kleinelektromotoren und insbesondere für die Durchführung von Qualitätskontrolltests. Nach der Herstellung mehrerer Motoren wird mittels eines multivariablen Systemidentifizierungsalgorithmus' ein Basismodell erstellt, wobei die gesamte verfügbare Population an Motoren verwendet wird. Es versteht sich, dass die Population auch eine Anzahl defekter Motoren beinhalten kann. Deshalb muss das Modell möglicherweise durch Auswahl einer Toleranzschwelle und erneutes Testen jedes Motors anhand des Modells präzisiert werden. Die Motoren, die jenseits der Schwelle liegen, werden aus der Population herausgenommen, und die verbleibenden Motoren werden zur Erstellung eines überarbeiteten Basismodells verwendet. Das überarbeitete Basismodell wird in einem Computermittel gespeichert, um alle nachfolgend hergestellten Motoren einem Qualitätskontrolltest zu unterziehen.

[0025] Wenn während der Qualitätskontrolltests die Parameter, wie beispielsweise Induktivität, Motorwiderstand, Reibungskoeffizient oder Trägheitsmoment, eines Motors außerhalb der Schwellentoleranz liegen, die für das Basismotorenmodell festgelegt wurde, so wird der getestete Motor als defekt klassifiziert. Durch Vergleichen der Parameter des getesteten Motors mit dem Basismotorenmodell mit verschiedenen Toleranzgrenzen ist es möglich, die Motorstörung weiter zu klassifizieren und Diagnoseinformationen anzuzeigen.

[0026] [Fig. 1](#) ist eine schematische Darstellung eines Elektromotors, der sich zur praktischen Umsetzung einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung eignet.

[0027] [Fig. 2](#) ist eine Draufsicht auf ein typisches Motorengehäuse.

[0028] [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#) zeigen typische Eingangs- und Ausgangswellenformen zur praktischen Umsetzung einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

[0029] [Fig. 5](#) ist eine schematische Darstellung einer Konfiguration auf Systemebene einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

[0030] [Fig. 6](#) zeigt ein Blockschaubild eines Störungserkennungs- und Diagnosesystems gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

[0031] [Fig. 7A–Fig. 7B](#) und [Fig. 8A](#) und [Fig. 8B](#) zeigen Ablaufdiagramme des Betriebes des erfindungsge-
mäßigen Störungserkennungs- und Diagnosesystems gemäß Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

[0032] Wenden wir uns nun den Zeichnungen genauer anhand der Bezugszahlen zu. [Fig. 1](#) zeigt ein System, das einen Elektromotor **10**, wie beispielsweise einen Kleinelektromotor, umfasst. Zur Veranschaulichung umfasst der Motor **10** Rotorwicklungen **12**, einen Stator **14** und eine Welle **16**, die nahe ihren beiden Enden in Lagern **18** ruht. Eine Riemenscheibe **20** verbindet die Welle **16** mit einem (nicht gezeigten) Lastabnehmer. Der Kollektor **22** leitet Strom in den Rotor **12** und den Anker **24** hinein oder aus dem Rotor **12** und dem Anker **24** heraus, wodurch in Verbindung mit dem Stator das Magnetfeld erzeugt wird, das zur Drehung des Motors führt. Dem Fachmann ist klar, dass der Motor **10** einen Rotor haben kann, der weder einen Kommutator noch Wicklungen aufweist. Der Motor **10** ist in einem Gehäuse **26** untergebracht, das vor Staub, Feuchtigkeit und anderen Fremdkörpern schützt. [Fig. 2](#) ist eine Draufsicht auf ein Motorengehäuse und insbesondere ein Gehäuse **26**, wobei die Basis des Gehäuses mittels Schrauben und Muttern **28** auf einschlägig bekannte Weise an dem Deckel befestigt ist.

[0033] Wenden wir uns nun [Fig. 5](#) zu, wo eine bevorzugte Ausführungsform eines Motorzustands-Überwachungssystems **30** gemäß der vorliegenden Erfindung gezeigt ist. Das System **30** umfasst einen Motor **10**, eine Stromquelle **32**, bei der es sich entweder um Netzspannung oder um ein Netzteil wie beispielsweise ein Hewlett Packard **6010A** handeln kann, mehrere Sensoren **34**, **35** und **36**, eine Multifunktionsplatine **37** und einen Computer **42**. Wenn Spannung angelegt wird, so beschleunigt der Motor **10** normalerweise innerhalb von 25 Millisekunden nach dem Anlegen der Spannung auf seine Betriebsdrehzahl, wobei sich die Welle **16** mit einer Drehzahl dreht, die teilweise von der anliegenden Spannung und der Last abhängt. Die Drehzahl des Motors **10** wird vom Drehzahlsensor **36** erfasst, durch die multifunktionale Eingangs-/Ausgangs-Platine **37** von einem analogen Signal in ein digitales Signal umgewandelt und an den Computer **42** übermittelt. Der Drehzahlsensor **36** kann ein Drehzahlkodierer oder ein eingebauter Drehzahlmesser sein, der in den Motor **10** hineinkonstruiert wurde. Die Multifunktionsplatine ist des Weiteren an einen Spannungssensor **34**, bei dem es sich beispielsweise um eine 1:100-Spannungsteilersonde handeln kann, sowie an einen Stromsensor **35** angeschlossen, der vorzugsweise eine Mindest-Ansprechzeit von 23 Nanosekunden hat (in Betracht kommende Stromsensoren sind beispielsweise das Tektronix **6303**, eine Wechselstrom/Gleichstromzange für max. 100 A, das Leistungsmodul Tektronix **502a** und der Wechselstrom/Gleichstromzangenverstärker Tektronix **503b**). Signale von den Sensoren **34** und **35** werden ebenfalls durch die Platine **37** aufbereitet und in den Computer **42** eingespeist. Der Computer **42** zeichnet Sensordaten in seinem (nicht gezeigten) Speicher auf.

[0034] Der Computer **42** implementiert ein Störungserkennungs- und Diagnosemodell eines idealen Motors, das ebenfalls in dem Speicher gespeichert ist. Bei der bevorzugten Ausführungsform wird das Modell des Motors zunächst unter Verwendung eines multivariablen Systemidentifizierungsalgorithmus' erstellt, und zwar mit der Experimental Modeling Toolbox (EMT), entwickelt von Ahmet Duyar und nun auf dem Markt erhältlich von der Advanced Prognostic Systems, Inc., 4201 North Ocean Boulevard, Suite 206, Boca Raton, Florida 33431. EMT ist ein experimentelles Modellierungswerkzeug, das eine mathematische Gleichung erzeugt, welche die dynamischen Beziehungen zwischen Eingangs- und Ausgangsmessungen beschreibt, die anhand von Experimenten ermittelt wurden, die dazu dienen, Eigenschaften des Systems innerhalb eines ausgewählten Spektrums möglicher Betriebszustände herauszufinden. Zu diesen Informationen gehören beispielsweise die Systembandbreite, die optimale Abtastzeit und -dauer und ein Eingangssignal, das reich genug ist, dass es das System über die gesamte Systembandbreite hinweg ausführen kann. Wie dem Fachmann bekannt ist, ist das

experimentelle Modellieren die Auswahl mathematischer Beziehungen, die augenscheinlich zu den beobachteten Eingangs- und Ausgangsdaten passen. Dementsprechend werden während des Modellierungsprozesses Gleichungen erstellt, welche das Verhalten der verschiedenen Systemelemente und die Verbindungen zwischen diesen Elementen beschreiben.

[0035] Das experimentelle Modell des Systems wird durch eine Gruppe von Differentialgleichungen beschrieben, die in Matrixform dargestellt sind. Das EMT-Programm bestimmt die Struktur des Systems, d. h. die Reihenfolge des Systems, die Parameter und die konstanten Koeffizienten der Variablen der Differentialgleichungen. Bei der bevorzugten Ausführungsform wird die Struktur durch Erstellen einer Informationsmatrix unter Verwendung der Eingangs- und Ausgangsdaten bestimmt. Die zeilenweise Rangsuche dieser Matrix wird zur Bestimmung der Struktur des Systems verwendet.

[0036] Sobald die Struktur des Systems bestimmt ist, ist die Anzahl der Parameter bekannt, die in der Gruppe von Differentialgleichungen enthalten sind. Die gemessenen Daten werden mit der Gruppe von Differentialgleichungen, die unbekannte Koeffizienten enthalten, zur Erstellung verschiedener Gleichungen verwendet. Die Anzahl der erstellten Gleichungen ist größer als die Anzahl unbekannter Koeffizienten. Die Methode der kleinsten Quadrate wird zur Bestimmung der unbekannten Koeffizienten in einer dem Fachmann bekannten Weise verwendet.

[0037] Das modellgestützte Störungserkennungs- und Diagnoseregime der vorliegenden Erfindung beschreibt einen störungsfreien Motor mit einer Reihe von Gleichungen, die weiter unten näher beschrieben werden. Da Störungen im Motor **10** die Parameter verändern, weichen die Gleichungen des Motors **10** von den erwarteten Gleichungen, die durch das Modell erstellt werden, ab. Das Regime der vorliegenden Erfindung stützt sich auf das Konzept der analytischen Redundanz, wobei Signale, die durch das Modell erzeugt werden, mit den gemessenen Signalen verglichen werden, die von dem Motor **10** erhalten wurden, um zu bestimmen, ob der Motor ordnungsgemäß funktioniert. Dank des Modells ist es nicht mehr nötig, Informationen über den Motor vorab zu generieren. Anhand des Vergleichs bestimmt der Computer **42**, ob der Motor störungsfrei arbeitet, indem residuale Mengen erzeugt und analysiert werden. Die vorliegende Erfindung erstellt prognostische Informationen, die für die Frühdiagnose unmittelbar bevorstehender Ausfälle von Elektromotoren während des Betriebes unter unbekannten Lastzuständen von maßgeblicher Bedeutung sind.

[0038] Zur Verständlichmachung stelle man sich ein störungsfreies System vor, das durch die folgenden diskreten Zustandsraumgleichungen beschrieben wird:

$$x(k+1) = A x(k) + B u(k) \quad (1)$$

$$y(k) = C x(k) \quad (2)$$

wobei x , u und y der $n \times 1$ Zustandsvektor, der $p \times 1$ Eingangsvektor bzw. der $q \times 1$ Ausgangsvektor sind und k diskrete Zeitinkremente bezeichnet. A , B und C sind die bekannten Nennmatrizes (Parameter) des Systems mit entsprechenden Abmessungen. Bei Verwendung eines Kleinelektromotors beispielsweise verwendet das experimentelle Modell Eingangsspannungs-, Strom- und Drehzahlmessungen.

[0039] In [Fig. 3](#) ist ein Plot der Eingangsspannung **38**, die für das Anlaufen des Motors **10** verbraucht wird, gezeigt. Bei der bevorzugten Ausführungsform ist die Eingangsspannung **38** ein sprunghaftes Eingangssignal und ist in dem experimentellen Modell als ein Zeilenvektor dargestellt, der die gemessene Spannung enthält. [Fig. 4](#) zeigt die experimentell ermittelten Strom- und Drehzahlausgangssignale **39** bzw. **40**, wobei die gemessenen Strom- und Drehzahlausgangssignale mit einer durchgängigen Linie dargestellt sind. Die resultierende Systembeschreibung kann durch die Gleichungen (3) und (4) dargestellt werden, wobei die A -Matrix in der Zustandsraumdarstellung beispielsweise folgende Form hat:

0	0	0	0	0	0	0	0	-0,0010	93,3676
0	0	0	0	0	0	0	0	0,0000	0,0020
1,0000	0	0	0	0	0	0	0	-0,1857	-260,2940
0	1,0000	0	0	0	0	0	0	-0,0001	-0,0920
0	0	1,0000	0	0	0	0	0	0,0258	487,7519
0	0	0	1,0000	0	0	0	0	0,0001	1,0220

0	0	0	0	1,0000	0	0	0	0,4119	-636,3152
0	0	0	0	0	1,0000	0	0	-00002	-2,7525
0	0	0	0	0	0	1,0000	0	0,5182	315,4224
0	0	0	0	0	0	0	1,0000	0,0002	2,8204

[0040] Die B-Matrix hat folgende Form:

-2,6188
0,0012
4,3719
0,0092
-3,5824
-0,0259
1,0257
0,0156
1,0915
0,0000

[0041] Die Ausgangs-C-Matrix, welche die Variable dem Ausgang zuordnet, hat folgende Form:

0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

[0042] Zusätzlich zu den diskreten A-, B- und C-Matrizes des Systems, die durch das Modellierungsprogramm bestimmt werden, wird auch ein Standardschätzfehler (SSF) bestimmt. Der SSF gibt eine Schätzung des Modellierungsfehlers durch Vergleichen des modellierten Ausgangs mit dem gemessenen Ausgang. Bei dem obigen Beispiel beträgt der SSF für das Modell 2,8 % für den Stromausgang und 0,67 % für den DrehzahlAusgang.

