



(19)
 Bundesrepublik Deutschland
 Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2009 050 993 A1** 2010.04.29

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2009 050 993.3**

(22) Anmeldetag: **28.10.2009**

(43) Offenlegungstag: **29.04.2010**

(51) Int Cl.⁸: **B23Q 11/00** (2006.01)

B23Q 17/12 (2006.01)

F16F 15/02 (2006.01)

G05B 19/404 (2006.01)

(30) Unionspriorität:
2008-277139 **28.10.2008** **JP**

(74) Vertreter:
PRÜFER & PARTNER GbR, 81479 München

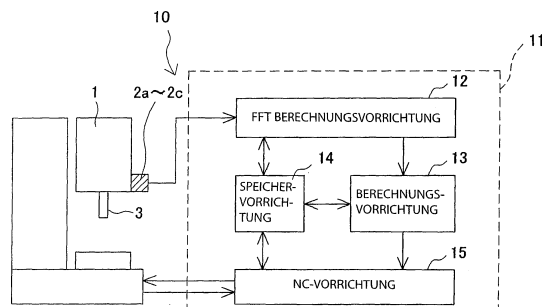
(71) Anmelder:
National University Corporation Nagoya University, Nagoya-shi, Aichi, JP; Okuma Corporation, Niwa, Aichi, JP

(72) Erfinder:
Suzuki, Norikazu, Nagoya-shi, Aichi, JP; Shamoto, Eiji, Nagoya-shi, Aichi, JP; Ueno, Hiroshi, Aichi, JP

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Schwingungsunterdrückungsverfahren und Schwingungsunterdrückungsvorrichtung für eine Werkzeugmaschine**

(57) Zusammenfassung: Ein Schwingungsunterdrückungsverfahren und eine Schwingungsunterdrückungsvorrichtung werden offenbart. Nachdem ein Werkzeug an eine Hauptspindel angebracht wurde (S1), wird ein Modalparameter des Werkzeugs oder eines Werkstücks berechnet (S2). Danach wird basierend auf dem erhaltenen Modalparameter und Bearbeitungsbedingungen eine Relation zwischen einer Ratterfrequenz und einer Phasendifferenz als eine Näherungsformel berechnet (S3, S4). Wenn eine Ratterschwingung nach Beginn der Bearbeitung auftritt (S5), wird unter Verwendung der Näherungsformel eine Ratterfrequenz entsprechend einer Sollphasendifferenz erhalten (S6), und basierend auf der erhaltenen Ratterfrequenz, der Anzahl von Werkzeugspannten und der Hauptspindeldrehzahl wird die optimale Drehzahl berechnet (S7, S8). Die Drehzahl der Hauptspindel wird dann entsprechend der erhaltenen optimalen Drehzahl verändert.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Schwingungsunterdrückungsverfahren und eine Schwingungsunterdrückungsvorrichtung für eine Werkzeugmaschine, die mit einer sich drehenden Welle zum Rotieren eines Werkzeugs oder eines Werkstücks versehen ist, um das Werkstück zu bearbeiten, und spezieller auf ein Schwingungsunterdrückungsverfahren und eine Schwingungsunterdrückungsvorrichtung, um eine Verschlechterung einer Bearbeitungsoberfläche und eine Verkürzung einer Werkzeuglebensdauer aufgrund von einer Ratterschwingung, die während einem Bearbeiten des Werkstücks erzeugt wird, zu verhindern.

[0002] Bei einem Stirnfräsbearbeiten tritt in Abhängigkeit von Bearbeitungsbedingungen, wie z. B. einer Schnitttiefe und einer Drehzahl einer drehenden Welle, eine Ratterschwingung auf, was zu einer Verschlechterung einer Bearbeitungsoberfläche führt. Die Ratterschwingung wird das Werkzeug beschädigen, was zu einem Verkürzen der Werkzeuglebensdauer führt.

[0003] Eine Technik zum Unterdrücken einer Ratterschwingung ist aus Nicht-Patentdokument 1 bekannt, und ein Schwingungsunterdrückungsverfahren, das die obige Technik verwendet, ist aus Patentdokument 1 bekannt. Entsprechend dem Schwingungsunterdrückungsverfahren wird, um eine Ratterschwingung vom regenerativen Typ, wie eine selbsterregte Schwingung, die eine Verschlechterung einer Genauigkeit beim Endbearbeiten der Bearbeitungsoberfläche verursacht, zu unterdrücken, die Eigenfrequenz eines ratterschwingungserzeugenden Systems aus einem Werkzeug, einem Werkstück und dergleichen durch eine impulsartige Anregung des Werkzeugs oder des Werkstücks erhalten, und die erhaltene Eigenfrequenz wird mit 60 multipliziert und dann durch die Anzahl von Werkzeugspannuten und eine vorbestimmte ganze Zahl geteilt, um einen Wert zu erhalten, der eine optimale Drehzahl ist. Ein Bearbeiten des Werkstücks wird unter Verwendung der erhaltenen optimalen Drehzahl durchgeführt.

[0004] Zwischenzeitlich ist, alternativ zur Verwendung der Eigenfrequenz der Werkzeugmaschine, ein Berechnungsverfahren, das eine Ratterfrequenz während eines auftretenden Ratterns verwendet, ebenfalls aus dem Nicht-Patentdokument 2 und aus dem Patentdokument 2 bekannt. Gemäß der Offenbarung von Patentdokument 2 ist ein akustischer Sensor nahe des Werkzeugs oder des Werkstücks angeordnet, um so eine Schwingungsfrequenz während der Rotation des Werkzeugs oder des Werkstücks zu erfassen, und eine Ratterfrequenz während einem Bearbeiten wird basierend auf der erfassten Schwingungsfrequenz erhalten. Die erhaltene Ratterfrequenz wird mit 60 multipliziert und dann durch die Anzahl von Werkzeugspannuten und eine vorbestimmte ganze Zahl dividiert, um eine optimale Drehzahl zu erhalten. Jedoch zeigt das Nicht-Patentdokument 2, dass ein Teiler, der mit dem aktuellen stabilen Bereich korrespondiert, nicht gleich einem ganzzahligen Vielfachen der Anzahl von Werkzeugspannuten ist. Die Dezimalstelle des Teilers gibt eine Phasendifferenz zwischen der durch die momentan verwendete Schneidklinge erzeugten Oberfläche und der durch die vorangehende Schneidklinge erzeugten Oberfläche an, und daher bedingt das in Patentdokument 2 offenbarte Verfahren durch die Phasendifferenz einen Fehler bei der optimalen Drehzahl. Es ist bekannt, dass ein Zusammenhang zwischen der Phaseninformation und der optimalen Drehzahl besteht, und eine Ratterschwingung kann durch Erhalten der Drehzahl entsprechend der Phaseninformation, die stabil sein soll, unterdrückt werden.

Patentdokument 1: Japanische offengelegte Patentveröffentlichung Nr. 2003-340627;

Patentdokument 2: Japanische Patentveröffentlichung Nr. 2001-517557 als veröffentlichte japanische Übersetzung einer PCT-Anmeldung;

Nicht-Patentdokument 1: CIRP, Vol. 44/1 (1995) Analytische Vorhersage von Stabilitätskurven (stability lobes) beim Fräsen;

Nicht-Patentdokument 2: Workshop-material and papers, 2001-JSME (Japan Society of Mechanical Engineers) Grundlagenwissen von Schneidbearbeitung und Ratterschwingungen.

[0005] Jedoch erfordert das wie in Patentdokument 1 offenbarte Schwingungsunterdrückungsverfahren eine teure Impulsvorrichtung, und eine Anregung, die die Impulsvorrichtung verwendet, erfordert fortgeschrittene Techniken und große Sorgfalt. Weiterhin neigt in den meisten Fällen die Eigenfrequenz, die vor einem Bearbeiten mit der Impulsanregung oder dergleichen gemessen wird, dazu, sich von der Eigenfrequenz während dem aktuellen Bearbeiten zu unterscheiden, und daher ist es schwierig, basierend auf diesem Verfahren, die optimale Drehzahl genau zu erhalten.

[0006] Weiterhin ist es notwendig, da sich eine Ratterfrequenz entsprechend einer Drehzahl verändert, um die optimale Drehzahl genau zu erhalten, die Ratterfrequenz entsprechend der optimalen Drehzahl zu erhalten. Aus diesem Grund ist es gemäß dem im Patentdokument 2 offenbarten Schwingungsunterdrückungsver-

fahren, in dem die gemessene Ratterfrequenz, wie sie ist, verwendet wird, schwierig, die optimale Drehzahl genau zu erhalten.

[0007] In der Zwischenzeit kann, wie oben beschrieben, eine Ratterschwingung durch Erhalten der Drehzahl entsprechend der Phaseninformation, die stabil sein soll, unterdrückt werden. Jedoch ist es aus diesem Grund notwendig, die Ratterfrequenz entsprechend der vorgesehenen Phaseninformation zu erhalten. Obwohl die Phaseninformation und die Drehzahl entsprechend einer bestimmten Ratterfrequenz basierend auf dem wie im Nicht-Patentdokument 2 offenbarten Verfahren berechnet werden kann, ist es sehr schwierig, eine umgekehrte Transformation unter Verwendung dieser Berechnungsformel durchzuführen. Als ein Ergebnis ist es von einem praktischen Betrachtungspunkt aus schwierig, die Ratterfrequenz entsprechend der vorgesehenen Phaseninformation analytisch zu erhalten. Daher sollte eine Berechnung wiederholt werden, während ein bestimmter definierter Bereich nach der Ratterfrequenz abgesucht wird, und es muss eine bestimmte Ratterfrequenz, bei der die erhaltene Phaseninformation ausreichend nahe bei der vorgesehenen Phaseninformation ist, verwendet werden.

[0008] Hinsichtlich der obigen Nachteile sucht die vorliegende Erfindung ein Schwingungsunterdrückungsverfahren und eine Schwingungsunterdrückungsvorrichtung für eine Werkzeugmaschine bereit zu stellen, die die optimale Drehzahl zur effektiven Ratterfrequenzunterdrückung leicht und hochpräzise erhalten kann, ohne aufwendige, wiederholte Berechnungen zu erfordern.

[0009] Die vorliegende Erfindung wurde in einem Bestreben gemacht, die obigen Nachteile zu eliminieren und erläuternde, nicht eingrenzende Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung überwinden die obigen Nachteile und andere, nicht oben beschriebene Nachteile.

[0010] Die Aufgabe wird mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Weiterbildungen der Erfindung sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche.

[0011] Gemäß einem ersten Aspekt der vorliegenden Erfindung wird ein Verfahren einer Unterdrückung einer Ratterschwingung bei einer Werkzeugmaschine während einer Bearbeitung eines Werkstücks bereitgestellt, wobei die Werkzeugmaschine mit einer drehenden Welle zum Rotieren eines Werkzeugs oder des Werkstücks versehen ist, und angenommen wird, dass eine Dezimalstelle einer Lösung der folgenden Formel:

$$60 \times \text{Ratterfrequenz} / (\text{Anzahl von Werkzeugspannuten} \times \text{Drehzahl der drehenden Welle})$$

als eine Phaseninformation gegeben ist, wobei das Verfahren aufweist:

Einen ersten Schritt eines Anbringens des Werkzeugs an der drehenden Welle und Berechnen eines Modalparameters des Werkzeugs oder des Werkstücks; einen zweiten Schritt eines Berechnens einer Relation zwischen einer Ratterfrequenz und der Phaseninformation als eine Näherungsformel, basierend auf dem Modalparameter und den Bearbeitungsbedingungen; einen dritten Schritt eines Erfassens von einer durch die die Ratterschwingung verursachten zeitbereichsweisen Schwingung; einen vierten Schritt eines Berechnens einer Ratterfrequenz und eines frequenzbereichsweisen Eigenwerts der basierend auf der in dem dritten Schritt erfaßten Schwingung berechneten Ratterfrequenz; und einen fünften Schritt eines Erhaltens einer Ratterfrequenz entsprechend der Phaseninformation, die unter Verwendung der Näherungsformel als ein Sollwert ausgewählt wurde, wenn der in dem vierten Schritt berechnete Eigenwert einen vorbestimmten Grenzwert überschreitet, und danach eines Berechnens einer optimalen Drehzahl unter Verwendung der erhaltenen Ratterfrequenz und der Anzahl von Werkzeugspannuten.

