



(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2013 210 462.6**  
(22) Anmeldetag: **05.06.2013**  
(43) Offenlegungstag: **07.08.2014**  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **29.05.2024**

(51) Int Cl.: **B23Q 23/00 (2006.01)**  
**B23Q 16/00 (2006.01)**  
**B23Q 17/22 (2006.01)**  
**B23Q 15/20 (2006.01)**  
**G05B 19/401 (2006.01)**  
**G05B 19/404 (2006.01)**

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(66) Innere Priorität  
**10 2013 202 057.0 07.02.2013**

(72) Erfinder:  
**Maier, Marzell, 88316 Isny, DE**

(73) Patentinhaber:  
**DECKEL MAHO Pfronten GmbH, 87459 Pfronten, DE**

(56) Ermittelte Stand der Technik:

<b>DE</b>	<b>10 2008 035 710</b>	<b>B4</b>
<b>DE</b>	<b>10 2009 007 439</b>	<b>A1</b>
<b>DE</b>	<b>10 2009 024 752</b>	<b>A1</b>
<b>DE</b>	<b>10 2011 105 897</b>	<b>A1</b>

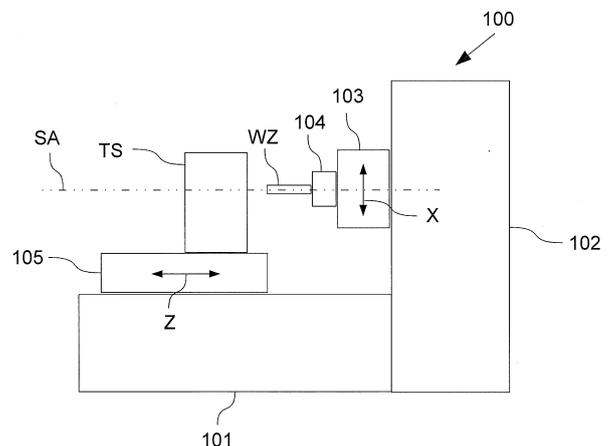
(74) Vertreter:  
**MERH-IP Matias Erny Reichl Hoffmann  
Patentanwälte PartG mbB, 80336 München, DE**

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zum Ermitteln einer Spindelkompensation an einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine, numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine und Computerprogrammprodukt**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zum Ermitteln einer Spindelkompensation an einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine (100) umfassend eine Spindel (104) zum Aufnehmen eines Werkzeugs (WZ) oder eines Werkstücks und ein Einspannmittel (105) zum Einspannen eines Werkstücks oder eines Werkzeugs (WZ), wobei das Verfahren umfasst:

- Einspannen (S1) eines Testwerkstücks (TS) an dem Einspannmittel (105) oder an der Spindel (104) der Werkzeugmaschine (100),
- Aufnehmen (S4) eines Zerspanwerkzeugs (WZ) an der Spindel (104) oder an dem Einspannmittel (105) der Werkzeugmaschine (100),
- Bearbeiten (S5) des Testwerkstücks (TS) mittels des Zerspanwerkzeugs (WZ) zum Herausarbeiten einer Mehrzahl von Testflächen (F11-Fn4) auf dem Testwerkstück (TS) in Abhängigkeit einer jeweiligen Vorgabeposition in einer ersten Richtung,
- Einwechseln (S6) eines Tastwerkzeugs an der Spindel (104) oder an dem Einspannmittel (105) der Werkzeugmaschine (100),
- Ermitteln (S7) einer jeweiligen Istposition in der ersten Richtung für jede der Mehrzahl von herausgearbeiteten Testflächen (F11-Fn4) auf dem Testwerkstück (TS) mittels des Tastwerkzeugs, und
- Ermitteln (S8) zumindest eines Spindelkompensationsparameters in der ersten Richtung in Abhängigkeit der ermittelten Istpositionen,

wobei die Mehrzahl von Testflächen (F11-Fn4) bei unterschiedlichen Betriebszuständen der Spindel (104) herausgearbeitet werden, und in Abhängigkeit eines Vergleichs von Vorgabeposition und Istpositionen in der ersten Richtung der herausgearbeiteten Testflächen (F11-Fn4) oder in Abhängigkeit eines Vergleichs der Istpositionen untereinander eine betriebszustandsabhängige Spindelkompensation ermittelt wird.



## Beschreibung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Ermitteln einer Spindelkompensation in einer ersten Richtung (z.B. senkrecht oder parallel zu der Spindelachse) an einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine umfassend eine werkzeugtragende Spindel zum Aufnehmen eines Werkzeugs oder eine werkstücktragende Spindel zum Aufnehmen eines Werkstücks und ein Einspannmittel zum Einspannen eines Werkstücks (im Falle einer werkzeugtragenden Spindel) bzw. eines Werkzeugs (im Falle einer werkstücktragenden Spindel).