[0043] Wenn in dem Motor **10** eine Störung auftritt, so sind die Parameter und folglich die Reaktion des Systems **30** verschieden. Werden die Störungsparameter und Variablen des Systems mit "unterer Index von" bezeichnet, so werden die Gleichungen, die das fehlerhafte System beschreiben, zu:

$$x_f(k+1) = A_f x_f(k) + B_f u_f(k) \quad (3)$$

$$y_f(k) = C_f x_f(k) \quad (4)$$

[0044] In seiner einfachsten Form kann ein Restvektor $r(k)$ als die Differenzen zwischen dem Ausgang des störungsfreien Systems und dem Ausgang des fehlerhaften Systems als:

$$r(k) = y_f(k) - y(k) \quad (5)$$

definiert werden.

[0045] Ohne Rauschen und ohne Modellierungsfehler ist der Restvektor $r(k)$ gleich dem Nullvektor unter störungsfreien Bedingungen. Ein Wert ungleich Null des Restvektors zeigt das Vorliegen von Störungen an. Wenn Rauschen und Modellierungsfehler vorliegen, so muss der Effekt von dem Effekt von Störungen getrennt werden, indem die residualen Größenordnungen mit ausgewählten Schwellenwerten verglichen werden. Unter Verwendung der beobachteten Verteilung von Residuen unter störungsfreien Bedingungen werden die Schwellenwerte durch Auswählen eines Konfidenzbereichs (innerhalb von drei Standardabweichungen) dergestalt bestimmt, dass falsche Alarme und unbemerkt gebliebene Störungen minimiert werden.

[0046] Wenden wir uns nun [Fig. 6](#) zu. Hier wird der multivariable Identifikationsalgorithmus EMT zur Erstellung eines experimentellen Basismodells **44** des Motors **10** verwendet. Das Modell **44** umfasst die Parameter der Differenzialgleichungen, d. h. A, B und C und deren Ordnungen, d. h. n in den Gleichungen (1) und (2). Im Gegensatz zu den Parametern des theoretisch abgeleiteten Modells haben die Parameter des experimentellen Modells keine physikalische Aussagekraft. Oder anders ausgedrückt: Die Änderungen dieser Parameter dürfen nicht zum Verstehen der Ursache-Wirkung-Beziehungen herangezogen werden. Obgleich die physikalische Aussagekraft der Parameter verloren geht, gibt das experimentelle Modell eine hinreichend genaue Darstellung des Motors **10**, da es nicht unter Verwendung von Annahmen abgeleitet wird. Dank des Systems **30**

braucht man jedoch keine von vornherein vorliegenden Informationen bezüglich der Struktur des Motors **10** mehr, sondern geht lediglich von der Annahme aus, dass der Motor **10** ursprünglich störungsfrei ist.

[0047] Die Ausgabewerte des Modells **44** werden mit dem EMT-Algorithmus durch den Computer **42** unter Verwendung der Messungen ausgewertet, die mit dem Spannungssensor **34**, dem Drehzahlsensor **36** und dem Stromsensor **35** gewonnen wurden, um die Modellausgabewerte zu erhalten. Die Modellausgabewerte werden mit den Ausgabewerten des Motors verglichen, wie durch den Summierer **46** angezeigt, um das Residuum $r(k)$ zu erzeugen. Der Komparator **48** stellt fest, ob der Restvektor $r(k)$ gleich dem Nullvektor ist, und dementsprechend, dass der Motor unter störungsfreien Bedingungen arbeitet. Wenn der Komparator **48** feststellt, dass der Restvektor $r(k)$ einen Wert ungleich Null hat, so werden eine oder mehrere Störungen angezeigt. Da jedoch in der Regel Rauschen und Modellierungsfehler vorhanden sind, wird der Restvektor $r(k)$ zuerst mit ausgewählten Schwellenwerten verglichen, um falsche Messwerte auszuschließen. Falls der Restwert kleiner ist als der Schwellenwert, so ist es wahrscheinlicher, dass der Wert ungleich Null auf solches Rauschen oder solche Modellierungsfehler zurückzuführen ist, so dass der Motor **10** als störungsfrei gilt. Das System **30** meldet dann das störungsfreie Funktionieren des Systems, wie bei Kasten **50** angezeigt. Wenn jedoch der Restwert die Schwelle übersteigt, so wird eine Störung angezeigt, und das System **30** beginnt mit der Analyse **52** der Störung. Auf der Grundlage der Analyse **52** wird die Störung klassifiziert und bei **54** an den Benutzer gemeldet oder für die spätere Verwendung im Computer **42** gespeichert.

[0048] Durch Verwendung einer modellgestützten Diagnoseroutine kann die momentane Reaktion des Motors unter störungsfreien Bedingungen modelliert und anschließend mit der momentanen Reaktion desselben Motors während des Betriebes verglichen werden. Bei der vorliegenden Erfindung enthält der Computer **42** Mittel für die iterative Abarbeitung eines Störungserkennungsalgorithmus' zum Vorhersagen, Erkennen und Klassifizieren mechanischer Störungen bei Elektromotoren. Das System und das Verfahren der vorliegenden Erfindung können sowohl in Produktions- als auch in Betriebsumgebungen verwendet werden.

[0049] Die Störungsklassifizierung erreicht man durch Feststellen von Änderungen, die sich bei den Parametern des Motors **10** vollziehen, und Zuordnen der Änderungen zu Motorstörungen durch Verwendung physikalischer Parameter eines auf theoretischem Wege erhaltenen Modells. Sehen wir uns die vereinfachten theoretischen Gleichungen (6) und (7) an, die einen Universalmotor beschreiben, der in der Lage ist, vorbehaltlich eines Gleichspannungseingangs mit Gleich- oder Wechselstrom zu arbeiten:

$$L \frac{di}{dt} + R i = V + k_1 w \quad (6)$$

$$J \frac{dw}{dt} + f w = k_2 i_2 + M \quad (7)$$

wobei L , R , J und f die Induktivität, der Widerstand, das Trägheitsmoment bzw. der Reibungskoeffizient des Motors sind, während k_1 und k_2 die Motorkonstanten sind. Die Gleichungen (6) und (7), die Ausgangsvariablen, der Strom und die Drehzahl werden mit i bzw. w bezeichnet, während die Eingangsvariable, die Spannung, mit V bezeichnet ist. Die Last ist mit M bezeichnet.

[0050] Bei dem MCM-Algorithmus ist die Last M nicht allgemein verfügbar oder problemlos zu messen. Darum müssen die Gleichungen (6) und (7) so bearbeitet werden, dass der Last-Terminus für die Verwendung durch eine Diagnosebeobachtungsvorrichtung eliminiert wird. Bei einer Ausführungsform stützt die Diagnosebeobachtungsvorrichtung das Modell einfach auf die Gleichung 6, die lastunabhängig ist. Obgleich bei dieser Ausführungsform Teilinformationen in die Diagnosebeobachtungsvorrichtung eingespeist werden, stehen die Motorreibung und die Konstante k_2 nicht zur Verfügung, und es kann einen höheren Prozentsatz an Berichten mit unbekannten Störungen geben. Wenn solche Informationen benötigt werden, so kann die Diagnosebeobachtungsvorrichtung dementsprechend das Derivat von Gleichung (7) verwenden, wodurch der Last-Terminus eliminiert und eine konstante Last angenommen wird. Der Fachmann erkennt, dass noch andere mögliche mathematische Mittel zur Verfügung stehen, um den Last-Terminus zu eliminieren, wie beispielsweise das Ausdrücken der Gleichungen (6) und (7) in Matrixform und das Multiplizieren beider Seiten mit geeigneten Matrixoperatoren.

[0051] Wenden wir uns wieder den [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) zu. Häufige mechanische Störungen können durch eine Unwucht im Rotor **12**, durch ungleichmäßig festgezogene Schrauben **28** oder defekte Lager **18**, einen defekten Kollektor **22** oder eine defekte Riemenscheibe **20** entstehen. Diese mechanischen Störungen verursachen Vibrationen und Lärm, nachdem der Motor **10** installiert wurde und mit einer Last M arbeitet. Wenn man von der Tatsache ausgeht, dass mechanische Vibrationen eine körperliche Verschiebung mit sich bringen, so verursachen die Vibrationen infolge defekter Lager eine periodische Verschiebung der Welle **16**. Bei einem Elektro-

motor wird die Antriebswelle durch eine Ankerbaugruppe gedreht.

[0052] Mechanische Störungen führen zu Fluchtungsfehlern des Rotors, was wiederum dazu führt, dass der Luftspalt unsymmetrisch wird, und die Induktivitäts-, Widerstands- und Motorkonstanten-Parameter ändert, die allesamt in der Gleichung (6) enthalten sind.

[0053] Der durch den Motor fließende Strom ist zum Teil eine Funktion des Magnetfeldes in dem Luftspalt zwischen dem Anker und dem Stator (oder den Feldwicklungen). Die periodische Verschiebung der Antriebswelle beeinflusst die Symmetrie des Luftspalts und des Magnetfeldes in dem Luftspalt. Das Magnetfeld in dem Luftspalt wiederum beeinflusst den durch den Motor fließenden Strom. Da der störende Einfluss auf das Magnetfeld in dem Luftspalt periodisch und von bekannter Häufigkeit ist, gilt dies auch für den Strom.

[0054] Dementsprechend weist eine Änderung des Nennwertes des Induktivitätsparameters L auf eine Störung durch eine Unwucht im Rotor hin. Eine beobachtete Änderung des Widerstandsparameters R gilt als ein Anzeichen für ein Kollektorproblem. Ein defektes Lager wird festgestellt, wenn die Änderung des Induktivitätskoeffizienten ein oszillatorisches Verhalten zeigt und/oder wenn sich sowohl der Induktivitäts- als auch der Reibungskoeffizient gemeinsam ändern.

[0055] Die störungsfreien Parameter, die störungsbehafteten Parameter und die Standardabweichungen der störungsfreien Parameter sind in den Tabellen 1 und 2 gezeigt. In Tabelle 1 sind – für eine gegebene Spannung V und Last M – die vom Modell **44** vorhergesagten Strom- und Drehzahlausgabewerte zusammen mit einem ausgewählten Toleranzparameter (drei Standardabweichungen) und einem Beispiel für Strom- und Drehzahlmessungen gezeigt. Wie zu erkennen ist, übersteigt die Strommessung den vorhergesagten Wert um mehr als drei Standardabweichungen. Folglich wird eine Störung angezeigt.

Tabelle 1

Ausgabewerte	Standardschätzfehler für den Basismotor	Drei Standardab- weichungen	Beispiel: Messwert, der einen defekten Motor anzeigt
i	0,0072	0,0072	0,0098
ω	0,0197	0,0025	0,0245

[0056] Die Parameter des defekten Motors **10** werden in Tabelle 2 untersucht. Wie zu erkennen ist, übersteigt die Induktivität L des defekten Motors **10** den entsprechenden vom Modell **44** vorhergesagten Induktivitätsparameter um mehr als eine Standardabweichung, während alle anderen Parameter kleiner sind als der vorhergesagte Wert zuzüglich einer Standardabweichung. Wie oben angemerkt, zeigt dieser Störungstyp eine Rotorunwucht an, die durch das Störungsklassifizierungselement **54** des Systems **30** gemeldet.

Tabelle 2

	Basismotorparameter	Standardabweichung der Basismotorpara- meter	Beispiel: Parameter eines defekten Motors
L (Induktivität) di/dt	0,0434	0,0005	0,0445
R (Widerstand) i	1,6269	0,1087	1,7236
f (Reibungskoeffi- zient) ω	1,1517	0,0270	1,1632
kt (Motorkonstante) i	377,4760	3,3765	374,7121

[0057] Das Ablaufdiagramm von [Fig. 7A–Fig. 7B](#) fasst die Schritte der Implementierung des Systems **30**, nachdem das Modell **44** erstellt wurde, zusammen. Genauer gesagt, lädt der Computer **42** in ausgewählten

Intervallen das Modell **44** in den Speicher (Schritt **62**) und zeigt auf dem Anzeigefeld des Computers **42** Informationen für den Benutzer an (Schritt **64**). Bei Empfang eines Befehls, die Überwachung des Motors **10** – in zuvor festgelegten Intervallen oder kontinuierlich – einzuleiten, beginnt das System **30**, Daten von den Sensoren **34–38** zu erfassen (Schritte **66** und **68**). Die Datenerfassung wird mit einer Rate fortgesetzt, die durch den Benutzer festgelegt werden kann. Der Computer **42** berechnet die Restwerte $r(k)$, die dann mit dem erwarteten Residuum verglichen werden, das vom Modell **44** erzeugt wurde (Schritt **72**). Wenn das Residuum innerhalb der Schwellengrenzen liegt, so arbeitet der Motor störungsfrei, und diese Information wird dem Benutzer bei Schritt **74** auf der Anzeige des Computers **42** angezeigt. Wenn jedoch eine Störung angezeigt wird, so wird diese Information auf der Anzeige angezeigt (Schritt **76**).