[0012] Entsprechend einem zweiten Aspekt der vorliegenden Erfindung wird in dem zweiten Schritt die Näherungsformel durch eine Bézier-Kurve oder eine B-spline-Kurve ausgedrückt.

[0013] Gemäß einem dritten Aspekt der vorliegenden Erfindung, der auf dem ersten Aspekt der vorliegenden Erfindung oder dem zweiten Aspekt der Erfindung basiert, weist das Verfahren weiterhin ein Berechnen einer Phaseninformation aus der Formel der vorliegenden Erfindung unter Verwendung der im vierten Schritt berechneten Ratterfrequenz und der Drehzahl der drehenden Welle entsprechend der Ratterfrequenz, und Korrigieren des Modalparameters oder der Näherungsformel unter Verwendung der erhaltenen Ratterfrequenz und der Phaseninformation, auf.

[0014] Gemäß einem vierten Aspekt der vorliegenden Erfindung wird eine Schwingungsunterdrückungsvorrichtung zum Unterdrücken einer Ratterschwingung einer Werkzeugmaschine während einer Bearbeitung eines Werkstücks bereitgestellt, wobei die Werkzeugmaschine mit einer drehenden Welle zum Rotieren eines

Werkzeugs oder des Werkstücks versehen ist, und angenommen wird, dass die Dezimalstelle einer Lösung der folgenden Gleichung:

$$60 \times \text{Ratterfrequenz} / (\text{Anzahl von Werkzeugspannuten} \times \text{Drehzahl der drehenden Welle})$$

als eine Phaseninformation gegeben ist, wobei die Schwingungsunterdrückungsvorrichtung aufweist: Eine Bestimmungseinheit, die dazu konfiguriert ist, einen Modalparameter des Werkzeugs oder des Werkstücks zu berechnen während das Werkzeug an der drehenden Welle angebracht ist; eine erste Berechnungseinheit, die dazu konfiguriert ist, eine Relation zwischen einer Ratterfrequenz und der Phaseninformation der Werkzeugspannuten als eine Näherungsformel, die auf dem Modalparameter und den Bearbeitungsbedingungen basiert, zu berechnen; eine Schwingungserfassungseinheit, die dazu konfiguriert ist, eine durch die Ratterschwingung verursachte zeitbereichsweise Schwingung zu erfassen; eine zweite Berechnungseinheit, dazu konfiguriert, eine Ratterfrequenz und einen frequenzbereichswisen Eigenwert der auf der durch die Schwingungserfassungseinheit erfassten Schwingung basierenden, berechneten Ratterfrequenz zu berechnen; und eine dritte Berechnungseinheit, die dazu konfiguriert ist, eine Ratterfrequenz entsprechend der Phaseninformation, die unter Verwendung der Näherungsformel als ein Zielwert ausgewählt wurde, zu erhalten wenn der durch die zweite Berechnungseinheit berechnete Eigenwert einen vorbestimmten Schwellwert überschreitet, und um danach unter Verwendung der erhaltenen Ratterfrequenz und der Anzahl von Werkzeugspannuten eine optimale Drehzahl zu berechnen.

[0015] Mit den obigen Ausgestaltungen des Schwingungsunterdrückungsverfahrens und der Schwingungsunterdrückungsvorrichtung gemäß dem ersten und dem vierten Aspekt der vorliegenden Erfindung ist möglich, die optimale Drehzahl, um analytisch eine Ratterschwingung zu unterdrücken, leicht und mit hoher Genauigkeit zu erhalten ohne wiederholte Berechnungen zu erfordern, die aufwendig sind und zu ungenaueren Lösungen führen.

[0016] Mit der obigen Konfiguration aus dem zweiten Aspekt der vorliegenden Erfindung kann zusätzlich zu den obigen vorteilhaften Effekten aus dem ersten Aspekt der vorliegenden Erfindung die Näherungsformel leicht unter Verwendung einer Bézier-Kurve oder einer B-spline-Kurve, die als Näherungsformel funktioniert und die Relation zwischen Ratterfrequenz und Phaseninformation angibt, bereitgestellt werden.

[0017] Mit der obigen Konfiguration aus dem dritten Aspekt der vorliegenden Erfindung kann, wo nötig, zusätzlich zu den obigen vorteilhaften Effekten, basierend auf den aktuellen Bearbeitungsdaten, eine geeignete optimale Drehzahl in Übereinstimmung mit einer Veränderung in dem Bearbeitungsstatus durch Korrigieren der Näherungsformel oder des Modalparameters per se erlangt werden.

[0018] Der obige Aspekt, andere Vorteile und weitere Merkmale der vorliegenden Erfindung werden durch detailliertes Beschreiben verdeutlichender, nicht beschränkender Ausführungsformen davon unter Bezugnahme auf die beigefügten Zeichnungen offensichtlich, in denen

[0019] [Fig. 1](#) ein Blockdiagramm einer Schwingungsunterdrückungsvorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung ist;

[0020] [Fig. 2](#) eine Seitenansicht eines Hauptspindelgehäuses ist;

[0021] [Fig. 3](#) eine Draufsicht auf das Hauptspindelgehäuse ist;

[0022] [Fig. 4](#) ein Flußdiagramm für eine Schwingungsunterdrückungssteuerung ist;

[0023] [Fig. 5](#) eine Stabilitätskarte (stability lobe diagram) zeigt;

[0024] [Fig. 6](#) eine erklärende Ansicht ist, die eine allgemeine Form einer Bézier-Kurve zeigt;

[0025] [Fig. 7](#) ein Diagramm ist, das ein Beispiel einer Näherungsformel zeigt, die die Relation zwischen einer Ratterfrequenz und einer Phasendifferenz angibt;

[0026] [Fig. 8](#) ein Diagramm ist, das ein Beispiel einer Näherungsformel zeigt, die die Relation zwischen einer Ratterfrequenz und einer Phasendifferenz angibt;

[0027] [Fig. 9](#) ein Diagramm ist, das ein Beispiel von Näherungsformeln zeigt, die die Relation zwischen

Hauptspindeldrehzahl und Ratterfrequenz angeben;

[0028] [Fig. 10](#) ein Diagramm ist, das ein Beispiel von Näherungsformeln zeigen, die die Relation zwischen Hauptspindeldrehzahl und Phasendifferenz zeigen;

[0029] [Fig. 11](#) teilweise vergrößerte Stabilitätskarten (stability lobe diagram) zeigt; und

[0030] [Fig. 12](#) ein Flußdiagramm zur Schwingungsunterdrückungssteuerung entsprechend einer modifizierten Ausführungsform ist.

[0031] Unter Bezugnahme auf die beigefügten Zeichnungen wird eine bevorzugte Ausführungsform der vorliegenden Erfindung im Detail beschrieben.

[0032] Unter den beigefügten Zeichnungen ist [Fig. 1](#) ein Blockdiagramm einer Schwingungsunterdrückungsvorrichtung entsprechend einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung, [Fig. 2](#) eine Seitenansicht eines Hauptspindelgehäuses einer Werkzeugmaschine und [Fig. 3](#) eine von einer axialen Richtung der Hauptspindel aus gesehene Draufsicht auf das Hauptspindelgehäuse.

[0033] Eine Schwingungsunterdrückungsvorrichtung **10** ist dazu ausgebildet, eine Ratterschwingung, die an einer Hauptspindel **3** als eine drehende Welle, die auf einem Hauptspindelgehäuse **1** in einer solchen Weise vorgesehen ist, um um eine C-Achse drehbar zu sein, erzeugt wird, zu kontrollieren. Die Schwingungsunterdrückungsvorrichtung **10** weist Schwingungssensoren **2a-2c** als Schwingungserfassungseinheiten auf, die dazu ausgebildet sind, eine zeitbereichsweise Schwingungsbeschleunigung (Schwingungsbeschleunigung auf einer Zeitachse), die auf der Hauptspindel **3** während sie rotiert auftritt, und eine Steuereinrichtung **11**, die dazu konfiguriert ist, die Drehzahl der Hauptspindel **3** basierend auf den Erfassungswerten der Schwingungssensoren **2a-2c** zu steuern. Um Schwingungsbeschleunigung und Drehzahl in Richtungen, die miteinander einen rechten Winkel einschließen, zu erfassen, sind die Schwingungssensoren **2a-2c** an dem Hauptspindelgehäuse **1** so angebracht, dass sie eine zeitbereichsweise Schwingungsbeschleunigung in X-Achsen-, Y-Achsen- und Z-Achsen-Richtungen, die sich in einem rechten Winkel schneiden, erfassen können.

[0034] Weiterhin weist die Steuereinrichtung **11** auf: Eine FFT-Berechnungsvorrichtung **12** (Bestimmungseinheit, erste Berechnungseinheit und zweite Berechnungseinheit), die dazu konfiguriert ist, basierend auf der durch die Schwingungssensoren **2a-2c** erfassten Schwingungsbeschleunigung, eine Fourier-Analyse durchzuführen; eine Berechnungsvorrichtung **13** (dritte Berechnungseinheit), die dazu konfiguriert ist, eine Berechnung etc. einer optimalen Drehzahl durchzuführen, die auf dem mit der FFT-Berechnungsvorrichtung **12** berechneten Wert basiert; eine Speichervorrichtung **14**, die dazu konfiguriert ist, numerische Werte, die mit der FFT-Berechnungsvorrichtung **12** und der Berechnungsvorrichtung **13** berechnet werden, einen Schwellwert zum Bestimmen eines Auftretens einer Ratterschwingung, die Anzahl von Werkzeugspannuten und dergleichen, zu speichern; und eine NC-Vorrichtung **15** (Rotationssteuereinheit), die dazu konfiguriert ist, eine Bearbeitung bei dem Hauptspindelgehäuse **1** zu steuern.

[0035] Die Steuereinrichtung **11** setzt eine Steuerung gemäß des folgenden Schwingungsunterdrückungsverfahrens um. Genauer gesagt führt die Steuereinrichtung **11** eine Fourier-Analyse einer Schwingungsamplitude der Hauptspindel **3** aus, um durchgängig die maximale Beschleunigungsgeschwindigkeit und ihre Frequenz (Ratterfrequenz) zu berechnen. Wenn die maximale Beschleunigungsgeschwindigkeit einen vorbestimmten Schwellwert überschreitet, berechnet die Steuereinrichtung **11** dann die optimale Drehzahl und gibt zusammen mit der vorbestimmten Anzahl von Werkzeugspannuten Anweisungen an die Werkzeugmaschine. Details der Steuerung werden nachstehend unter Bezugnahme auf das Flußdiagramm von [Fig. 4](#) beschrieben.

[0036] Zuerst wird ein Modalparameter berechnet. Bei diesem Vorgang wird ein für die Bearbeitung verwendetes Werkzeug an der Hauptspindel **3** angebracht (Schritt S1), und dann wird ein Modalparameter in einem Ratterschwingungserzeugungssystem bestimmt (Schritt S2; erster Schritt gemäß der vorliegenden Erfindung). Der Modalparameter kann durch eine Modalanalyse der bestimmten Übertragungsfunktion extrahiert werden. Jedoch kann, wenn der Modalparameter nicht genau bestimmt ist, ein alternatives Verfahren, so wie Identifizieren des Modalparameters aus dem Bearbeitungsergebnis, verwendet werden. Der Modalparameter wird in der Speichervorrichtung **14** gespeichert.