**[0002]** Ferner betrifft die vorliegende Erfindung eine numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine umfassend eine Vorrichtung zum Ermitteln einer Spindelkompensation in der ersten Richtung und ein Computerprogrammprodukt für die Ausführung eines Verfahrens zum Ermitteln einer Spindelkompensation in der ersten Richtung an der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine umfassend eine werkzeugtragende Spindel zum Aufnehmen eines Werkzeugs oder eine werkstücktragende Spindel zum Aufnehmen eines Werkstücks und ein Einspannmittel zum Einspannen eines Werkstücks (im Falle einer werkzeugtragenden Spindel) bzw. eines Werkzeugs (im Falle einer werkstücktragenden Spindel).

## Hintergrund der Erfindung

**[0003]** Im Stand der Technik sind numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen bekannt, an denen Werkstücke an Einspannmitteln der Werkzeugmaschine eingespannt werden und mittels in einer (werkzeugtragenden) Arbeitsspindel aufgenommenen Werkzeugen zerspanend bearbeitet werden, insbesondere numerisch gesteuerte Fräsmaschinen, Fräs-/Drehmaschinen, Portalfräsmaschinen, Universalfräsmaschinen und Bearbeitungszentren.

**[0004]** Im Stand der Technik sind weiterhin numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen bekannt, an denen Werkstücke an der (werkstücktragenden) Arbeitsspindel der Werkzeugmaschine aufgenommen werden und mittels an einem Einspannmittel eingespannten Werkzeugen zerspanend bearbeitet werden, insbesondere numerisch gesteuerte Drehmaschinen, Dreh-/Fräsmaschinen und Drehzentren.

**[0005]** An derartigen Werkzeugmaschinen mit werkzeugtragenden und/oder werkstücktragenden Arbeitsspindeln ist es heutzutage zum Erreichen der gewünschten Bearbeitungsgenauigkeit erforderlich, eine Spindelkompensation zu ermitteln, um Verlagerungen der Spindel zu ermitteln und bei der Bearbeitung von Werkstücken zu kompensieren.

**[0006]** Verlagerungen der Spindel in Richtung der Spindelachse (und/oder auch senkrecht zur Spindelachse) treten typischerweise abhängig vom Betriebszustand der Spindel auf und werden somit zumeist in Abhängigkeit des Betriebszustands der Spindel erfasst, um eine betriebszustandsabhängige Spindelkompensation durchführen zu können.

**[0007]** Der Betriebszustand betrifft hierbei insbesondere Betriebsdauer und/oder Drehzahl der Spindel, da einerseits typischerweise mit steigender Betriebsdauer der Spindel aufgrund thermischer Effekte eine mit der Betriebsdauer steigende Spindelverlagerung auftritt und weiterhin auch bei unterschiedlichen Drehzahlen der Spindel unterschiedliche Verlagerungen auftreten können.

**[0008]** Im Stand der Technik ist es bekannt, eine Spindelkompensation an einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine umfassend eine (beispielhaft werkzeugtragende) Spindel zum Aufnehmen eines Werkzeugs und ein Einspannmittel zum Einspannen eines Werkstücks mittels eines magnetischen induktiven Messvorgangs durchzuführen, bei dem ein Prüfdorn in der Spindel aufgenommen wird und an dem Einspannmittel der Werkzeugmaschine eine magnetische Messvorrichtung mit einem Messstativ und zumindest drei Hall-Sensoren befestigt wird, wobei die Messvorrichtung zur magnetisch induktiven Positionsbestimmung des an der Spindel aufgenommenen Prüfdorns geeignet ist. Die Position des Prüfdorns wird dann in Abhängigkeit des Betriebszustands der Spindel, d.h. insbesondere in Abhängigkeit der Drehzahl (zur Drehzahlsprungkompensation) und/oder der Betriebsdauer der Spindel (zur thermischen Kompensation) erfasst und nach Datenübermittlung an einen Auswertungscomputer ausgewertet, um die betriebszustandsabhängige Spindelkompensation (thermische Kompensation und/oder Drehsprungkompensation) in Richtung der Spindelachse zu erfassen und an die Maschinensteuerung weiterzugeben.