[0058] Sobald eine Störung erkannt wird, ist das System **30** in der Lage, die Störung auszuwerten und dem Benutzer Diagnoseinformationen anzuzeigen. Dank der prädiktiven Funktion der vorliegenden Erfindung ist es möglich, kostspielige außerplanmäßige plötzliche Totalausfälle zu vermeiden. Wie in [Fig. 7B](#) gezeigt, wertet der Diagnosebeobachtungsteil des Modells **44** die physikalischen Parameter, d. h. Strom i und Drehzahl w , des Motors **10** bei Schritt **78** aus und vergleicht diese Parameter mit den entsprechenden Parametern des Modells **44** (siehe auch Tabelle 2). Anhand dieses Vergleichs ist das System **30** in der Lage, die mechanische Grundlage für die Störung oder das Nachlassen der Motorleistung zu klassifizieren und anzuzeigen, wie bei Schritt **82** gezeigt ist. Das Modell **44** macht es überflüssig, Vorab-Informationen über den Motor erarbeiten zu müssen.

[0059] Der durch den Computer **42** ausgeführte Algorithmus wird in den [Fig. 7A](#) und [Fig. 7B](#) als Motorzustandsmonitor (MZM) bezeichnet. Das Grundkonzept der Überwachung des Motorzustandes besteht darin, entweder in Intervallen oder kontinuierlich die parametrischen Veränderungen gegenüber den gleichen Parametern zu beobachten, die ausgewertet wurden, als man wusste, dass der Motor einwandfrei arbeitet, beispielsweise als der Motor zum ersten Mal in Betrieb genommen wurde und man wusste, dass er störungsfrei läuft. Während des späteren Betriebes des Motors weichen die Ausgabewerte von den Referenzausgabewerten ab. Diese Abweichung wird dann mit zuvor festgelegten Schwellenwerten verglichen. Wenn die Abweichung den Schwellenwert übersteigt, so wird eine Störung erkannt. Die Störung wird klassifiziert, indem die Parameter des Diagnosemodells ausgewertet werden und die Parameter unter Verwendung geeigneter Schwellenwerte für diese Parameter wieder mit ihrem Ursprungswert verglichen werden.

[0060] Bei der Herstellung von Elektromotoren ist es möglich, ein Modell zu erarbeiten, das eine Bandbreite von Produktionsprozessvariationen umfasst, anstatt die Parameter zu verwenden, die anhand eines einzelnen Motors gewonnen wurden, wie es oben in Verbindung mit dem MZM-System und -Verfahren beschrieben wurde. Dieses Konzept dient der Entwicklung von Verfahren für die Erkennung und Diagnose mechanischer Störungen bei Elektromotoren im Rahmen der Testprozedur während des Herstellungsprozesses und insbesondere für die Stufe der Qualitätssicherung, welche die meisten Hersteller unmittelbar vor dem Versand eines Motors durchlaufen. Für Qualitätssicherungszwecke werden im Folgenden ein Verfahren und ein Algorithmus mit der Bezeichnung "Motorqualitätsmonitor" (MQM), die dieses Verfahren der vorliegenden Erfindung verwenden, besprochen.

[0061] Die Grundfunktionen des MQM-Algorithmus' sind der Test des Elektromotors, das Anzeigen der Testergebnisse, die Steuerung des experimentellen Tests (d. h. die Erarbeitung eines Basismodells, wie weiter unten noch eingehender beschrieben wird) und das Speichern der gemessenen und digitalisierten Daten im Speicher zur Archivierung.

[0062] Da es keine verlässliche Technik oder Messung zur Feststellung störungsfreier Motoren gibt, wird als erstes ein Verfahren zum Erhalt des Modells typischer störungsfreier Motoren (das "Basismodell") entwickelt.

[0063] Eine nähere Erläuterung des MQM-Verfahrens ist in den [Fig. 8A–Fig. 8F](#) dargestellt. Das MQM-Verfahren umfasst zwei Grundfunktionen: (1) Erarbeitung eines Basismotormodells und (2) laufende Qualitätssicherungstests von Kleinelektromotoren. Ein Benutzer kann die beiden Funktionen aus einem Menü auswählen, das auf der Anzeigevorrichtung des Computers **42** angeboten wird. Bei der bevorzugten Ausführungsform werden benutzerdefinierte Parameter, beispielsweise Schwellengrenzen und die Anzahl der zu testenden Motoren, eingegeben, bevor der Benutzer eine der folgenden drei Optionen auswählt: "Erarbeitung des Basismotormodells", "Auswahl eines Basismotormodells" oder "Qualitätssicherungstest".

[0064] Wenn kein Basismotor zur Verfügung steht (Schritt **90**), so muss zunächst die Option "Erarbeitung des Basismotormodells" (Schritt **92**) ausgewählt werden, wo der Benutzer aufgefordert wird, die in Tabelle 3 dargestellten Angaben einzugeben, wenn sie von den Vorgabeeinstellungen abweichen (Schritt **94**).

Tabelle 3

Vom Benutzer eingegebene Angaben	Beschreibung der Angaben	Einstellung und/oder Optionen
Eingabe der Abtastrate	Abtastfrequenz der Datenerfassung	500 Hz bis 24 kHz; anfangs auf 24 kHz eingestellt
Eingabe der Abtastdauer	Dauer der Datenerfassung	0,4 s bis 1,0 s
Eingabe der Datei (Pfad/Name)	Pfad und Name der Dateien, wo die Testdaten gespeichert werden	c:\Dateiname
Eingabe des Toleranzmultiplikators	Justierfaktor: multipliziert die Standardabweichungen, um die	In der Regel $\times 3$

	Schwellenvariable zu erhalten	
Eingabe der Bezeichnung des Basismotors	Identifiziert des Typ des zu modellierenden Motors	Universalmotor

[0065] Die Auswahl der Option "Erarbeitung des Basismotormodells" ist obligatorisch, wenn der MQM das erste Mal installiert wird. Der Benutzer hat die Option, Basismotoren für verschiedene Typen von Elektromotoren oder sogar für denselben Elektromorentyp, aber mit unterschiedlichen Toleranzmultiplikatoren, zu entwickeln. Das Modell des Motors, seine Parameter und deren Standardabweichungen werden erhalten und in der angegebenen Datei abgelegt.

[0066] Das Basismotormodell wird anhand einer Gruppe von Motoren erstellt, von denen man weiß, dass sie größtenteils aus störungsfreien Motoren besteht (Schritt 96). Bei einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung werden Daten, die aus einer Gruppe von Elektromotoren gewonnen wurden, verwendet, um das Basismotormodell auszuarbeiten. Dem Fachmann ist klar, dass eine solche Gruppe von Motoren nicht nur störungsfreie Motoren, sondern infolge der unvermeidlichen Ineffizienzen des Herstellungs- und Testprozesses auch einige defekte Motoren enthalten kann.

[0067] Unter Verwendung des EMT-Softwareprogramms wird ein experimentelles Modell des ausgewählten Motortyps erarbeitet, welches die Eigenschaften des ausgewählten Motortyps repräsentiert (Schritte 98–100). Bei Schritt 102 wird das Modell auf offensichtliche Modellierungs- und Schwellenfehler hin untersucht (Schritte 102–104).

[0068] Unter Verwendung des anhand der Gruppe erarbeiteten Basismotormodells wird nun jeder Motor in der Gruppe anhand des experimentellen Basismotormodells unter Verwendung von Toleranzwerten, die aus der prognostizierten Standardabweichung des SSF gewonnen wurden, getestet (Schritt 106). Wenn die Ausgabewerte eines der Motoren in der Gruppe von den Ausgabewerten des experimentellen Modells um mehr als die jeweiligen Toleranzwerte abweichen, so wird der Motor aus der Gruppe herausgenommen, und die Dateien werden bereinigt, indem die defekten Daten entfernt werden (Schritte 108–112). Dann wird das Basismotormodell unter Verwendung der Testdaten für die Teilmenge an Motoren, die in der Gruppe verblieben sind, weiter präzisiert. Nach der Herausnahme aller Motoren mit Ausgabewerten außerhalb der durch das experimentelle Modell vorgegebenen Toleranzwerte kann das experimentelle Modell durch Auswertung von Modellierungsfehlern, den mittleren und Standardabweichungen der Gruppe (Schritt 114), noch weiter präzisiert werden, bis die Gruppe nur noch diejenigen Motoren enthält, deren Ausgabewerte innerhalb der Toleranzfaktoren liegen, die für das experimentelle Modell ausgewählt wurden. Nach der Wiederholung dieses iterativen Prozesses repräsentiert das experimentelle Modell die Eigenschaften störungsfreier Motoren, die nach denselben Spezifikationen hergestellt wurden. Das experimentelle Modell wird als das Basismotormodell in einer Datenbank, die im Speicher des Computers 42 geführt wird, zur späteren Verwendung gespeichert (Schritt 116).

[0069] Wenn das Basismotormodell bereits existiert, so kann der obige Prozess dahingehend verkürzt werden, dass lediglich das Basismotormodell wieder in den aktiven Speicher des Computers **42** geladen wird, und der Benutzer kann die Option "Auswahl eines Basismotormodells" auswählen und dann mit der Durchführung des "Qualitätssicherungstests" beginnen. Dem Benutzer können verschiedene Optionen angeboten werden. Beispielsweise kann das Basismotormodell einem universellen Spaltpolinduktionsmotor, einem Synchronmotor oder einem sonstigen Kleinelektromotor entsprechen. Wenden wir uns wieder [Fig. 8A](#) zu. Hier wird das entsprechende Basismotormodell für die im Test befindlichen Motoren in den Computerspeicher geladen, wenn die Option "Auswahl eines Basismotormodells" ausgewählt wird; oder wenn die Option "Qualitätssicherungstests" ausgewählt wird, so beginnt der Test für den als Standard voreingestellten Motortyp (Schritt **120**). An diesem Punkt kann der Benutzer Justierungen an Toleranzmultiplikatoren zur Störungserkennung und Störungsklassifizierung vornehmen (Schritte **122** und **124**). Der MQM-Algorithmus berechnet dann die entsprechenden Störungserkennungs- und Störungsklassifizierungsschwellen (Schritte **126–128**).

[0070] [Fig. 8B](#) zeigt den Messungsteil des MQM-Algorithmus', wo die gemessenen Werte der Motorausgabesignale mit den Ausgabewerten verglichen werden, die anhand des Basismotormodells unter Verwendung ausgewählter Schwellenwerte während der Tests von Elektromotoren während des Herstellungsprozesses im Rahmen der Qualitätssicherung gewonnen wurden. Die Schwellenwerte ermittelt man durch Multiplizieren der Toleranzwerte, die für die Entwicklung des experimentellen Basismotors verwendet werden, mit dem Toleranzmultiplikator. Der MQM-Algorithmus gestattet es, dass die Multiplikatoren durch den Qualitätssicherungsingenieur festgelegt werden können, der die akzeptablen Schwankungen der Ausgabewerte der Motoren infolge normaler Produktionsschwankungen berücksichtigt. Falls die Abweichungen die zuvor ausgewählten Schwellenwerte übersteigen, so wird der im Test befindliche Motor als defekt eingestuft.

[0071] Genauer gesagt, gibt der Benutzer, sobald das Basismotormodell ausgewählt wurde, die erforderlichen Parameter zur Durchführung des "Qualitätssicherungstests" in den Schritten **130–134** ein, wie es in Tabelle 4 zusammengefasst ist.