[0037] Als Nächstes führt die FFT-Berechnungsvorrichtung **12** basierend auf dem im Schritt S2 erhaltenen Modalparameter eine Stabilitätsanalyse (stability lobe analysis) durch, erstellt eine Stabilitätskarte (stability lobe diagram), die die Randbedingungen, wo Ratterschwingung bei der Ratterfrequenz auftritt, angibt, und be-

stimmt die Sollphasendifferenz (Sollphaseninformation). Weiterhin werden einige Punkte, die Relationen zwischen einer Ratterfrequenz und einer Phasendifferenz (Phaseninformation) in der Stabilitätskarte (stability lobe diagram) anzeigen, ausgegeben, und die FFT-Berechnungsvorrichtung **12** erstellt eine Näherungsformel, die die Relation zwischen einer Ratterfrequenz und einer Phasendifferenz aus dem Ausgabeergebnis ausgibt (Schritt S3; zweiter Schritt gemäß der vorliegenden Erfindung). Einzelheiten der Näherungsformel werden später beschrieben.

[0038] Nachdem die Bearbeitung in Schritt S4 begonnen wurde, wird eine Schwingungsbeschleunigung durch die Schwingungssensoren **2a–2c** in Schritt S5 erfasst (dritter Schritt gemäß der vorliegenden Erfindung). Danach führt in Schritt S6 die FFT-Berechnungsvorrichtung **12** eine Fourier-Analyse der erfassten Schwingungsbeschleunigung durch, um die maximale Beschleunigungsgeschwindigkeit, die ein Eigenwert sein soll, und die Ratterfrequenz entsprechend der maximalen Beschleunigungsgeschwindigkeit zu berechnen (vierter Schritt gemäß der vorliegenden Erfindung).

[0039] Als nächstes vergleicht in Schritt S7 die Berechnungsvorrichtung **13** die maximale Beschleunigungsgeschwindigkeit, die mit der FFT-Berechnungsvorrichtung **12** berechnet wurde, mit dem vorbestimmten Schwellwert, und bestimmt, ob die maximale Beschleunigungsgeschwindigkeit den Schwellwert überschreitet. Wenn die maximale Beschleunigungsgeschwindigkeit den Schwellwert überschreitet, wird festgelegt, dass eine Ratterschwingung auftritt, und in Schritt S8 erhält die Berechnungsvorrichtung **13** die Ratterfrequenz entsprechend der Sollphasendifferenz unter Verwendung der Näherungsformel, die in Schritt S3 vorbereitet wurde, und berechnet dann die optimale Drehzahl unter Verwendung der erhaltenen Ratterfrequenz und der Anzahl von Werkzeugspannuten (fünfter Schritt gemäß der vorliegenden Erfindung). Wenn in Schritt S7 nicht festgelegt wird, dass eine Ratterschwingung auftritt, geht der Vorgang weiter zu Schritt S10, wo die Bearbeitung beendet wird, oder die Überwachung der Schwingungsbeschleunigung wird von Schritt S5 fortgesetzt.

[0040] Im Schritt S9 verändert, basierend auf dem Berechnungsergebnis in Schritt S8, die NC-Vorrichtung **15** die Drehzahl der Hauptspindel **3**, um Ratterschwingung zu kontrollieren. Wenn die Bearbeitung durch die Festlegung von Schritt S10 fertiggestellt ist, wird die Schwingungsunterdrückung beendet. Andernfalls geht der Vorgang zurück zu Schritt S5.

[0041] Einzelheiten der mit der FFT-Berechnungsvorrichtung **12** berechneten Näherungsformel und die Art der Berechnung der optimalen Drehzahl werden nachstehend beschrieben.

[0042] Wie oben beschrieben wird gemäß dem Nicht-Patentdokument 2, die Randbedingung, in der Rattern bei einer Ratterfrequenz f_c auftritt, durch die folgende Formel (1) gegeben.

Formel (1):

$$F_0 = \frac{1}{2} a_{\text{lim}} K_t (1 - e^{-i2\pi f_c T}) [A_0 [G(if_c)] F_0] \quad \dots (1)$$

[0043] Wobei F_0 ein Schnittkraftvektor, a_{lim} eine Grenzschnittbreite, K_t eine spezifische Schnittkraft, T ein Werkzeugschneidklingenpassierzyklus, G eine Übertragungsfunktion eines Systems und A_0 eine Koeffizientenmatrix ist, die durch die Bearbeitungsbedingungen definiert wird.

[0044] Nun wird, falls der Eigenwert der Matrix $[A_0 [G(if_c)]]$ λ ist, die durch die folgende Formel (2) gegebene Relation, erhalten.

Formel (2):

$$\lambda F_0 = [A_0 [G(if_c)] F_0] \quad \dots (2)$$

[0045] Daher wird, wenn der Kehrwert des Eigenwerts Λ ist, die Relation durch die folgende Formel (3) gegeben, erhalten.

Formel (3):

$$\Lambda = \Lambda_R + i\Lambda_I = -\frac{1}{2} a_{\text{lim}} K_t \left(1 - e^{-i \cdot 2\pi f_c T}\right) \dots (3)$$

[0046] Daher sind, von der Relation der obigen Formeln (1) und (3) die Grenzschnittbreite a_{lim} , die Rattern erzeugt, und die Phasendifferenz ε durch die folgenden Formeln (4) und (5) gegeben.

Formel (4):

$$a_{\text{lim}} = -\frac{\Lambda_R}{K_t} \left\{ 1 + \left(\frac{\Lambda_I}{\Lambda_R} \right)^2 \right\} \dots (4)$$

Formel (5):

$$\varepsilon = \frac{\left(\pi - 2 \tan^{-1} \frac{\Lambda_I}{\Lambda_R} \right)}{2\pi} \dots (5)$$

[0047] Hierbei gibt ε eine Phasendifferenz zwischen der Form der durch die vorhergehende Schneidklinge gebildeten Oberfläche und der Form der durch die momentan verwendete Schneidklinge erzeugten Oberfläche an. Weiterhin wird die Hauptspindeldrehzahl n zu diesem Zeitpunkt durch die folgende Formel (6) gegeben.

Formel (6):

$$n = \frac{60 f_c}{N(k + \varepsilon)} \dots (6)$$

wobei k eine ganze Zahl ist, die gleich oder größer als 1 ist, und nachstehend wird k als eine „k-Zahl“ ausgedrückt. N stellt die Anzahl von Spannuten dar.

[0048] Die Hauptspindeldrehzahl, die Phasendifferenz und die Grenzschnittbreite werden relativ zu jeder der Ratterfrequenzen unter Verwendung der obigen Formeln (4) bis (6) erhalten und deren Relationen werden ausgegeben, um in [Fig. 5](#) gezeigte Stabilitätskarten (stability lobe diagram) zu erhalten. In [Fig. 5](#) repräsentiert ein Bereich, in dem die Grenzschnittbreite einen großen Wert einnimmt, einen stabilen Bearbeitungsbereich (siehe unterbrochene Linien in der Figur). Mit anderen Worten wird, wenn Rattern während der Schneidbearbeitung bei einer bestimmten Schnitttiefe auftritt, die Hauptspindeldrehzahl angepasst, um in den stabilen Bearbeitungsbereich zu kommen, so dass Ratterschwingung effektiv unterdrückt wird. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Hauptspindeldrehzahl entsprechend dem stabilen Bearbeitungsbereich zu erhalten.

[0049] Hierin lassen die in [Fig. 5](#) gezeigten Relationen der Stabilitätskarte (stability lobe diagram) erkennen, dass der Schneidvorgang stabil ausgeführt wird wenn die Phasendifferenz (Sollphasendifferenz) nahe bei 0,9 liegt. Daher kann eine Ratterschwingung durch Erhalten der Drehzahl aus der Formel (6), bei der die Phasendifferenz 0,9 wird, unterdrückt werden. Jedoch ist es hier notwendig, die Ratterfrequenz entsprechend der vorgesehenen Phasendifferenz zu erhalten. Die Relation zwischen einer Ratterfrequenz und einer Phasendifferenz kann aus den obigen Formeln (1), (3) und (5), die zwangsläufig eine Berechnung des Eigenwerts beinhalten, erhalten werden. Daher ist, obwohl die Berechnung der Phasendifferenz aus der Ratterfrequenz möglich ist, der umgekehrte Vorgang von der Phasendifferenz zu der Ratterfrequenz sehr schwierig. Aus diesem Grund werden die Berechnungen mit den Formeln (1) bis (5) wiederholt, während die Ratterfrequenz in einem bestimmten Bereich durch einen konstanten Zuwachswert vergrößert wird, um so die Ratterfrequenz herauszufinden, bei der die Phasendifferenz in der unmittelbaren Nähe von 0,9 liegt. Jedoch beinhaltet dieses Verfahren extrem aufwendige und zeitraubende Berechnungen, und die Kapazität beim Lösen der Formeln hängt von dem konstanten Zuwachswert der Ratterfrequenz ab. Daher muss das Verhältnis zwischen dem Berechnungsaufwand und der Genauigkeit von Lösungen abgestimmt werden.

[0050] Hinsichtlich des Obigen wird entsprechend der vorliegenden Erfindung die Relation zwischen einer Ratterfrequenz und einer Phasendifferenz als eine Näherungsformel, ausgedrückt durch eine Bézier-Kurve oder eine B-spline-Kurve, gespeichert, so dass die Ratterfrequenz entsprechend der Sollphasendifferenz ohne die obigen wiederholten Berechnung zu erfordern analytisch erhalten werden kann. Zum Beispiel wird, wenn die Bézier-Kurve als eine Näherungskurve verwendet wird, die Relation zwischen einer Ratterfrequenz und einer Phasendifferenz durch eine kubische Formel unter Verwendung eines Parameters t , wie durch die folgende Formel (7) gezeigt, gegeben.

Formel (7):

$$\begin{bmatrix} f_c \\ \varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 & D_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1^3 \\ t_1^2 \\ t_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots (7)$$

[0051] Hierin werden die Koeffizienten A, B, C und D in der obigen Formel (7) auf folgende Art bestimmt.

[0052] Wie am besten in [Fig. 6](#) zu sehen ist, wird in einer kubischen Bézier-Kurve die Form der Kurve durch vier Kontrollpunkte (P1–P4) festgelegt. Da in der Relation zwischen einer Ratterfrequenz und einer Phasendifferenz, Endpunkte P1, P4 und Steigungen dP_1 , dP_4 an den Endpunkten aus dem Berechnungsergebnis bestimmt werden können, werden die anderen beiden verbleibenden Kontrollpunkte durch die folgende Formel (8) definiert, und die Koeffizienten A–D können durch die folgenden Formeln (9) bis (12) gezeigt werden.

Formel (8):

$$\begin{cases} P_2 = P_1 + k_1 \cdot dP_1 \\ P_3 = P_4 - k_4 \cdot dP_4 \end{cases} \quad \dots (8)$$

Formel (9):

$$A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = -P_1 + 3 \cdot P_2 - 3 \cdot P_3 + P_4 \quad \dots (9)$$

Formel (10):

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} = 3 \cdot P_1 - 6 \cdot P_2 + 3 \cdot P_3 \quad \dots (10)$$

Formel (11):

$$C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = -3 \cdot P_1 + 3 \cdot P_2 \quad \dots (11)$$

Formel (12):

$$D = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \end{bmatrix} = P_1 \quad \dots (12)$$

[0053] In den obigen Formeln (8) bis (12) existieren nur zwei variable Zahlen k_1 , k_4 als unbekannte Zahlen. Daher können k_1 und k_4 so optimiert werden, dass die Kurve (7) mit den ausgegebenen Werten der Relation zwischen einer Ratterfrequenz und einer Phasendifferenz übereinstimmt. Wenn die Form der Kurve kompliziert wird, wird die Kurve an einem oder mehreren geeigneten Punkten in zwei oder mehrere Teile unterteilt, um so die Formel (7) für jeden dieser Teile zu erhalten.