Tabelle 4

Vom Benutzer eingegebene Angaben	Beschreibung der Angaben	Standardmäßige Vorgabeeinstellung und/oder Optionen
Eingabe der Abtastrate	Abtastfrequenz der Datenerfassung	500 Hz
Eingabe der Abtastdauer	Dauer der Datenerfassung	0,5 s
Eingabe des Toleranzmultiplikators für die Störungserkennung	Justierfaktor: multipliziert die Standardabweichungen, um die Schwellenvariable für den Störungsgrenzwert zu erhalten	$\times 3$
Eingabe des Toleranzmultiplikators für die Störungsklassifizierung	Justierfaktor: multipliziert die Standardabweichungen, um die Schwellenvariable für die Störungsklassifizierung zu erhalten	$\times 1$

[0072] Bei der Durchführung des "Qualitätssicherungstests" berechnet der Algorithmus die Störungserkennungs- und -klassifizierungsgrenzwerte entsprechend dem ausgewählten Motortyp und den entsprechenden Toleranzmultiplikatoren. Der Algorithmus initiiert die Datenerfassung für die Erfassung von Echtzeit-Spannungs-, -Drehzahl- und -Stromsignalen von dem im Test befindlichen Motor (Schritt **134**). Diese Signale wer-

den unter Verwendung der zuvor eingegebenen Abtastraten- und Abtastdauerwerte digitalisiert (Schritte **130–132**). Die digitalisierten Signale werden im Speicher gespeichert (Schritt **136**) und mittels eines Butterworth-Softwarefilters oder eines anderen handelsüblichen Filterprodukts so vorverarbeitet, dass das Rauschen ausgeblendet wird (Schritt **140**).

[0073] Die Echtzeit-Spannungs-, -Drehzahl- und -Stromsignale werden von dem Basismodellmotor dazu verwendet, eine modellierte Zustandsdarstellung des Motors unter momentanen Bedingungen zu bestimmen (Schritte **142** und **144**). Wie bei Schritt **146** angedeutet, werden das Residuum der Basismodellmotorschätzung und das tatsächliche Residuum des im Test befindlichen Motors berechnet und bei Schritt **148** verglichen. Die Abweichung der berechneten Residuen wird dann mit den Störungserkennungsschwellenwerten verglichen. Wenn die Abweichung der Ausgabewerte des im Test befindlichen Motors innerhalb der Toleranzgrenzen liegt, so wird der Motor als störungsfreier Motor eingestuft, und es wird eine Meldung angezeigt oder anderweitig aufgezeichnet (Schritt **150**).

[0074] Wenn der Motor als defekt erkannt wird, so wird eine Meldung angezeigt (Schritt **152**), und – wie bei Schritt **154** angedeutet – es erfolgt eine Klassifizierung der Störung unter Verwendung des Diagnosemodells in ähnlicher Weise wie oben beschrieben. Zusammenfassend ist festzustellen, dass die theoretisch abgeleiteten Gleichungen (6) und (7), die Elektromotoren beschreiben, als das Diagnosemodell verwendet werden. Die physikalischen Parameter des Diagnosemodells werden experimentell anhand der Daten bestimmt, die aus der oben angesprochenen Gruppe der Motoren gewonnen wurden. Die physikalischen Parameter des Diagnosemodells und die zugehörigen Standardabweichungen werden im Speicher des Computers **42** gespeichert.

[0075] Wenn die Motorstörung erkannt wurde, so werden die physikalischen Parameter des defekten Motors durch den MQM-Algorithmus ausgewertet und mit den entsprechenden Parametern des Basismotormodells verglichen (Schritte **156** bis **162**). Das Ergebnis dieses Vergleichs wird zur Klassifizierung der Motorstörung und zur Anzeige von Diagnoseinformationen verwendet.

[0076] Wenn die Abweichungen von Residuen oberhalb der Schwellenwerte liegen, so wird der Motorzustand als "Störung festgestellt" (oder eine ähnliche Formulierung) auf dem Informationsteil der Anzeigevorrichtung des Computers **42** klassifiziert. Nach ihrer Feststellung werden die physikalischen Parameter des defekten Motors ausgewertet. Diese Parameter werden mit den physikalischen Parametern des Basismotormodells unter Verwendung der Störungsklassifizierungsschwellenwerte (siehe Tabelle 4) verglichen. Bei einem Universalelektromotor sind die physikalischen Parameter der Induktivitäts-, der Widerstands- und der Reibungskoeffizient und die Motorkonstanten, wie in den Gleichungen (5) und (6) dargestellt. Jeder der Parameter des defekten Motors wird mit den oben erwähnten Störungsklassifizierungsschwellenwerten verglichen. Ein repräsentatives Beispiel eines möglichen Entscheidungsbaumes zur Klassifizierung von Störungen ist in den Schritten **164–170** gezeigt. Wenn beispielsweise der Induktivitätsparameter des defekten Motors den Störungsklassifizierungsschwellenwert für die Induktivität übersteigt, so wird die Entscheidung als "Gleichgewicht überprüfen" angezeigt.

[0077] Wenn der Widerstandsparameter des defekten Motors den Störungsklassifizierungsschwellenwert für den Widerstand übersteigt, so wird die Entscheidung als "Kollektor überprüfen" angezeigt.

[0078] Wenn sowohl der Reibungs- als auch der Induktivitätsparameter des defekten Motors die Störungsklassifizierungsschwellenwerte übersteigen, so wird die Entscheidung als "Lager überprüfen" angezeigt.

[0079] Wenn mehr als ein einziger Schwellenwert zur selben Zeit überschritten wird, so werden alle resultierenden Entscheidungen angezeigt.

[0080] Wenn die Größenordnung aller Parameter kleiner ist als der entsprechende Schwellenwert, so wird die Entscheidung als "nicht klassifiziert" auf dem Informationsteil der Anzeige angezeigt. Dies kann infolge der kumulativen Auswirkung von Änderungen jedes Parameters auf die Ausgabewerte des Motors der Fall sein. In einer solchen Situation kann das Modell mehrere, wenn auch kleine, Störungen haben, die so kumulieren, dass die Ausgabewerte des Modells die Schwellenwerte übersteigen. Da der Schwellenwert aber vom Benutzer ausgewählt wird, ist es möglich, die Toleranzwerte für jeden Parameter so streng anzusetzen, dass es möglich ist, auch solche marginalen Störungen zu erkennen.

[0081] Das MQM-Verfahren eignet sich besonders gut zur Verwendung in Elektromotorreparaturwerkstätten für die Diagnose von Störungen und für die vorbeugende Wartung. Für einen solchen Zweck werden Basismo-

tormodelle für verschiedene Elektromotoren, variierend nach Größe und Hersteller, im Computer **42** gespeichert. Nach Erhalt eines defekten Motors wählt der Reparaturmechaniker das Basismotormodell des im Test befindlichen Motors aus und führt eine Störungserkennung und -diagnose durch.

[0082] Das Verfahren und die Vorrichtung können auch für die Zustandsüberwachung und die prädiktive Wartung verwendet werden. Bei dieser Ausführungsform, der dritten Ausführungsform, ersetzt der MQM-Algorithmus den MZM-Algorithmus für die Intervall- und die kontinuierliche Zustandsüberwachung.

[0083] Bei einer weiteren Ausführungsform der Erfindung werden der MQM- und der MZM-Algorithmus direkt mit einem vorhandenen Qualitätssicherungs- bzw. Zustandsüberwachungssystem verwendet, wo die Möglichkeiten der Datenerfassung zur Messung von Spannung, Drehzahl und Strom bereits vorhanden sind.

[0084] Schlussfolgernd ist zu sagen, dass der MZM-Algorithmus und der MQM-Algorithmus einander sehr ähnlich sind, sich aber in zweierlei Hinsicht voneinander unterscheiden. Erstens erstellt beim MZM-Algorithmus das System kein Basismotormodell. Das liegt an der Eigenart der Zustandsüberwachung, wo das System sich nur um die Überwachung eines einzigen Motors kümmert. Aus diesem Grund verwendet das MZM-Verfahren vorteilhafterweise das speziell angepasste Modell des überwachten Motors. Das speziell angepasste Modell wird erstellt, wenn bekannt ist, dass der Motor unter störungsfreien Bedingungen arbeitet. Im Gegensatz dazu erstellt das MQM ein Basismodell, das die Variationen umfasst, die normalerweise mit einer großen Population verbunden sind. Dementsprechend ist es einem marginal arbeitenden Motor möglich, die Testschwellen zu passieren, die im MQM-Modell eingestellt sind, aber es ist unwahrscheinlich, dass eine fortgesetzte Leistungsver schlechterung vom MZM unentdeckt bleibt, da das MZM-Modell speziell auf den individuellen Motor abgestimmt ist.

[0085] Der zweite Unterschied zwischen den beiden Algorithmen besteht darin, dass der MZM unvermeidlich durch betriebliche Anforderungen beschränkt ist. Beispielsweise ist das dem Motor zugeführte Eingangssignal von den Anforderungen abhängig, die der Anwendungszweck auferlegt. Es leuchtet ein, dass das Eingangssignal, welches in das Modell **44** eingespeist wird, möglicherweise nicht ein so "reiches" Eingangssignal ist, wie es während des MQM-Tests zugeführt werden könnte. Des Weiteren ist beim MZM-Test die tatsächlich am Motor anliegende Last unbekannt, und sie kann sich in der Zeit, in der die Messungen über die Sensoren **34-38** vorgenommen werden, ändern. Unter diesen Umständen wird nur derjenige Teil des Modells modelliert, auf den die Last keinen Einfluss hat. Beispielsweise wird nur Gleichung (6) zur Modellierung des Stromsignals unter Nutzung der gemessenen Spannungs- und Drehzahleingangssignale verwendet, um mittels der Diagnosebeobachtungsvorrichtung Ergebnisse zu erhalten. Bei alternativen Ausführungsformen können Techniken wie beispielsweise das Verwenden des Derivats von Gleichung (7) im Fall einer konstanten Last angewendet werden, um den unbekannten Last-Terminus zu eliminieren. Bei solchen Ausführungsformen können die Gleichung (6) und das Derivat von Gleichung (7) kombiniert werden, um die Ergebnisse zu optimieren, die durch die Diagnosebeobachtungsvorrichtung erhalten werden.

[0086] Obgleich bestimmte beispielhafte bevorzugte Ausführungsformen beschrieben und in den begleitenden Zeichnungen gezeigt wurden, versteht es sich, dass diese Ausführungsformen lediglich die Erfindung im weiten Sinne veranschaulichen und die Erfindung in ihrem weiten Sinne nicht einschränken. Die vorliegende Erfindung wird nur durch den Wortlaut der angehängten Ansprüche eingeschränkt.

Patentansprüche

1. Motorzustand-Überwachungssystem (**30**) zum Überwachen des Betriebszustandes eines Motors (**10**), das mehrere Sensoren (**34, 35** und **36**) zum Messen mehrerer Betriebssignale des Motors (**10**) und ein Computermittel (**42**), das durch die Sensoren (**34, 35** und **36**) mit dem Motor (**10**) gekoppelt werden kann, umfasst, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Computermittel (**42**) umfasst: ein Modell des Motors und Mittel zum Anwenden der mehreren gemessenen Betriebssignale, um eine lineare zeitdiskrete Zustandsgleichung zu lösen; Mittel zum Berechnen eines Residuum, um die Lösung der Zustandsgleichung mit der durch das Modell vorgeschlagenen Lösung zu vergleichen; Mittel, die anhand der Berechnung und des Vergleichs feststellen, ob der Motor ohne einen erfassten Fehler arbeitet; Mittel, die das Residuum mit einem Fehler korrelieren, falls der Motor (**10**) mit einem erfassten Fehler arbeitet, und das Vorhandensein des Fehlers kommunizieren, um einen unerwarteten Motorausfall (**10**) zu verhindern; und Mittel, die während des Betriebs des Motors (**10**) diese Schritte in ausgewählten Zeitintervallen wiederholen.

2. Motorzustand-Überwachungssystem (**30**) nach Anspruch 1, das Mittel umfasst, um ein Modellausgang-Spannungssignal anhand der Ist-Eingangsspannung und des Ist-Eingangstroms zu berechnen, die an

den Motor angelegt sind.

3. Motorzustand-Überwachungssystem (30) nach Anspruch 1, das ferner ein Mittel umfasst, um mechanische Fehler des Elektromotors zu klassifizieren, indem Stromwerte der Betriebsparameter mit Referenzwerten der Betriebsparameter verglichen werden.

4. Motorzustand-Überwachungssystem (30) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die mehreren Sensoren (34, 35 und 36) analoge Sensoren sind.

5. Motorzustand-Überwachungssystem (30) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die mehreren Sensoren (34, 35 und 36) ein Spannungssensor (34), ein Stromsensor (35) bzw. ein Drehzahlsensor (36) sind.