[0054] Da die Relation zwischen einer Ratterfrequenz und einer Phasendifferenz nicht von der k -Zahl abhängt, kann, wenn einmal die Formel (7) unter Berücksichtigung des Modalparameters eines Systems angepasst ist, diese eine Näherungsformel ohne Berücksichtigung einer Hauptspindeldrehzahl behalten werden. Natürlich können unter Berücksichtigung von jeder der k -Zahlen, die Relationen zwischen Hauptspindeldrehzahl, Ratterfrequenz und Phasendifferenz bereitgestellt werden, so dass eine Vielzahl von Näherungsformeln erhalten wird.

[0055] Als ein Beispiel wird eine Annäherung auf zwei Sätze von verschiedenen Modalparametern unter Verwendung der Formel (7) durchgeführt. Das Ergebnis wurde mit dem durch die Formel (5) durch beliebiges Setzen der Ratterfrequenz berechneten Ergebnis verglichen und sie sind in den [Fig. 7](#) und [Fig. 8](#) gezeigt. Obwohl die Phasendifferenz aus der Formel (5) mit dem Grenzwert von 1,0 unstetig wird, wurde eine Fortsetzung zum Zweck der Vereinfachung ausgeführt.

[0056] Relationen zwischen einer Phasendifferenz und einer Ratterfrequenz wurden durch Näherungsformeln in [Fig. 7](#) und [Fig. 8](#) ausgedrückt. Aus der Formel (6) wurden unter Verwendung dieser Relationen, die Relation zwischen einer Hauptspindeldrehzahl und einer Ratterfrequenz, und die Relation zwischen einer Hauptspindeldrehzahl und einer Phasendifferenz ausgegeben, um die [Fig. 9](#) und [Fig. 10](#) zu erhalten. Die mit den Formeln (5) und (6) durch beliebiges Setzen der Ratterfrequenz berechneten Ergebnisse wurden zum Vergleich in [Fig. 7](#) und [Fig. 8](#) gezeigt. Die in den [Fig. 7](#) bis [Fig. 10](#) gezeigten Ergebnisse zeigen, dass die Näherungsformel gemäß des Verfahrens der vorliegenden Erfindung sehr gut mit den aus den Formeln (5) und (6) erhaltenen Berechnungsergebnissen übereinstimmen.

[0057] Tatsächliche Berechnungsbeispiele werden nachstehend gezeigt. Stabilitätskarten (stability lobe diagram), die durch Berechnungen unter Verwendung des Modalparameters und der Bearbeitungsbedingungen von Tabelle 1 erhalten wurden, sind in [Fig. 11](#) gezeigt. In diesem Fall ist, falls $\varepsilon \leq 1,0$ erfüllt ist, die Näherungsformel, die die Relation zwischen einer Ratterfrequenz und einer Phasendifferenz angibt, durch die folgende Formel (13) gezeigt.

Tabelle 1:

Eigenfrequenz	Maximale Übereinstimmung	Dämpfungsrate	Werkzeughdurchmesser	Schnitt-Durchmesser	Werkzeugspannuten
5.000 Hz	4,0 $\mu\text{m}/\text{N}$	0,03	6 mm	0,4 mm	6

Formel (13):

$$\begin{bmatrix} f_c \\ \varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 628.3 & -155.4 & 527.5 & 5002.3 \\ -0.321 & 0.991 & -1.118 & 0.923 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t^3 \\ t^2 \\ t \\ 1 \end{bmatrix} \quad (0 \leq t \leq 1) \quad \dots (13)$$

[0058] Zum Beispiel ist, wenn die Bearbeitung mit einer Hauptspindeldrehzahl von 7.500 min^{-1} durchgeführt wird, die Ratterfrequenz ungefähr 5.080 Hz und die Phasendifferenz ungefähr $0,77$. Unter Bezugnahme auf [Fig. 11](#) wird die stabile Drehzahl als ungefähr 7.260 min^{-1} abgelesen. Wenn eine Berechnung durch das konventionelle Verfahren unter der Bedingung, dass die Sollphasendifferenz $0,9$ und die Ratterfrequenz 5.080 Hz betragen, durchgeführt wird, beträgt aus der Formel (6) die berechnete optimale Drehzahl 7.362 min^{-1} , was sich von der richtigen stabilen Drehzahl ungefähr um 100 min^{-1} unterscheidet.

[0059] Gemäß dem Verfahren der vorliegenden Erfindung wird eine kubische Gleichung bezüglich ε in der Formel (13) gelöst. Als ein Ergebnis wird t entsprechend der Phasendifferenz von $0,9$ als ungefähr $0,02$ erhal-

ten, und die Ratterfrequenz entsprechend dazu ist 5.010 Hz. Wenn eine Berechnung mit der Formel (6) unter Verwendung dieses Ergebnisses durchgeführt wird, ist die optimale Drehzahl 7.261 min^{-1} . Daher kann die optimale Drehzahl genauer erhalten werden.

[0060] Gemäß dem Schwingungsunterdrückungsverfahren und der Schwingungsunterdrückungsvorrichtung, die in der obigen Ausführungsform offenbart wurde, ist es möglich, da die optimale Drehzahl unter Verwendung der Näherungsformel, die die Relation zwischen einer Ratterfrequenz und einer Phasendifferenz angibt, erhalten werden kann, die optimale Drehzahl, um einer Ratterschwingung analytisch zu unterdrücken, leicht und genau zu erhalten, ohne dass wiederholte Berechnungen, die aufwendig sind und wenig genaue Lösungen ergeben, erforderlich sind.

[0061] Obwohl das Schwingungsunterdrückungsverfahren und die Schwingungsunterdrückungsvorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung unter Bezugnahme auf die obige bevorzugte Ausführungsform im Detail beschrieben wurde, ist die vorliegende Erfindung nicht auf die obige spezifische Ausführungsform beschränkt, und verschiedene Änderungen und Modifikationen können durchgeführt werden, ohne sich aus dem Rahmen der Ansprüche im Anhang zu entfernen.

[0062] Zum Beispiel ist eine Modifikation des Schwingungsunterdrückungsverfahrens in **Fig. 12** gezeigt. In dieser Modifikation wird eine Phaseninformation in Schritt S17 nach Ausführung einer Fourier-Analyse der Schwingungsbeschleunigung in Schritt S16 aus der Ratterfrequenz und der Hauptspindeldrehzahl entsprechend der Ratterfrequenz berechnet. Danach wird in Schritt S18 eine Bestimmung durchgeführt, ob die erhaltene Ratterfrequenz und die Phaseninformation mit der Näherungsformel übereinstimmen. Wenn keine Übereinstimmung mit der Näherungsformel vorliegt, geht der Vorgang zu Schritt S19, so dass die Näherungsformel oder der Modalparameter wenn nötig korrigiert werden. Andere Vorgänge sind im Wesentlichen die gleichen wie diese, wie in **Fig. 4** beschrieben.

[0063] Wie oben beschrieben ist es möglich, eine geeignete optimale Drehzahl gemäß einer Veränderung in dem Bearbeitungsstatus durch Korrigieren der Näherungsformel oder des Modalparameters per se, wo notwendig, basierend auf den aktuellen Bearbeitungsdaten zu erhalten.

[0064] Weiterhin wird in der obigen Ausführungsform die Schwingungsunterdrückungssteuerung durch die Fourier-Analyse der zeitbereichsweisen Schwingungsbeschleunigung unter Verwendung der maximalen Beschleunigungsgeschwindigkeit, bei der die frequenzbereichsweisen Schwingungsbeschleunigung den Maximalwert annimmt, ausgeführt. Jedoch kann die Schwingungsunterdrückungssteuerung unter Verwendung eines Durchschnitts von einer Mehrzahl von Spitzen, an denen der Wert der Schwingungsbeschleunigung höher ist, modifiziert werden.

[0065] Weiterhin ist es nicht notwendig eine Speichervorrichtung innerhalb der Steuereinrichtung vorzusehen. Die Speichervorrichtung kann außerhalb der Steuereinheit vorgesehen sein. Die Schwingungssensoren als die Schwingungserfassungseinheiten können durch einen oder mehrere Sensoren zum Erfassen eines Versatzes der drehenden Welle oder des akustischen Drucks, der durch Schwingung verursacht wird, ersetzt werden.

[0066] Um den Zusammenhang zwischen einer Ratterfrequenz und einer Phaseninformation zu erhalten, wird das in dem Nicht-Patentdokument 2 offenbarte Verfahren in der obigen bevorzugten Ausführungsform verwendet. Jedoch können andere Relationen, die aus anderen Berechnungsverfahren erhalten werden, in der vorliegenden Erfindung verwendet werden.

[0067] Weiterhin ist die vorliegende Erfindung auf verschiedene Werkzeugmaschinentypen, wie z. B. ein Bearbeitungszentrum und eine numerisch gesteuerten Drehmaschine, anwendbar. Die Anbringungsposition jeder Erfassungseinheit oder die Anzahl der Erfassungseinheiten können wenn notwendig, z. B. entsprechend eines Typs einer verwendeten Werkzeugmaschine, modifiziert werden.

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 2003-340627 [\[0004\]](#)
- JP 2001-517557 [\[0004\]](#)

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- CIRP, Vol. 44/1 (1995) Analytische Vorhersage von Stabilitätskurven (stability lobes) beim Fräsen [\[0004\]](#)
- Workshop-material and papers, 2001-JSME (Japan Society of Mechanical Engineers) Grundlagenwissen von Schneidbearbeitung und Ratterschwingungen [\[0004\]](#)

Patentansprüche

1. Verfahren zum Unterdrücken einer Ratterschwingung einer Werkzeugmaschine während einer Bearbeitung eines Werkstücks, wobei die Werkzeugmaschine mit einer drehenden Welle zum Rotieren eines Werkzeugs oder des Werkstücks versehen ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass angenommen wird, dass eine Dezimalstelle einer Lösung einer folgenden Formel:

$$60 \times \text{Ratterfrequenz} / (\text{Anzahl von Werkzeugspannten} \times \text{Drehzahl der drehenden Welle})$$

als eine Phaseninformation gegeben ist, wobei das Verfahren aufweist:
 einen ersten Schritt des Anbringens des Werkzeugs an der drehenden Welle (S1), und des Berechnens eines Modalparameters des Werkzeugs oder des Werkstücks (S2);
 einen zweiten Schritt des Berechnens einer Relation zwischen einer Ratterfrequenz und der Phaseninformation als eine Näherungsformel, basierend auf dem Modalparameter und Bearbeitungsbedingungen (S3);
 einen dritten Schritt des Erfassens von zeitbereichsweiser Schwingung, die durch die eine Ratterschwingung verursacht wird (S4, S5);
 einen vierten Schritt des Berechnens einer Ratterfrequenz und eines frequenzbereichsweisen Eigenwerts der Ratterfrequenz, basierend auf der in dem dritten Schritt erfassten Schwingung (S6); und
 einen fünften Schritt des Erhaltens einer Ratterfrequenz, entsprechend der Phaseninformation, die als ein Ziel unter Verwendung der Näherungsformel ausgewählt wurde wenn der in dem vierten Schritt berechnete Eigenwert einen vorbestimmten Schwellwert überschreitet, und danach des Berechnens einer optimalen Drehzahl unter Verwendung der erhaltenen Ratterfrequenz und der Anzahl von Werkzeugspannten (S7, S8).

2. Verfahren gemäß Anspruch 1, wobei in dem zweiten Schritt die Näherungsformel durch eine Bézier-Kurve oder eine B-spline-Kurve ausgedrückt wird.

3. Verfahren gemäß Anspruch 1 oder 2, weiterhin ein Berechnen einer Phaseninformation aus der Formel von Anspruch 1 unter Verwendung der in dem vierten Schritt berechneten Ratterfrequenz, und der Drehzahl der drehenden Welle entsprechend der Ratterfrequenz, und Korrigieren des Modalparameters oder der Näherungsformel unter Verwendung der erhaltenen Ratterfrequenz und der Phaseninformation, aufweisend.