6. Motorzustand-Überwachungssystem (30) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, das ferner ein multifunktionales Board (37) umfasst, um die Ausgänge der mehreren Sensoren (34, 35 und 36) zu empfangen, das analoge Signal in ein digitales Signal umzusetzen und das transformierte Signal zu dem Computer (42) zu senden.

7. Motorzustand-Überwachungssystem (30) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Motor (10) ein Kleinelektromotor ist.

8. Verfahren zum Überwachen des Betriebs eines Elektromotors (10), um Fehler zu erfassen, die einen Ausfall des Motors (10) hervorrufen können, das die folgenden Schritte umfasst:

Bereitstellen eines Modells des Motors (10) in einem Computer (42);

Koppeln des Motors (10) mit dem Computer (42) durch mehrere Sensoren (34, 35 und 36);

Messen mehrerer Betriebssignale des Motors (10) mit den Sensoren (34, 35 und 36);

Anwenden der mehreren gemessenen Betriebssignale, um eine lineare zeitdiskrete Zustandsgleichung zu lösen;

Berechnen eines Residuums, um die Lösung der Zustandsgleichung mit der durch das Modell vorgeschlagenen Lösung zu vergleichen;

Feststellen, ob der Motor (10) ohne einen erfassten Fehler arbeitet, anhand des Berechnungs- und des Vergleichsschrittes;

Korrelieren des Residuums mit einem Fehler, falls der Motor (10) mit einem erfassten Fehler arbeitet, und Kommunizieren des Vorhandenseins des Fehlers, um einen unerwarteten Ausfall des Motors (10) zu verhindern; und

Wiederholen der Schritte in ausgewählten Zeitintervallen während des Betriebs des Motors (10) mit Ausnahme des Schrittes des Bereitstellens eines Modells.

9. Verfahren nach Anspruch 8, bei dem der Modellentwicklungsschritt die folgenden Schritte umfasst:

Messen der Spannung, des Stroms und der Drehzahl des Elektromotors (10);

Multiplizieren der gemessenen Spannung (V), des Stroms (i) und der Drehzahl (w) des Elektromotors (10) mit Invarianten, um eine Darstellung des fehlerfreien Systems zu erhalten;

Berechnen und Beibehalten des Ergebnisses der diskreten Zustandsraum-Gleichungen:

$$x(k+1) = A x(k) + B u(k)$$

$$y(k) = C x(k)$$

wobei x, u und y der Zustandsvektor, der Eingangsvektor bzw. der Ausgangsvektor sind und k diskrete Zeitelemente bezeichnet und wobei A, B und C bekannte Nennmatrizen des Elektromotors (10) sind;

Wiederholen des Messschrittes und des Multiplikationsschrittes;

Berechnen des Ergebnisses der diskreten Zustandsraum-Gleichungen für Ist-Werte:

$$x_f(k+1) = A_f x_f(k) + B_f u_f(k)$$

$$y_f(k) = C_f x(k)$$

Vergleichen der Differenzen zwischen y(k) und y_f(k); und

Wiederholen der Folge von Wiederholungs-, Berechnungs- und

Vergleichsschritten, bis die Differenz einen ausgewählten Schwellenwert übersteigt.

10. Verfahren nach Anspruch 9, bei dem der Schritt des Messens mehrerer Betriebssignale das Messen des Stromausgangs (i) des Motors (10), der an den Motor (10) angelegten Spannung (V) und der Drehzahl (w) des Motors (10) während eines ausgewählten Intervalls umfasst.

11. Verfahren nach Anspruch 9, bei dem der Schritt des Entwickelns des Modells des Motors (10) das Erhalten von Motor-Invarianten für die Induktivität (L), den ohmschen Widerstand (R), das Trägheitsmoment (J) und den Reibkoeffizienten (f) des Motors (10) sowie das Kombinieren der Invarianten mit den gemessenen Signalen gemäß den folgenden Gleichungen umfasst:

$$L di/dt + R i = V + k_1 w \text{ und}$$

$$J dw/dt + f w = k_2 i + M$$

wobei k_1 und k_2 Motorkonstanten sind und M die Motorlast darstellt.

12. Verfahren nach Anspruch 11, bei dem der Schritt des Korrelierens und des Übermittelns die folgenden Schritte umfasst:

Angeben eines im Ungleichgewicht befindlichen Rotors (12) in Reaktion auf eine Änderung des (L di/dt)-Betriebsparameters;

Angeben eines Fehlers des Kollektors (22) in Reaktion auf eine Änderung des R_i -Parameters;

Angeben eines Fehlers des Lagers (18) in Reaktion auf eine Oszillationsänderung des (L di/dt)-Parameters; und

Angeben eines Fehlers des Lagers (18) in Reaktion auf eine Änderung sowohl des (L di/dt)-Parameters als auch des f_w -Parameters.

13. Verfahren nach Anspruch 9, bei dem das Intervall im Bereich von 400 Millisekunden bis 1000 Millisekunden liegt.

14. Verfahren nach Anspruch 10, bei dem die Betriebsparameter mit einer Abtastfrequenz im Bereich von 500 Hz bis 24 kHz abgetastet werden.

15. Verfahren nach Anspruch 8, das dann, wenn die Folge von Schritten als Ergebnis eine Differenz hat, die den ausgewählten Schwellenwert übersteigt, ferner die folgenden Schritte umfasst:

Auswählen eines Parameter-Schwellenwertes für die Induktivität (L di/dt), des ohmschen Motorwiderstandes (R_i), des Motorträgheitsmoments (J dw/dt) und der Motorkonstanten (f_w , $k_1 w$ und $i_2 k_2$); und Vergleichen jedes Produkts $L di/dt$, R_i , $J dw/dt$, f_w , $k_1 w$ und $i_2 k_2$ mit einem Entsprechenden der ausgewählten Schwellenwerte.

16. Verfahren nach Anspruch 15, das ferner den Schritt des Anzeigens der Ergebnisse der Vergleichsschritte umfasst.

17. Modellbasiertes Fehlererfassungs- und Fehlerdiagnoseverfahren zum Erfassen von Fehlern in mehreren Motoren (10) eines gemeinsamen Motortyps und zum Entwickeln von Diagnoseinformationen für die Korrektur der Fehler, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:

Erzeugen einer modellierten Zustandsdarstellung der mehreren Motoren (10), wobei die modellierte Zustandsdarstellung eine aus den mehreren Motoren (10) abgeleitete Schwellenwertgrenze enthält;

Messen von Betriebsparametern jedes der mehreren Motoren (10), um eine modellierte Zustandsdarstellung jedes der Motoren (10) zu entwickeln;

Vergleichen der modellierten Zustandsdarstellung der mehreren Motoren (10) mit der modellierten Zustandsdarstellung jedes der Motoren (10);

Feststellen, ob jeder der Motoren (10) ein fehlerhafter Motor (10) ist;

Entfernen des fehlerhaften Motors (10) aus den mehreren Motoren (10) in Reaktion auf den Feststellungsschritt;

Ändern der Schwellenwertgrenze der modellierten Zustandsdarstellung der mehreren Motoren (10) in Reaktion auf eine Erfassung des fehlerhaften Motors (10); und

Wiederholen des Vergleichs-, des Feststellungs-, des Entfernungsschrittes und des Änderungsschrittes für jeden der mehreren Motoren (10).

18. Verfahren nach Anspruch 17, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:

Auswählen von mehreren Motoren (10), die Motoren (10), die fehlerfrei arbeiten, und Motoren (10), die mit ei-

nem oder mehreren unbekannten Fehlern arbeiten, umfassen;

Messen mehrerer Betriebssignale für jeden dieser mehreren Motoren (10);

unter Verwendung der mehreren Betriebssignale Lösen einer Gruppe diskreter Zustandsraum-Gleichungen für die mehreren Motoren (10), wobei die Gruppe diskreter Zustandsraum-Gleichungen in der folgenden Form gegeben ist:

$$x(k + 1) = A x(k) + B u(k)$$

$$y(k) = C x(k)$$

wobei x , u und y ein Zustandsvektor, ein Eingangsvektor bzw. ein Ausgangsvektor sind, k diskrete Zeitinkremente bezeichnet und A , B und C bekannte Nennmatrizen der mehreren Motoren (10) sind;

Vergleichen der Lösung der Gruppe diskreter Zustandsraum-Gleichungen für jeden der mehreren Motoren (10) mit der Lösung der Gruppe diskreter Zustandsraum-Gleichungen für die mehreren Motoren (10), um einen fehlerhaften Motor (10) zu identifizieren;

Entfernen des fehlerhaften Motors (10) aus den mehreren Motoren (10), um eine zweite Mehrzahl von Motoren (10) zu bilden; und

erneutes Berechnen der ersten Gruppe diskreter Zustandsraum-Gleichungen für die zweite Mehrzahl von Motoren (10).

19. Verfahren nach Anspruch 18, bei dem der Messschritt ferner die folgenden Schritte umfasst:

Messen der Spannung, des Stroms und der Drehzahl jedes der mehreren Motoren (10) mit mehreren Sensoren;

Multiplizieren der gemessenen Spannung (V), des gemessenen Stroms (i) und der gemessenen Drehzahl (w) jedes der mehreren Motoren (10) mit ausgewählten Invarianten in Übereinstimmung mit den folgenden Motorinvarianten-Gleichungen:

$$L di/dt + Ri = V + k_1 w_i$$

$$J dw/dt + fw = k_2 i_2 + M$$

um Motorinvarianten für die Induktivität (L), den ohmschen Widerstand (R), das Trägheitsmoment (J) und den Reibkoeffizienten (f) jedes der mehreren Motoren (10) zu erhalten, wobei k_1 und k_2 Motorkonstanten sind und M die Last jedes der mehreren Motoren (10) darstellen.

20. Verfahren nach Anspruch 19, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:

Vergleichen der Lösung der Gruppe von Motorinvarianten-Gleichungen für jeden der mehreren Motoren (10) mit der Lösung der Gruppe von Motorinvarianten-Gleichungen für die mehreren Motoren (10), um einen fehlerhaften Motor (10) zu identifizieren;

Entfernen des fehlerhaften Motors (10) aus den mehreren Motoren (10), um eine zweite Mehrzahl von Motoren (10) zu bilden; und

erneutes Berechnen der Motorinvarianten-Gleichungen für die zweite Mehrzahl von Motoren (10).

21. Verfahren nach Anspruch 20, das ferner den Schritt umfasst, bei dem festgestellt wird, ob jeder der mehreren Motoren (10) fehlerhaft ist.

22. Verfahren nach Anspruch 21, das ferner den Schritt umfasst, bei dem in Reaktion auf den Feststellungsschritt der jedem der mehreren Motoren (10) zugeordnete Fehler klassifiziert wird.

23. Verfahren nach Anspruch 18, bei dem der Verwendungsschritt ferner den Schritt des Auswählens einer Schwellenwertgrenze auf der Grundlage zweier Standardabweichungen um den Mittelwert der kombinierten Mehrzahl von Betriebssignalen umfasst.

24. Verfahren nach Anspruch 17, das ferner die folgenden Schritte umfasst:

Erzeugen eines Diagnosemodells aus den mehreren Motoren (10), wobei das Diagnosemodell physikalische Parameter und eine jedem physikalischen Parameter zugeordnete Standardabweichung enthält, wobei das Diagnosemodell eine Schwellenwertgrenze besitzt, die jedem der physikalischen Parameter zugeordnet ist;

Messen ausgewählter physikalischer Parameter jedes der mehreren Motoren (10);

für jeden Motor (10) Vergleichen jedes der ausgewählten physikalischen Parameter mit dem Diagnosemodell; und

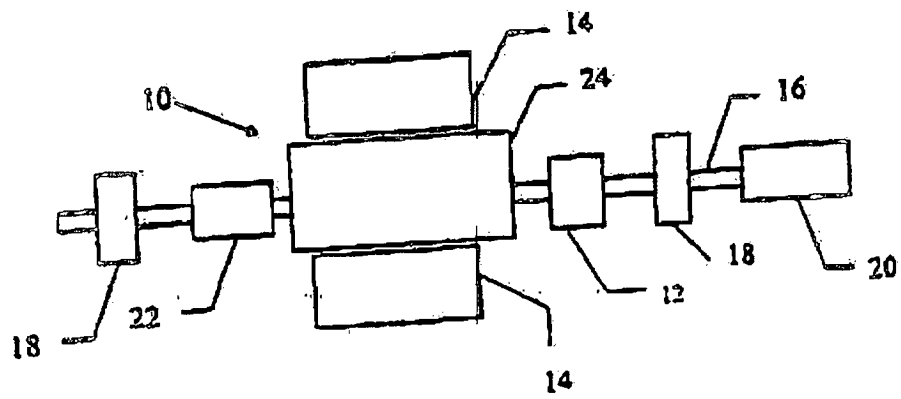
für jeden Motor (**10**) Identifizieren wenigstens eines Fehlers, falls wenigstens einer der ausgewählten physikalischen Parameter die entsprechende Schwellenwertgrenze des physikalischen Parameters in dem Diagnosemodell übersteigt.