4. Schwingungsunterdrückungsvorrichtung zum Unterdrücken einer Ratterschwingung einer Werkzeugmaschine während einer Bearbeitung eines Werkstücks, wobei die Werkzeugmaschine mit einer drehenden Welle zum Rotieren eines Werkzeugs oder des Werkstücks versehen ist, und angenommen wird, dass eine Dezimalstelle einer Lösung der folgenden Gleichung:

$$60 \times \text{Ratterfrequenz} / (\text{Anzahl von Werkzeugspannten} \times \text{Drehzahl der drehenden Welle})$$

als Phaseninformation gegeben ist, wobei die Schwingungsunterdrückungsvorrichtung aufweist:
 eine Bestimmungseinheit, die dazu konfiguriert ist, einen Modalparameter des Werkzeugs oder des Werkstücks, während das Werkzeug an der drehenden Welle angebracht ist, zu berechnen;
 eine erste Berechnungseinheit, die dazu konfiguriert ist, eine Relation zwischen einer Ratterfrequenz und der Phaseninformation der Werkzeugspannten, basierend auf dem Modalparameter und Bearbeitungsbedingungen als eine Näherungsformel zu berechnen;
 eine Schwingungserfassungseinheit, die dazu konfiguriert ist, eine zeitbereichsweiser Schwingung, die durch eine Ratterschwingung verursacht wird, zu erfassen;
 eine zweite Berechnungseinheit, die dazu konfiguriert ist, eine Ratterfrequenz und einen frequenzbereichsweisen Eigenwert der Ratterfrequenz basierend auf der durch die Schwingungserfassungseinheit erfassten Schwingung zu berechnen; und
 eine dritte Berechnungseinheit, die dazu konfiguriert ist, eine Ratterfrequenz entsprechend der Phaseninformation, die als ein Ziel unter Verwendung der Näherungsformel ausgewählt wurde, zu erhalten wenn der durch die zweite Berechnungseinheit berechnete Eigenwert einen vorbestimmten Schwellenwert überschreitet, und danach unter Verwendung der erhaltenen Ratterfrequenz und der Anzahl von Werkzeugspannten eine optimale Drehzahl zu berechnen.