25. Verfahren nach Anspruch 24, das ferner das Anzeigen der Ergebnisse des Identifizierungsschrittes umfasst.

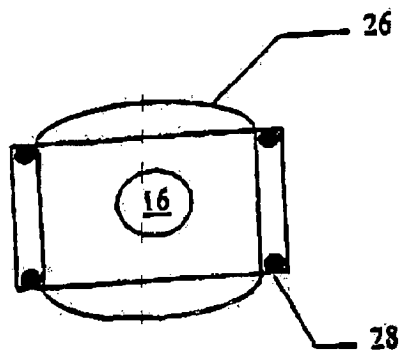
26. Verfahren nach Anspruch 24, bei dem der Identifizierungsschritt ferner die folgenden Schritte umfasst:
Angaben eines im Ungleichgewicht befindlichen Rotors (**10**) in Reaktion auf eine Änderung des $(L \, di/dt)$ -Terms in der ersten Gleichung;
Angaben eines Fehlers des Kollektors (**22**) in Reaktion auf eine Änderung des R_i -Terms in der ersten Gleichung;
Angaben eines Fehlers des Lagers (**18**) in Reaktion auf eine Oszillationsänderung des $(L \, di/dt)$ -Terms in der ersten Gleichung; und
Angaben eines Fehlers des Lagers (**18**) in Reaktion auf eine Änderung sowohl des $(L \, di/dt)$ -Terms als auch des f_w -Terms in der ersten und der zweiten Gleichung.