Es folgen 15 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG. 1

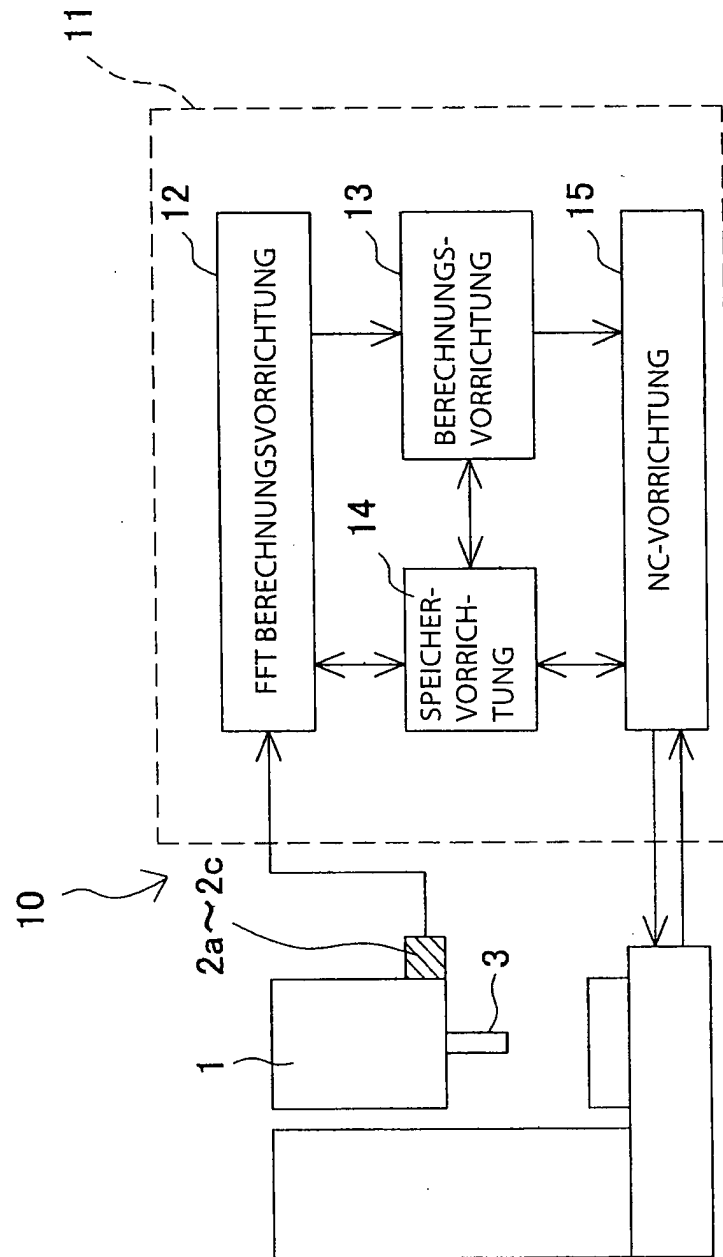


FIG.2

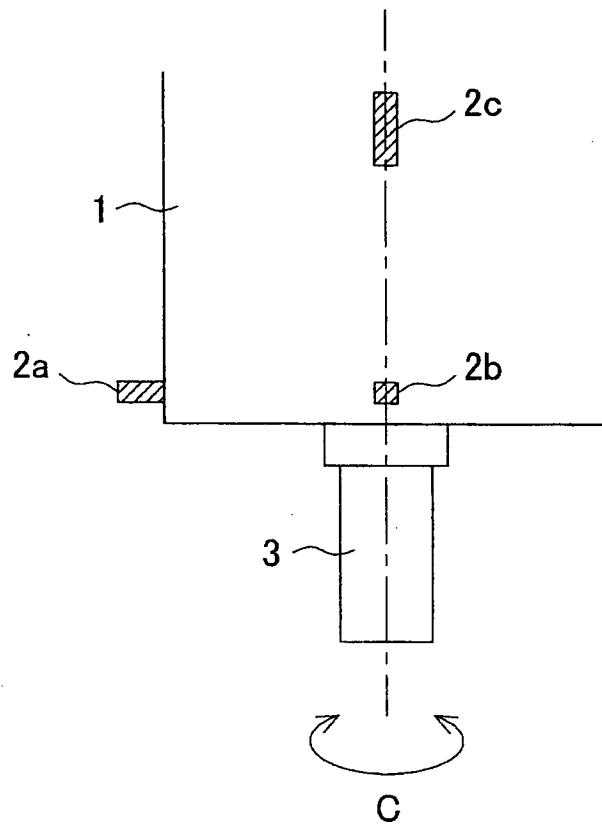


FIG. 3

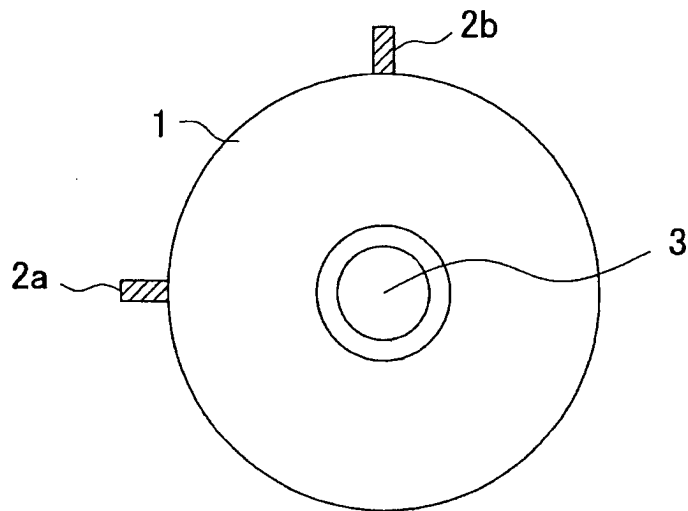


FIG.4A

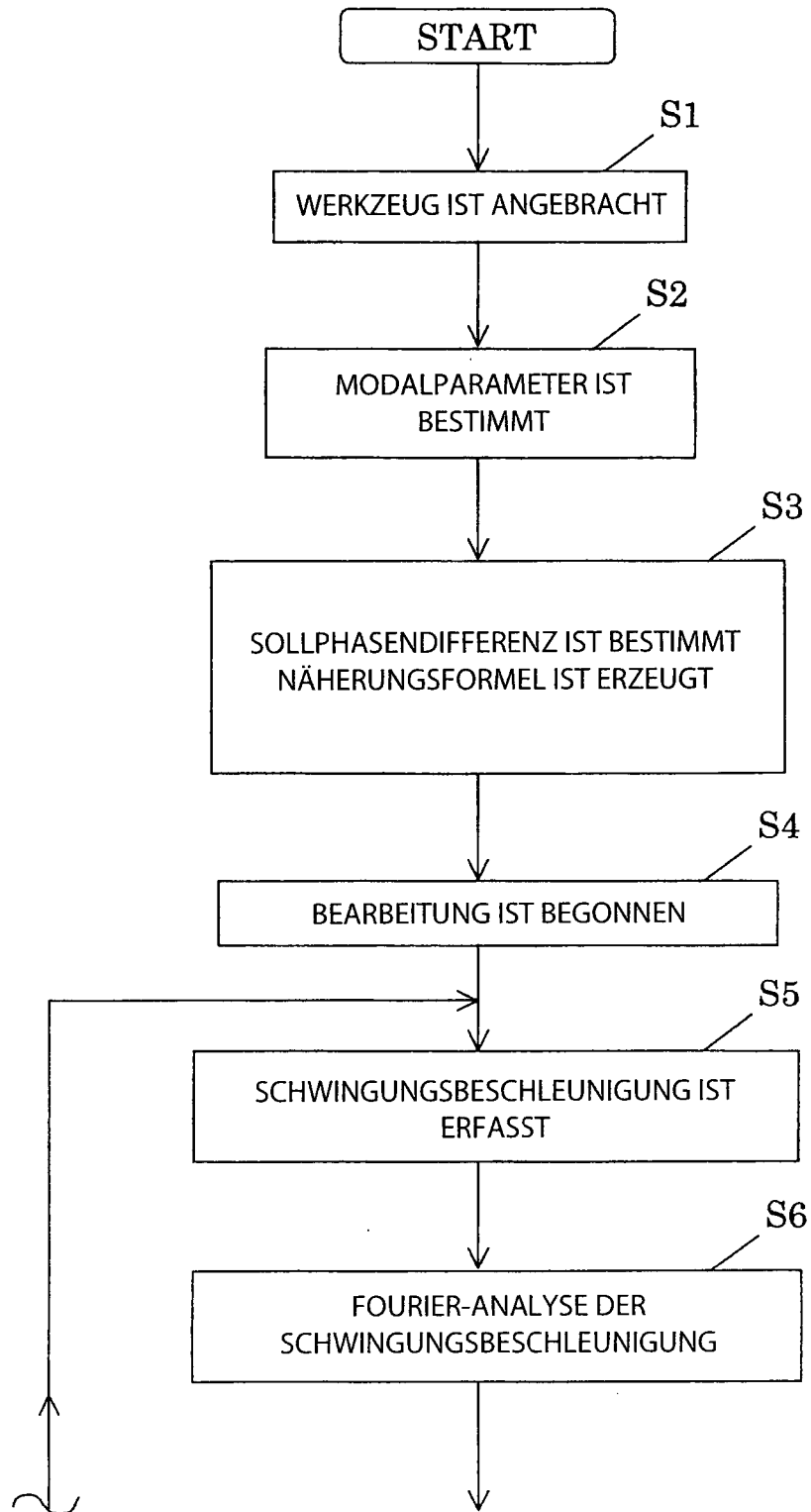