Es folgen 11 Blatt Zeichnungen

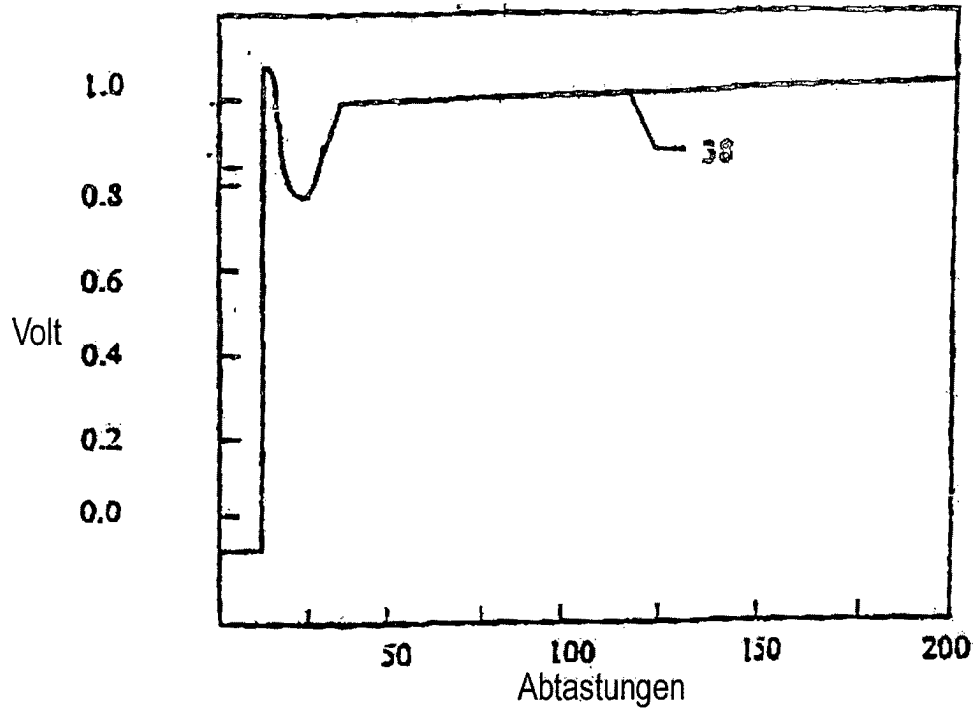
Anhängende Zeichnungen



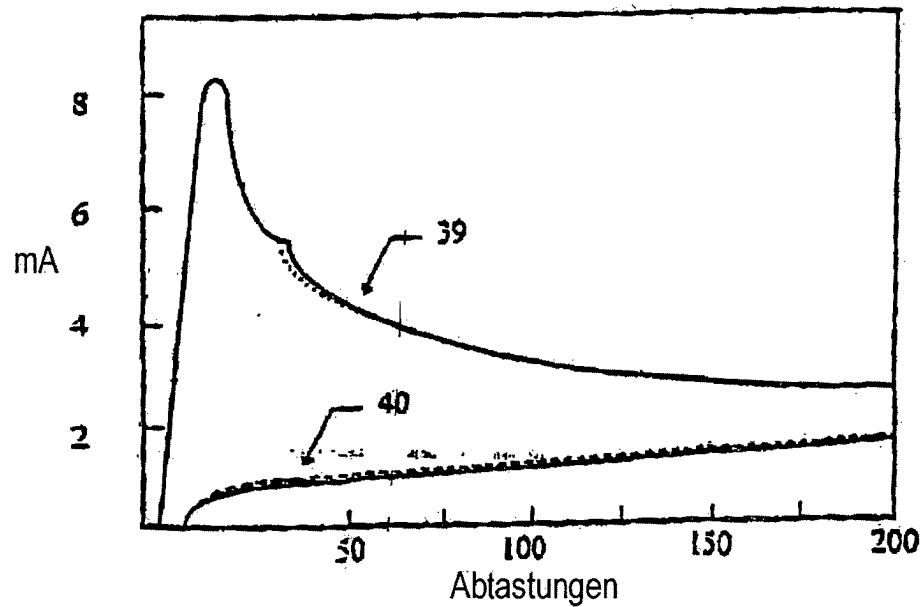
FIGUR 1



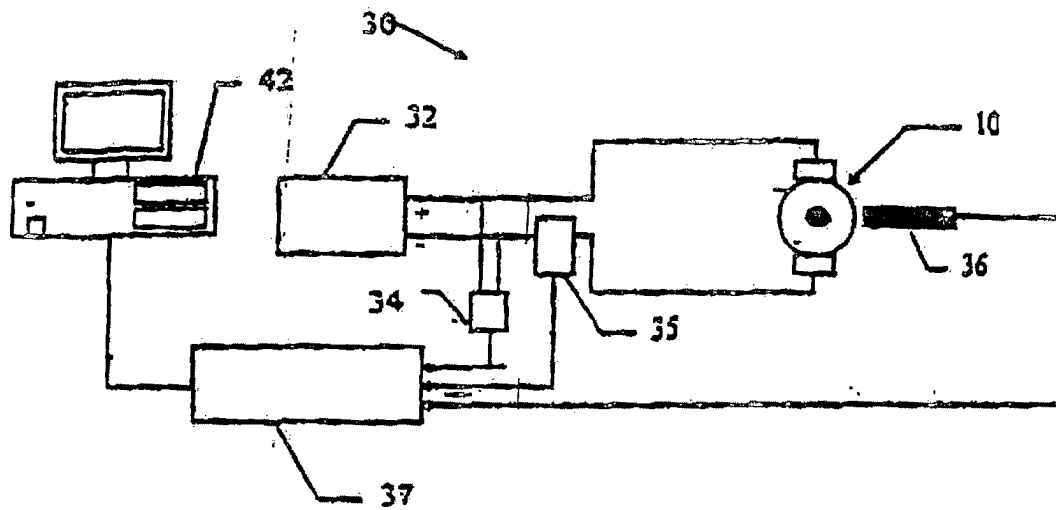
FIGUR 2



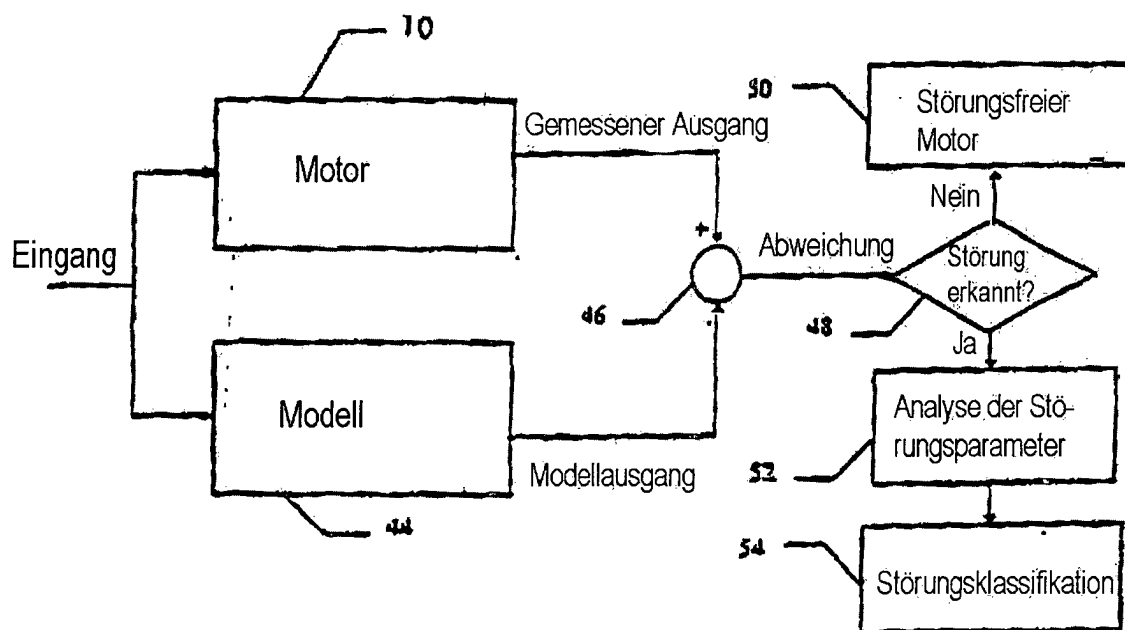
FIGUR 3



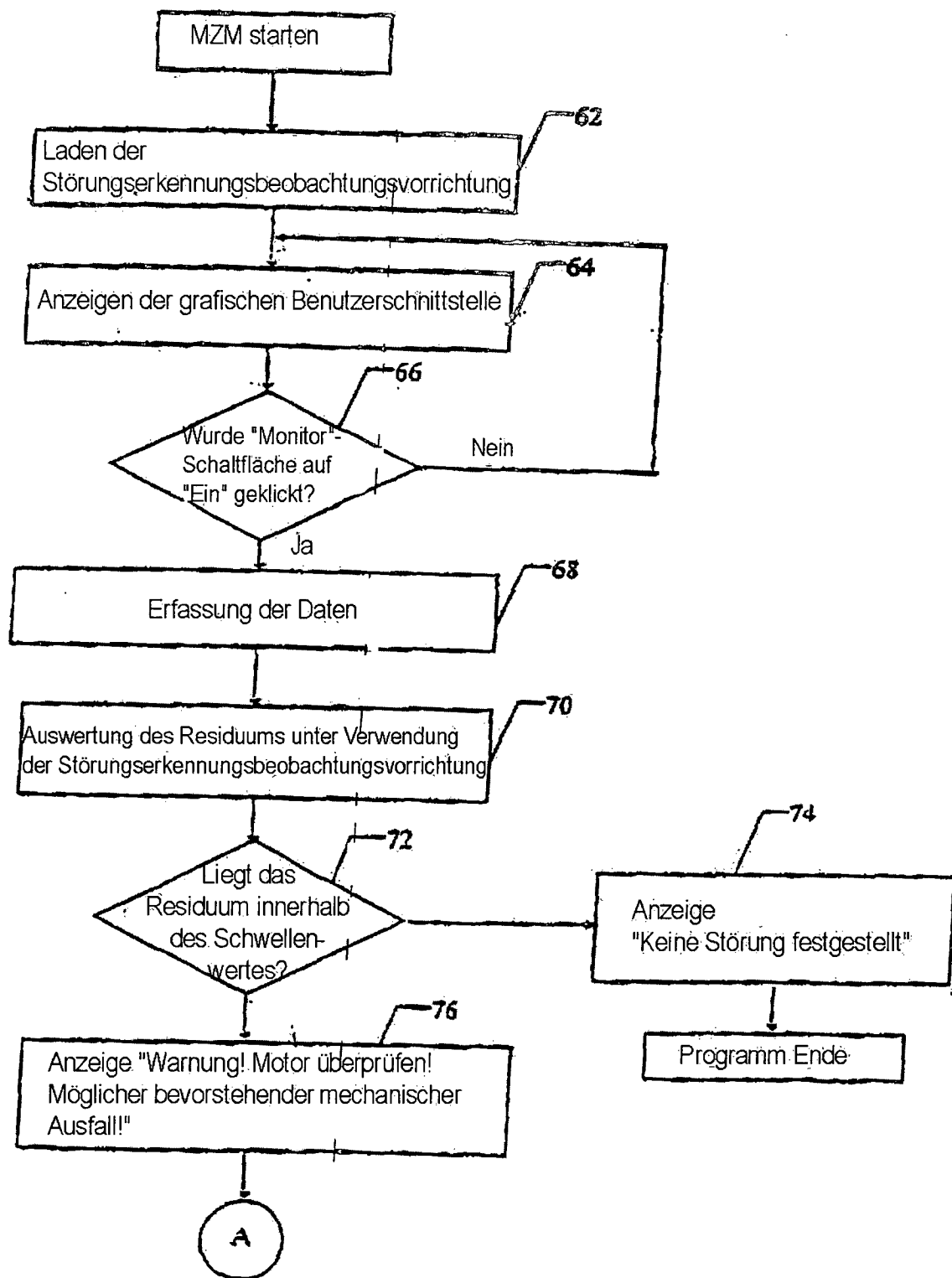
FIGUR 4



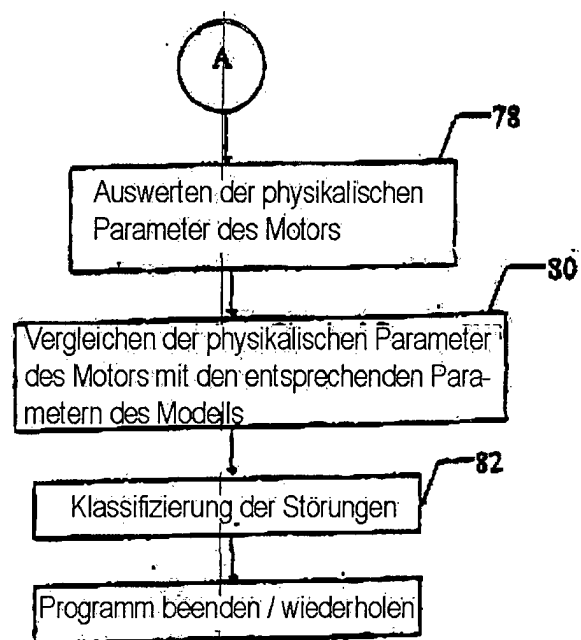
FIGUR 5