FIG.4B

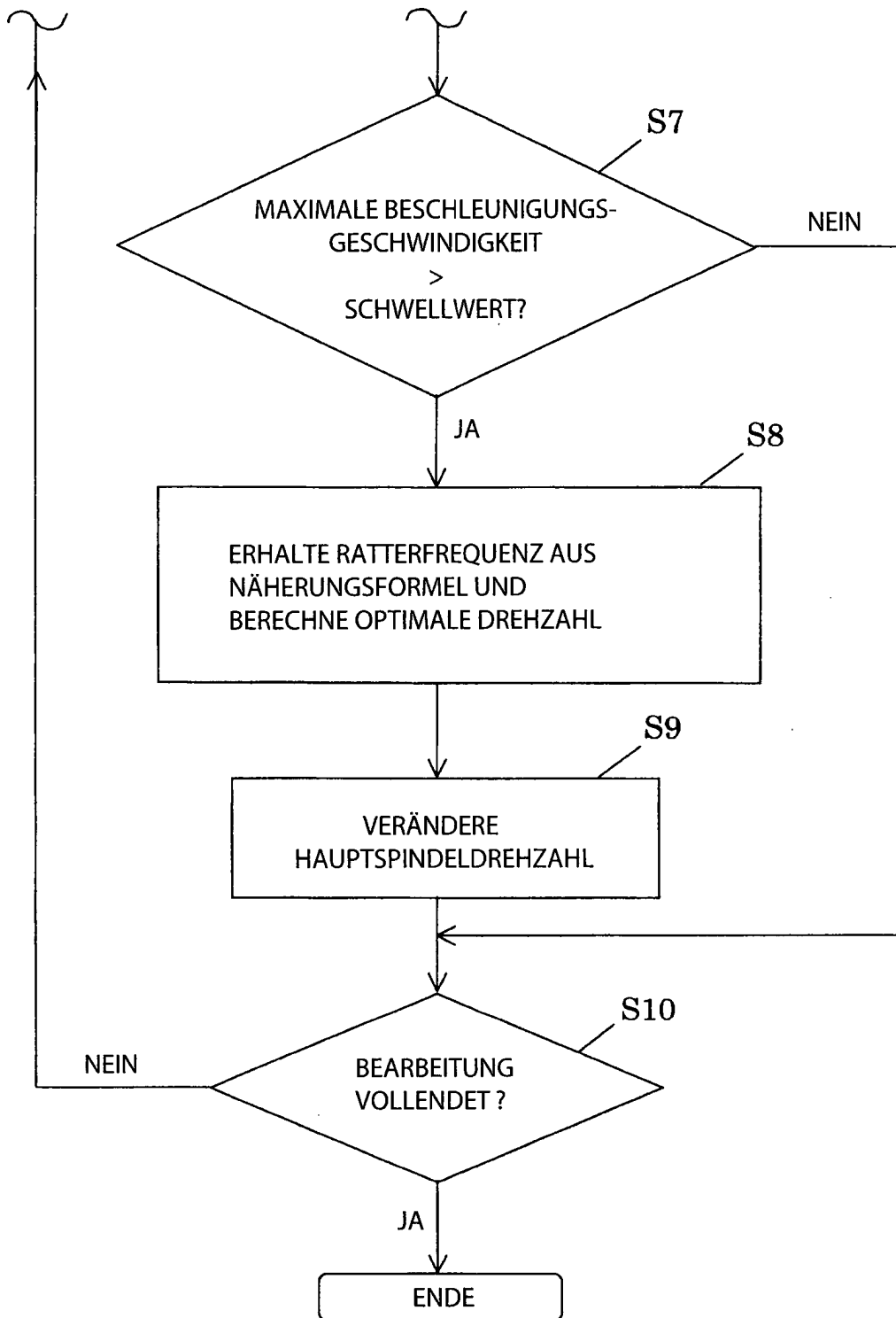


FIG.5

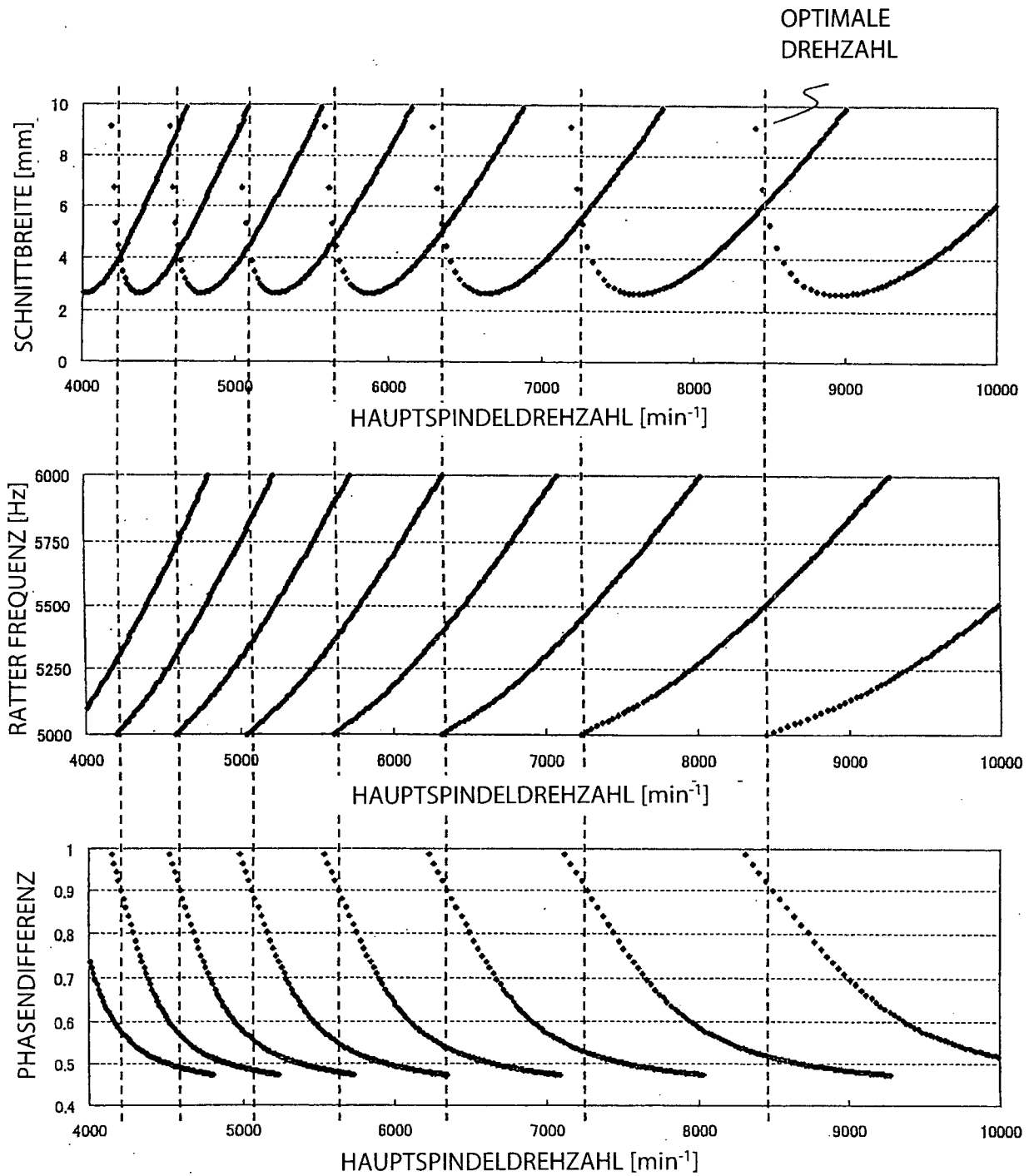


FIG.6

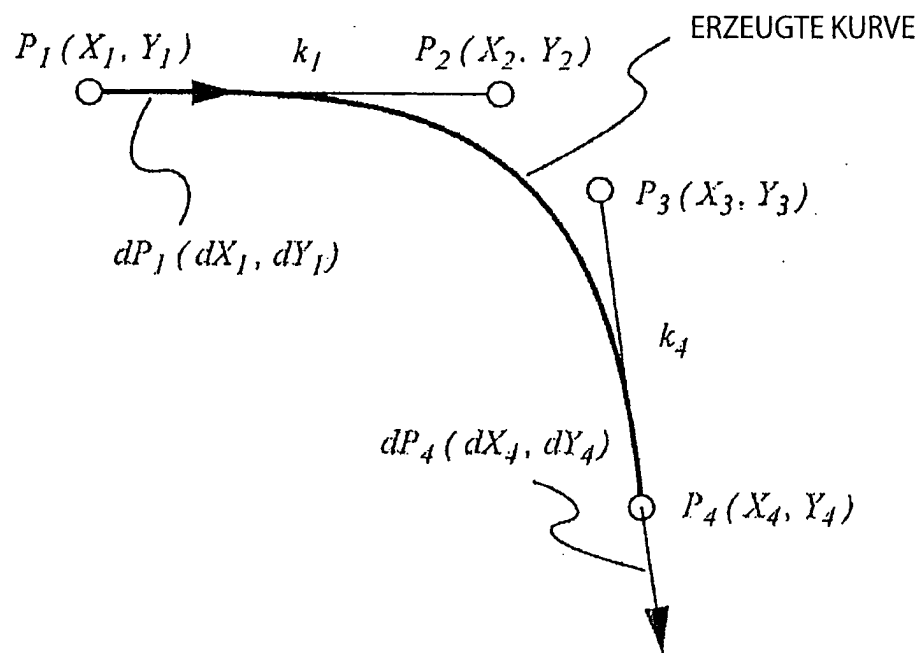


FIG. 7

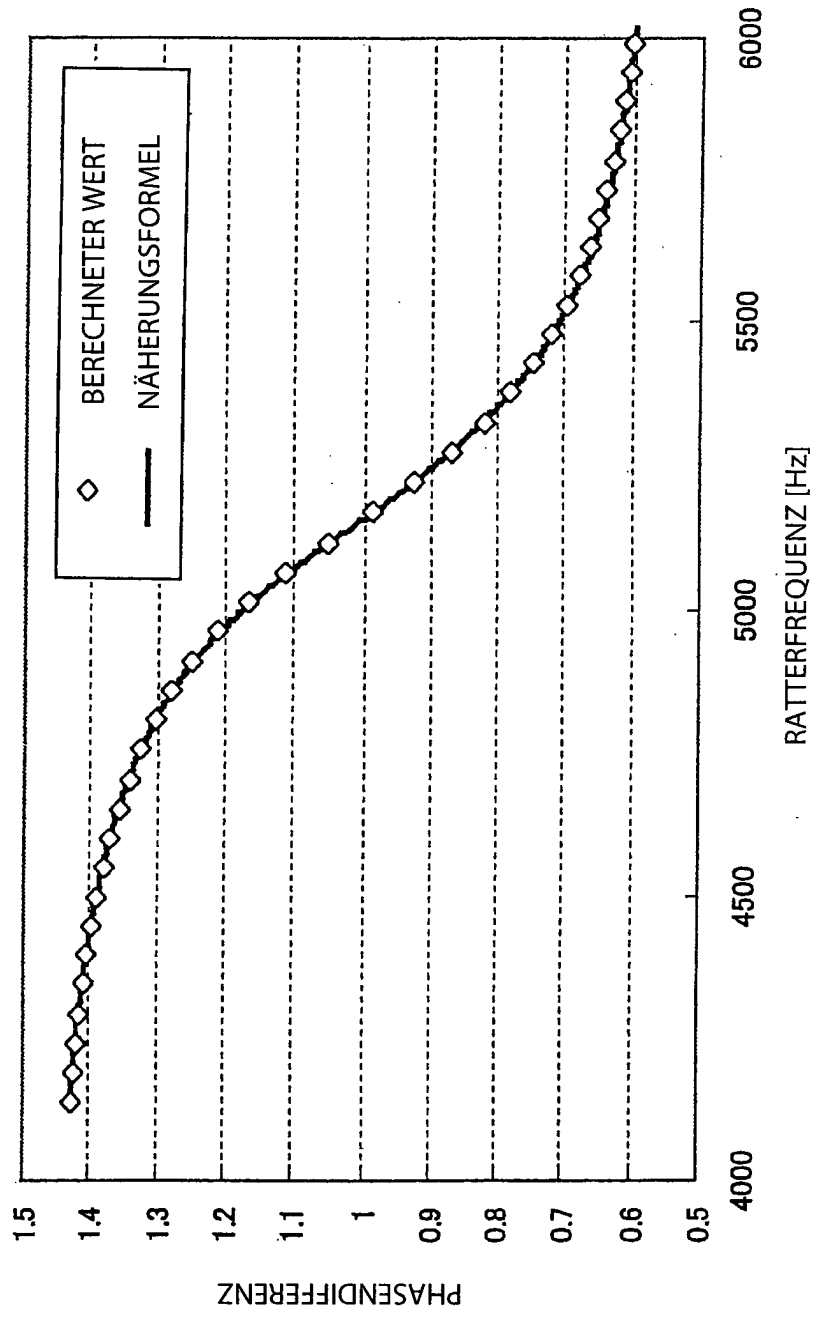


FIG. 8

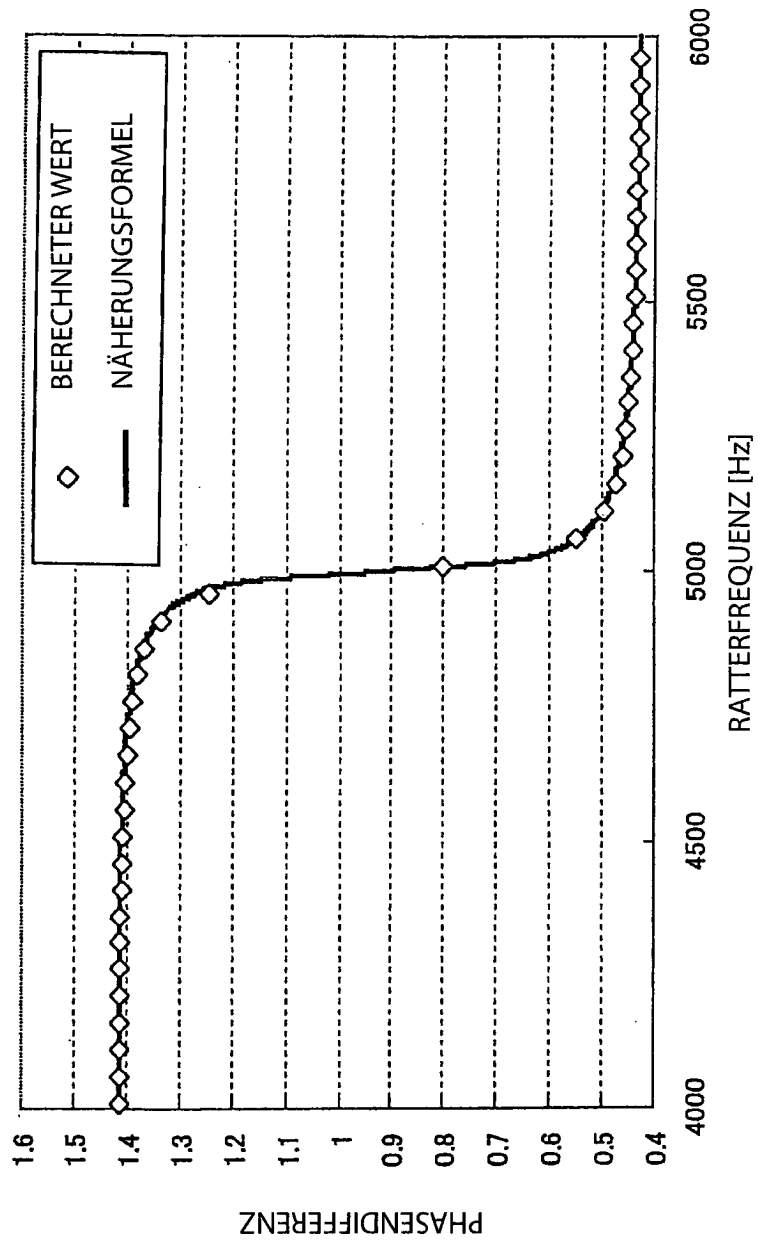


FIG. 9

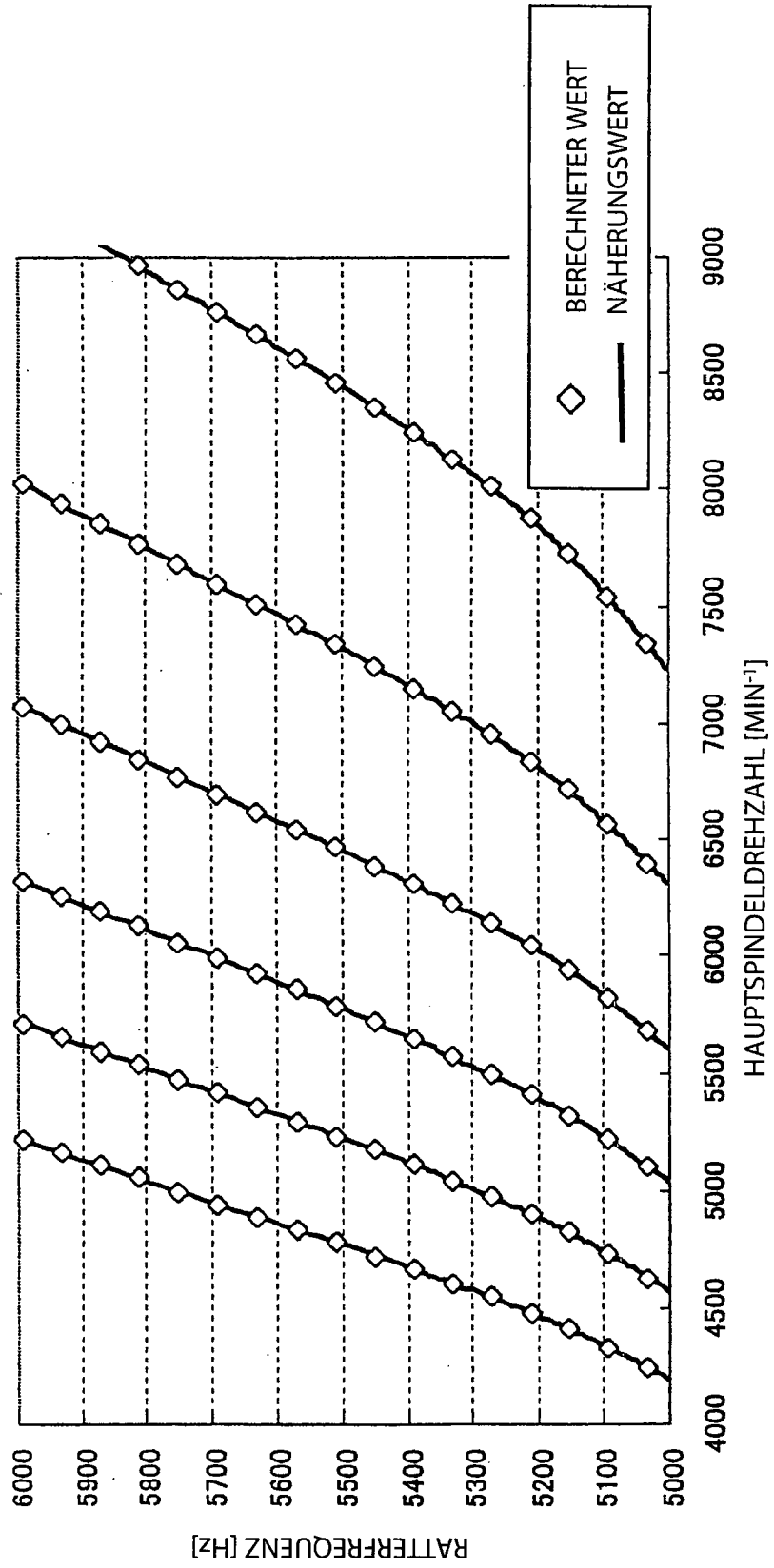


FIG. 10

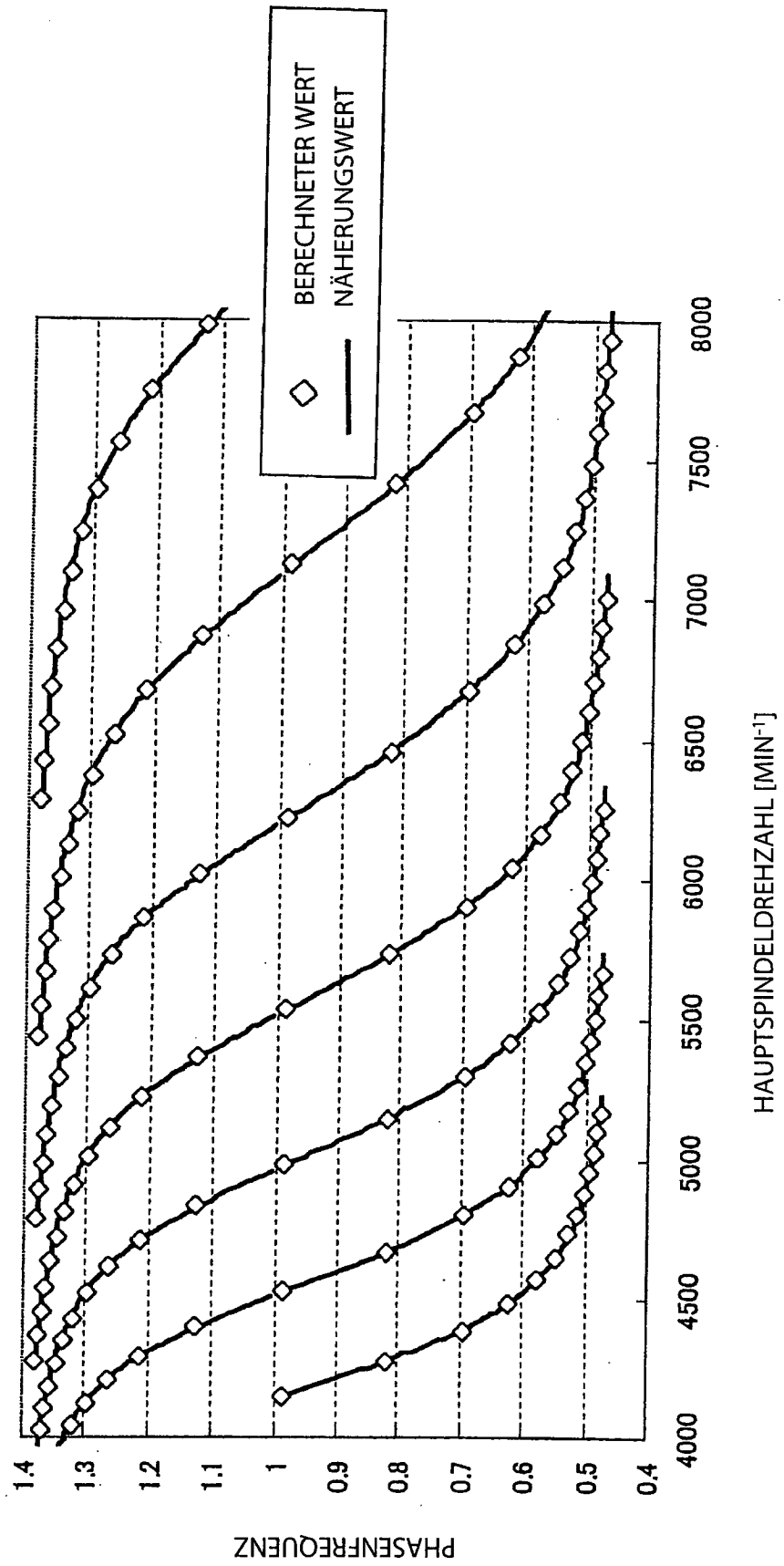


FIG. 11

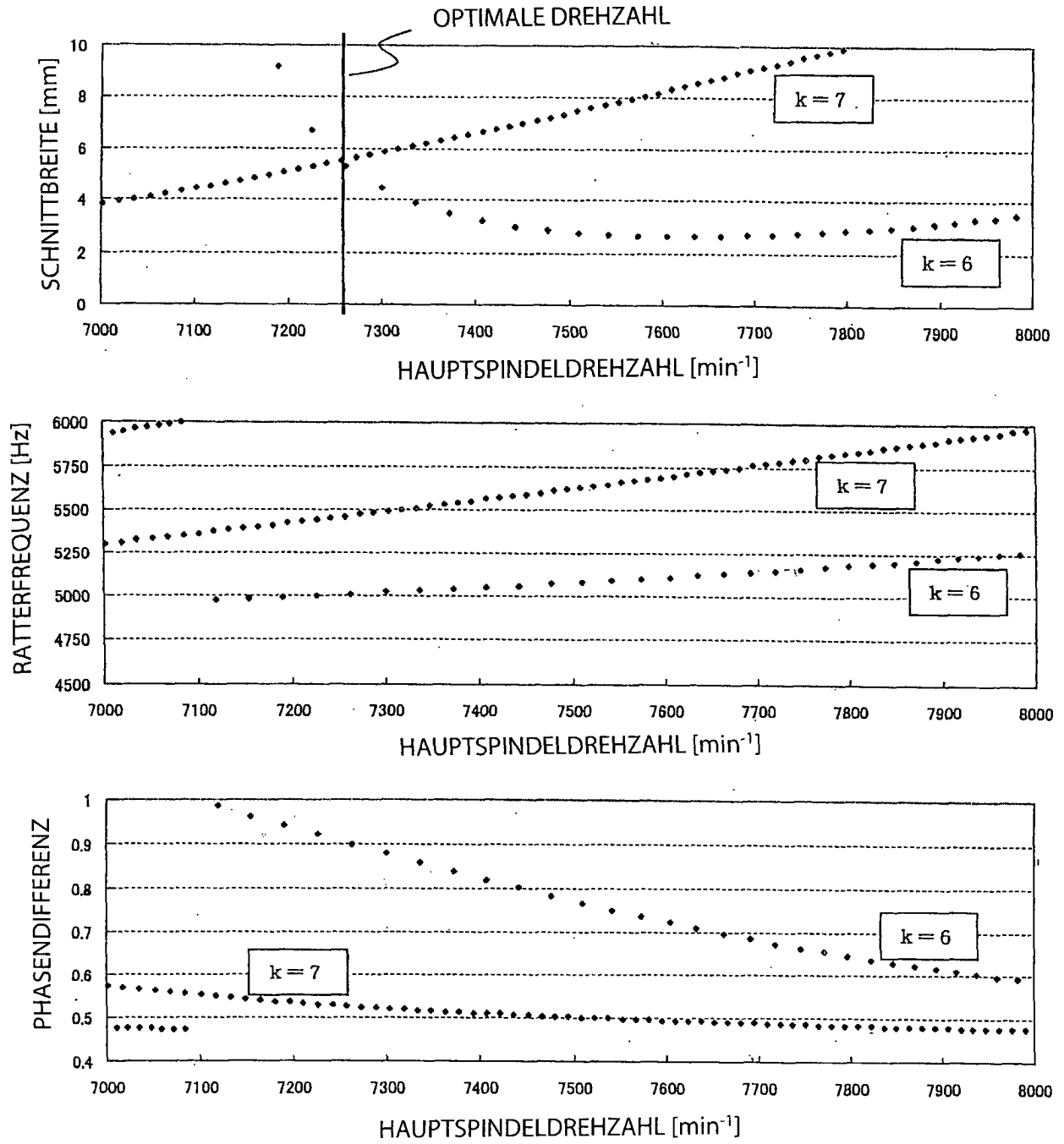


FIG.12A

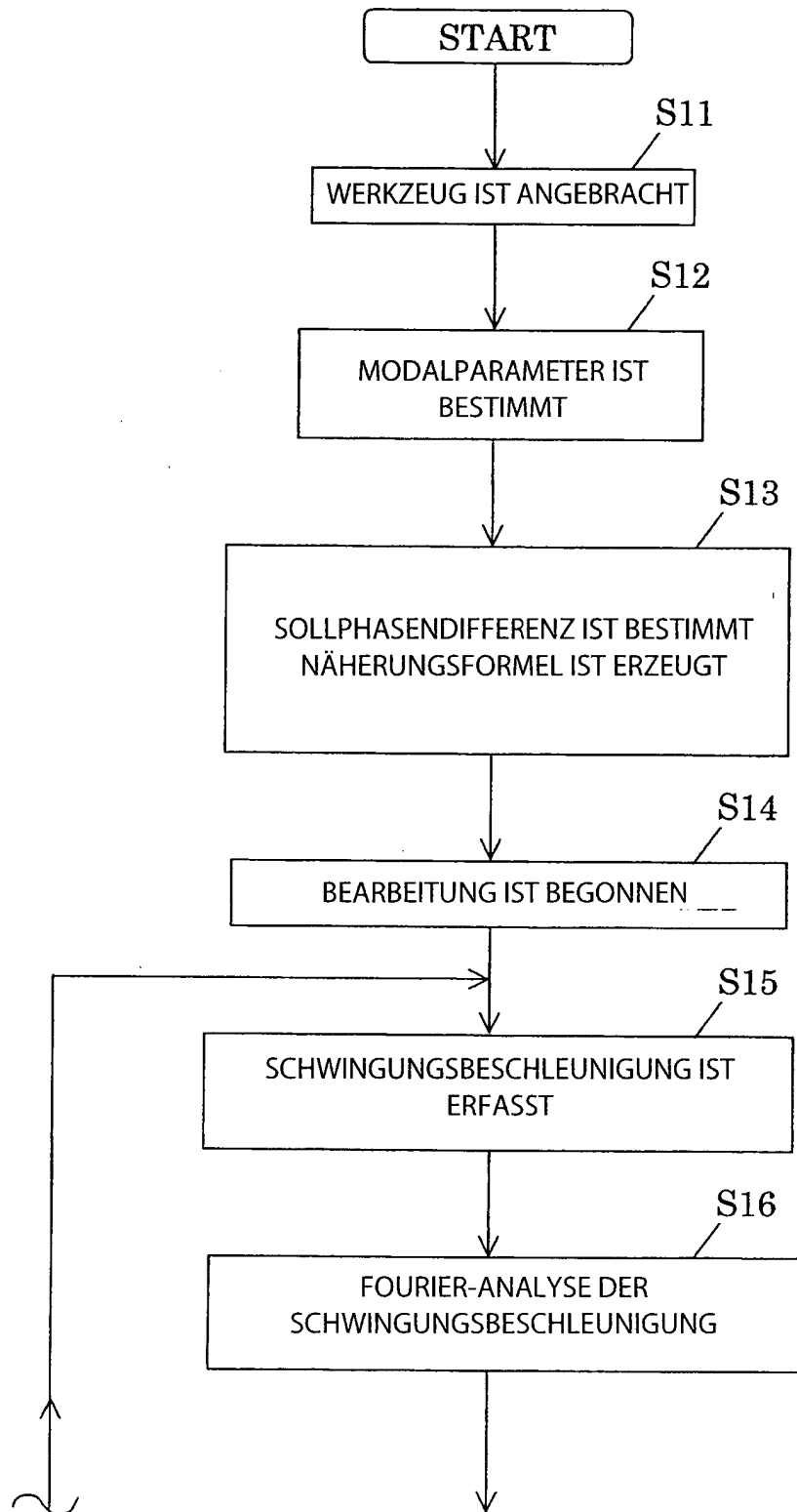


FIG.12B

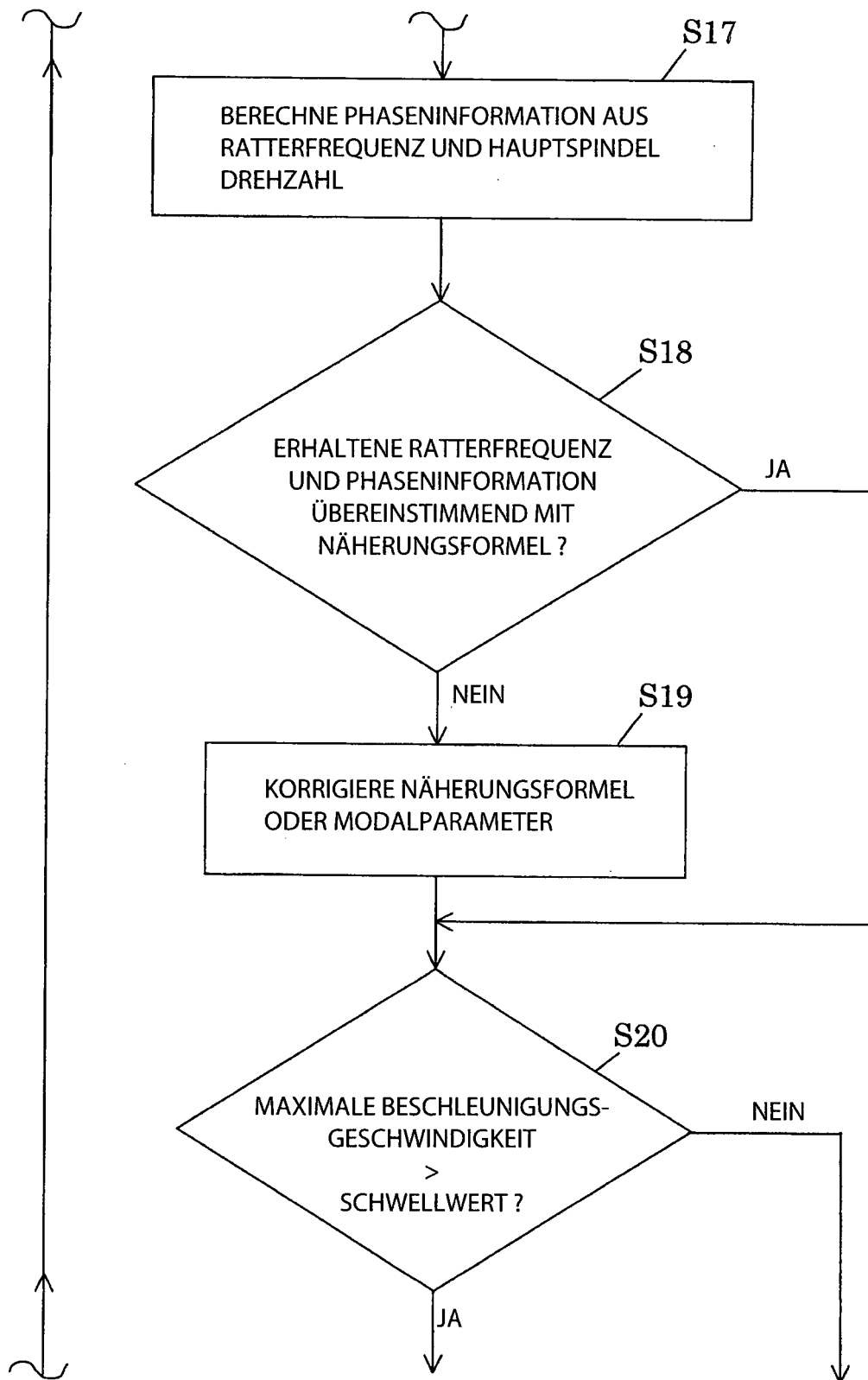


FIG.12C