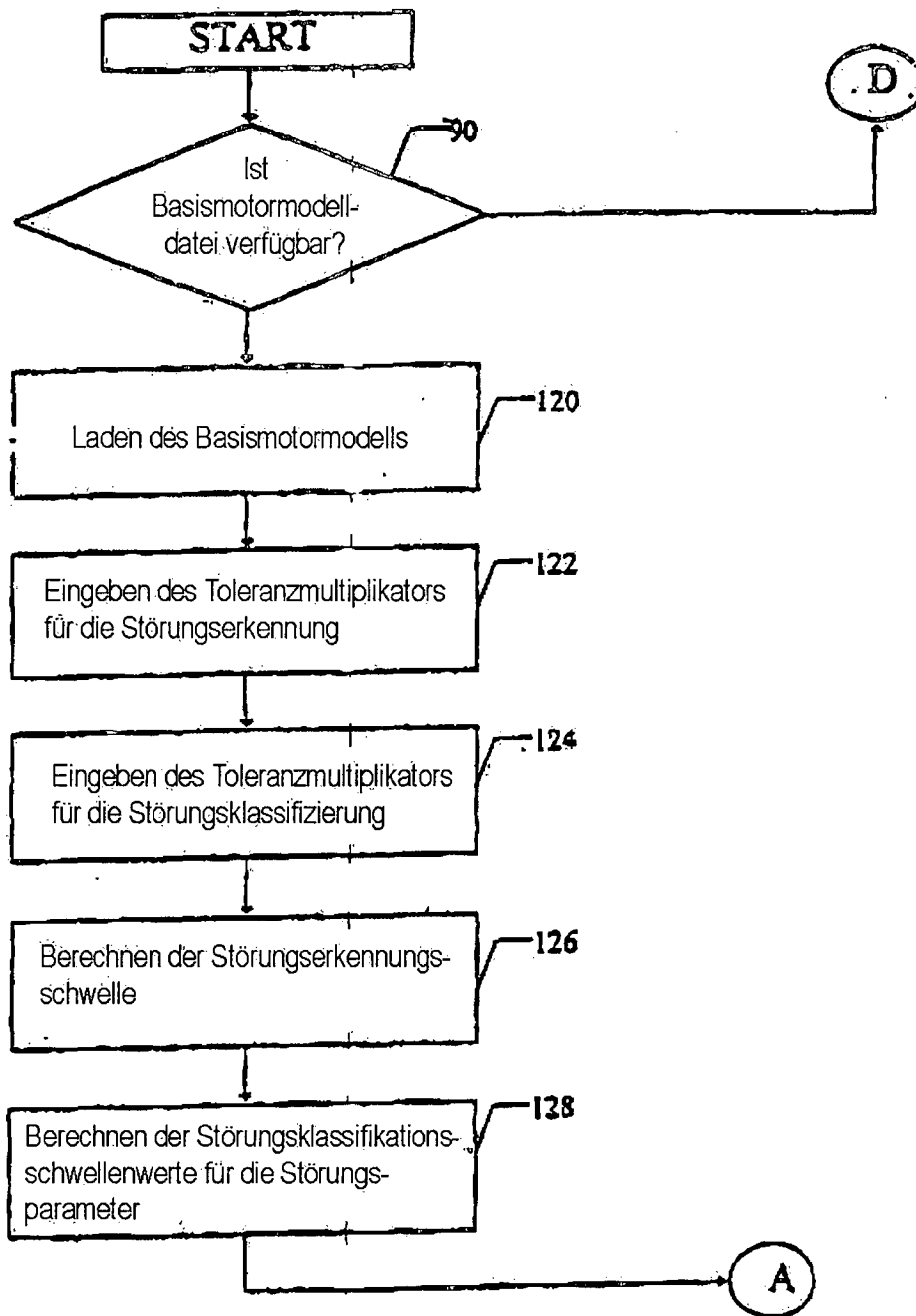
FIGUR 6



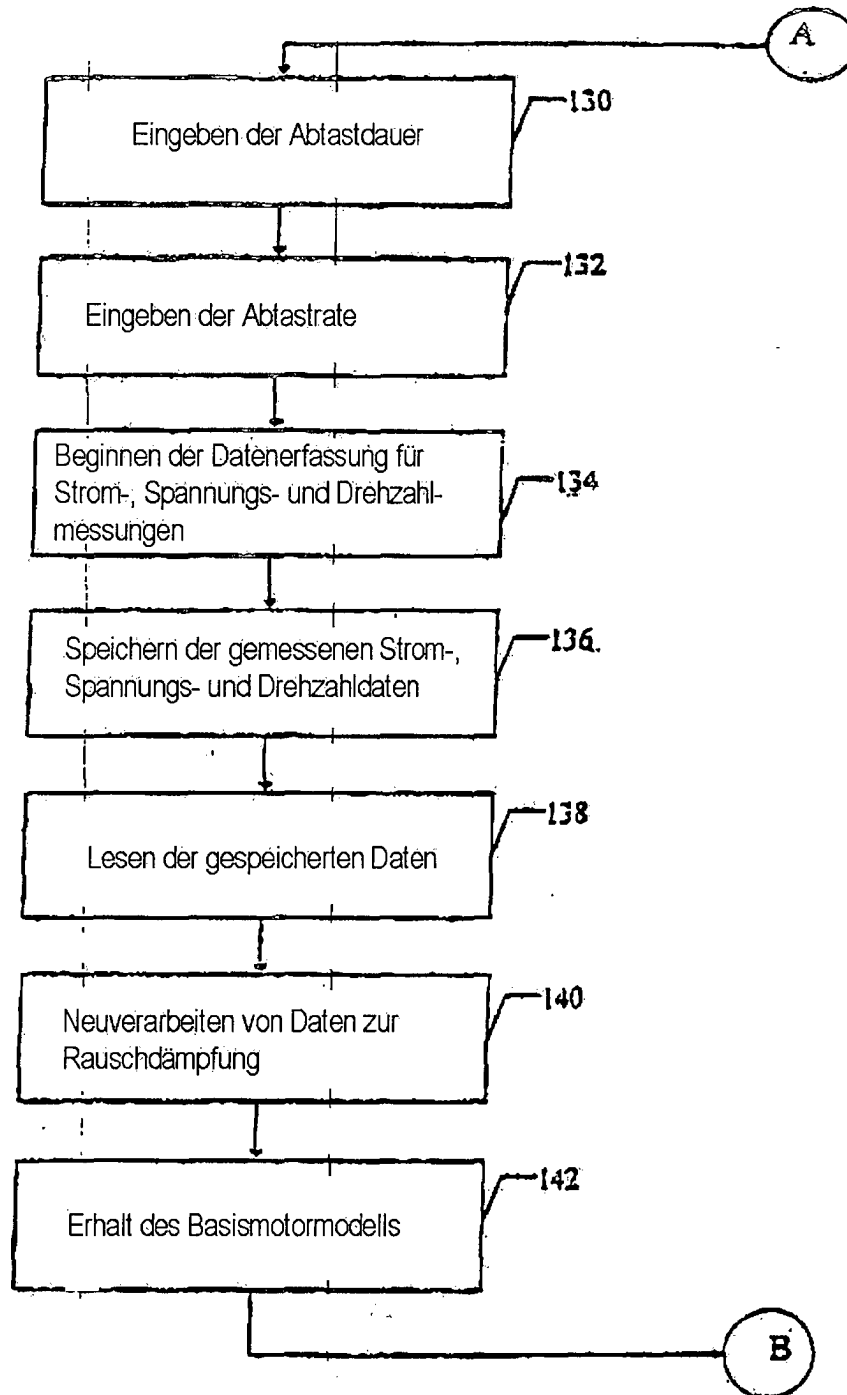
FIGUR 7A



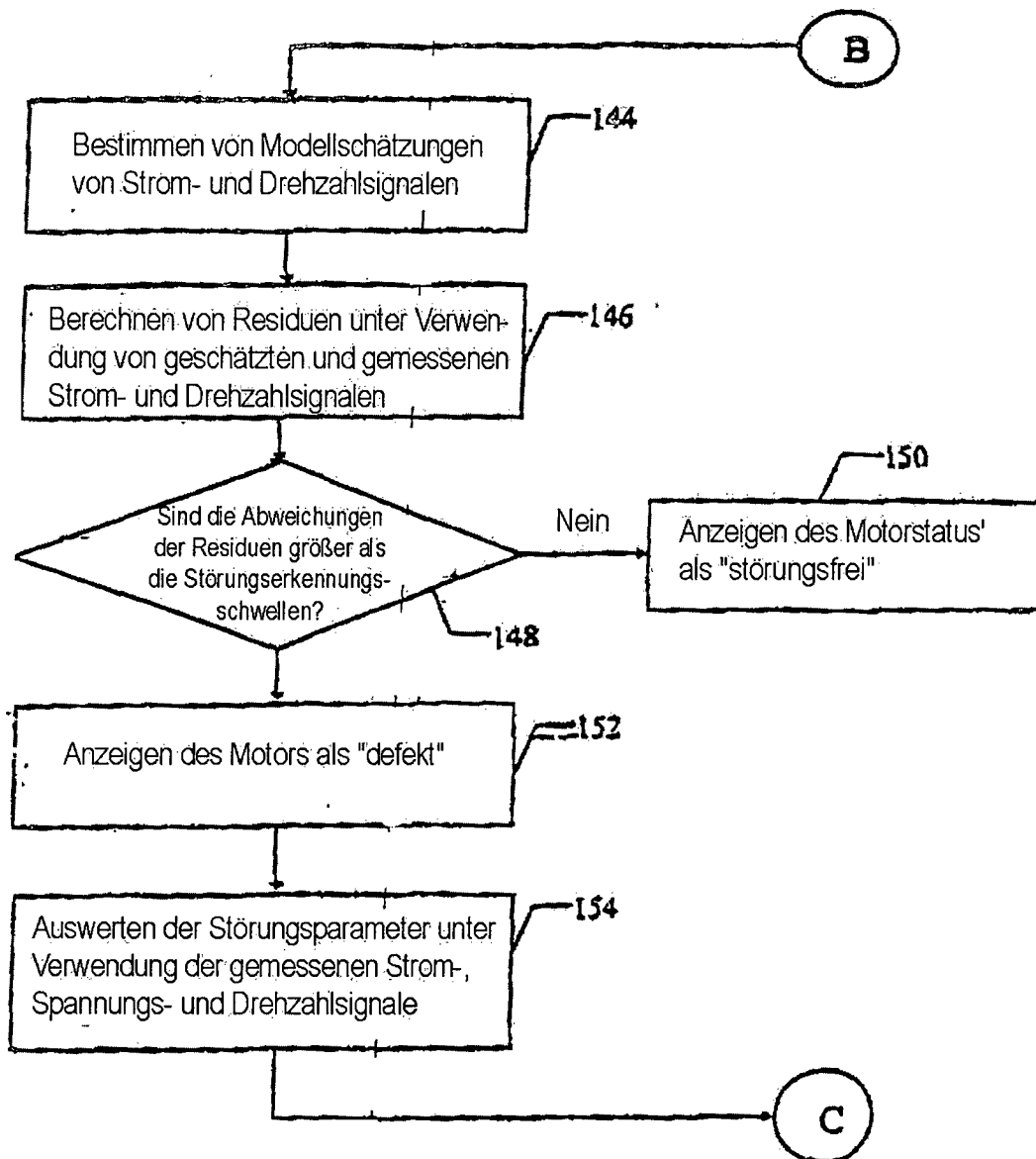
FIGUR 7B



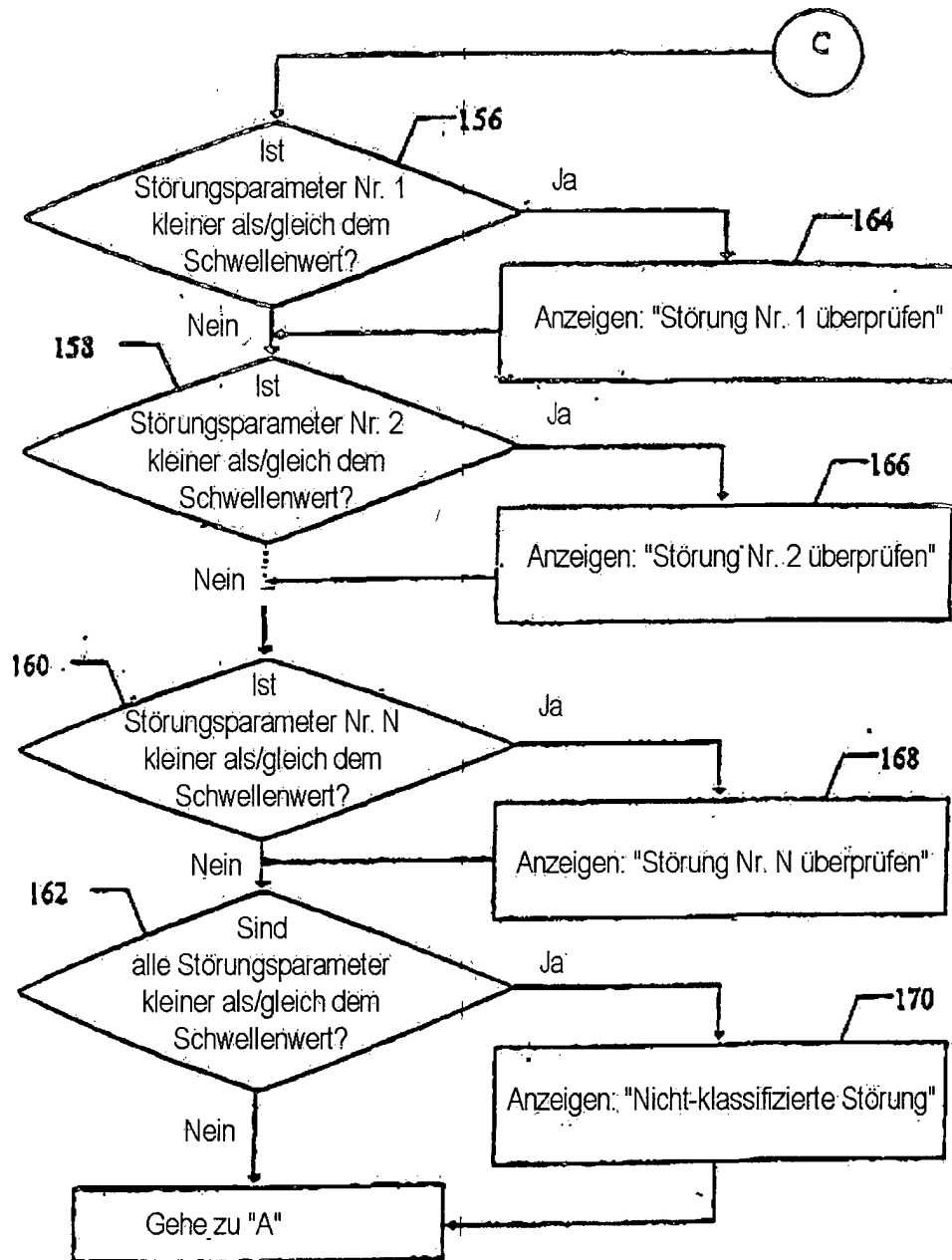
FIGUR 8A



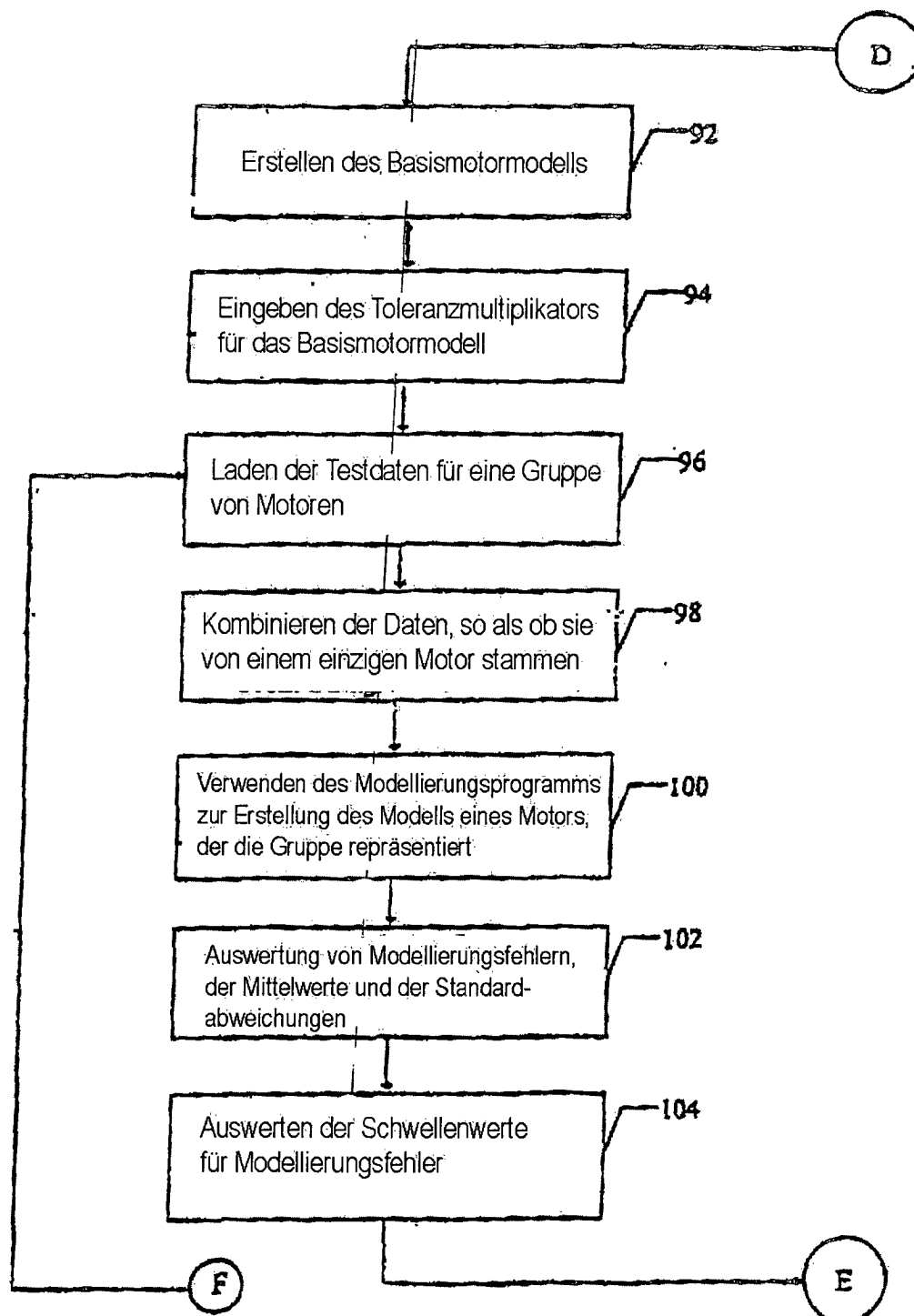
FIGUR 8B



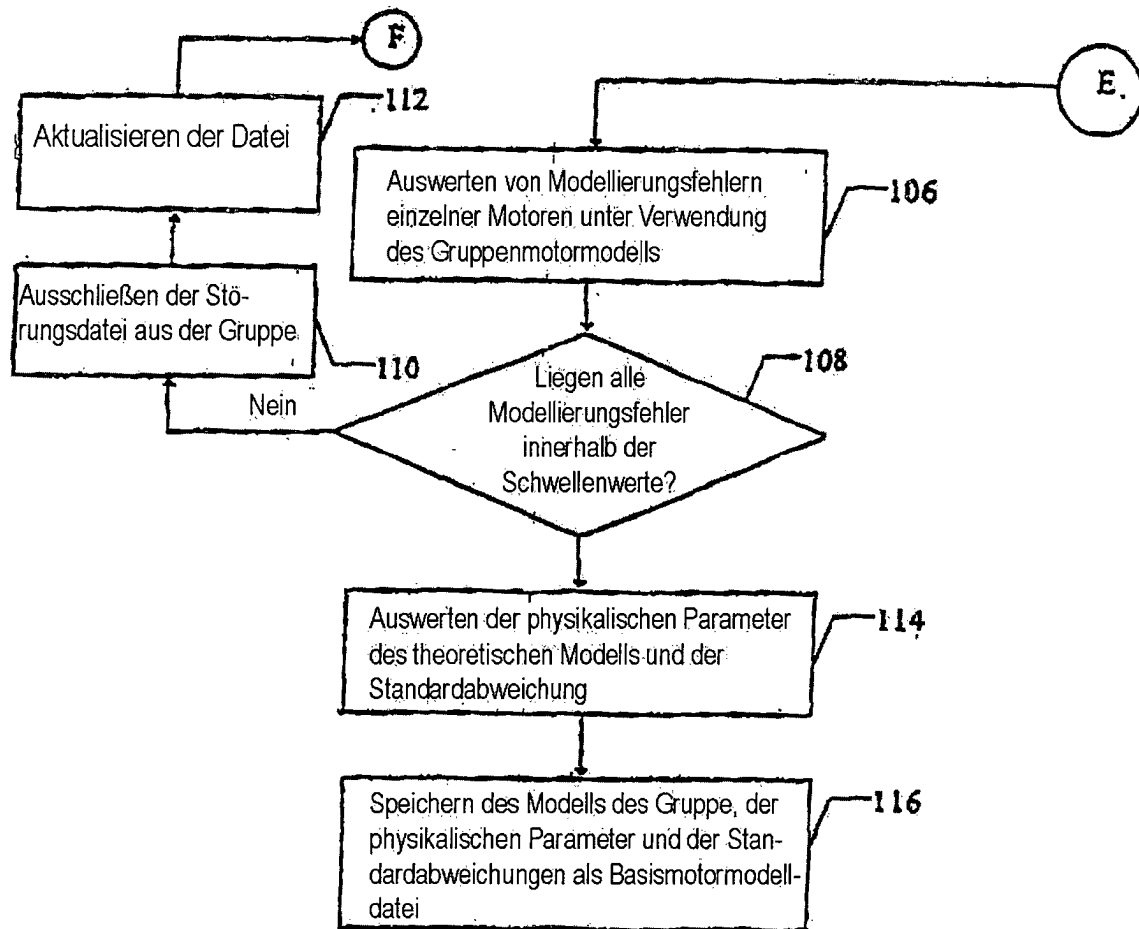
FIGUR 8C



FIGUR 8D



FIGUR 8E



FIGUR 8F