**[0009]** Das im vorstehend beschriebene, im Stand der Technik bekannte Induktionsmessverfahren zur Spindelkompensationsermittlung weist jedoch die Nachteile auf, dass eine aufwendige, kostenintensive und sensible Messausrüstung einschließlich einer Messapparatur mit Messstativ und Hall-Sensoren, einem speziellen induktionsfähigen Prüfdorn als kostenintensives Sonderwerkzeug, einem zusätzlichen Messwertverstärker bzw. Wandler sowie einem unabhängigen Computer (PC) zur Datenauswertung benötigt wird. Weiterhin ist eine vollautomatische Datenübernahme zur Maschinensteuerung nicht möglich, da ein separater Computer zur Datenauswertung benötigt wird, der nicht mit der Maschinensteuerung synchronisiert ist.

**[0010]** Zudem ist die Installation der Messausrüstung, insbesondere der Messapparatur mit Messstativ und Hall-Sensoren sehr zeitaufwendig und kann nicht voll automatisiert durchgeführt werden. Ein derartiges Messverfahren kann somit nicht von normalem Bedienpersonal oder Wartungspersonen durchgeführt werden, sondern muss von Personal einer speziellen Versuchsabteilung des Maschinenherstellers durchgeführt werden, z.B. vor Auslieferung der Werkzeugmaschine im Rahmen einer Erstkalibration oder zu einem späteren Zeitpunkt im Rahmen einer kostspieligen Anreise des externen Personals der speziellen Versuchsabteilung des Maschinenherstellers.

**[0011]** Insbesondere ist aufgrund des beschriebenen Aufwandes, der mit einem solchen Induktionsmessverfahren verbunden ist, keine wirkliche maschinenindividuelle Serienmessung möglich, bei der die Maschinensteuerung von numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen einer großen Serienproduktion im Rahmen einer Spindelkompensation individuell erstkalibriert wird, sondern es wird für ausgewählte Einzelmaschinen eine Spindelkompensation durchgeführt und die Ergebnisse auf die Maschinen der Serienproduktion übertragen, obwohl noch Streuungen im Hauptspindelantrieb von numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen einer großen Serienproduktion nachweislich vorhanden sind.

**[0012]** Im Hinblick auf die vorstehend beschriebenen Nachteile des Stands der Technik ist es eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren bzw. eine Vorrichtung zum Ermitteln einer Spindelkompensation an einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine mit werkzeugtragender oder werkstücktragender Spindel bereitzustellen, bei der im Vergleich zum aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren einfachere, kostensparende Mittel verwendet werden können.

**[0013]** Des Weiteren ist es eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren bzw. eine Vorrichtung zum Ermitteln einer Spindelkompensation an einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine mit werkzeugtragender oder werkstücktragender Spindel bereitzustellen, welche leichter in die Maschinensteuerung der Werkzeugmaschine integrierbar ist und vorzugsweise von der Maschinensteuerung vollautomatisch gesteuert werden kann, ohne zusätzliche Verwendung eines angeschlossenen Auswertungscomputers.

**[0014]** Des Weiteren ist es eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren bzw. eine Vorrichtung zum Ermitteln einer Spindelkompensation an einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine mit werkzeugtragender oder werkstücktragender Spindel bereitzustellen, welche in einer Serienproduktion effizient angewendet werden kann und auch

direkt bei Besitzern der Werkzeugmaschine vor Ort ohne aufwendige Anreise von Spezialpersonal des Maschinenherstellers durchgeführt werden kann.

**[0015]** DE 10 2009 024 752 A1 betrifft ein Verfahren zum Vermessen und/oder Kalibrieren einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine mit wenigstens einer Werkzeugspindel und wenigstens einer Rundachse, um welche die Werkzeugspindel gegenüber dem Werkstück schwenkbar ist. Das Verfahren umfasst die Schritte: Einspannen eines Testklotzes, Einfräsen wenigstens einer ersten Messfläche in einer vorgegebenen Position und Orientierung in den Testklotz mit einer ersten Schwenkposition der Rundachse, Schwenken der Werkzeugspindel und/oder des Testklotzes um die Rundachse in eine zweite Schwenkposition, Einfräsen wenigstens einer zweiten Messfläche in den Testklotz, wobei die Orientierung der zweiten Messfläche der Orientierung der ersten Messfläche entspricht, und Vermessen der ersten Messfläche und der zweiten mit einem Messtaster in einer Basisorientierung der Werkzeugmaschine.

**[0016]** DE 10 2011 105 897 A1 betrifft ein Verfahren zur Kompensation von Bearbeitungsfehlern durch elastische Deformationen eines Werkstücks, die mittels einer Berechnung in Form von dynamischen Korrekturwerten in einem laufenden NC-Programm berücksichtigt werden. Vor Beginn der Bearbeitung werden Geometriedaten unter Verwendung zusätzlicher Informationen wie beispielsweise die Umgebungstemperatur schrittweise überarbeitet und in der Bearbeitung vorhersagbare Bearbeitungsfehler werden durch angepasste Geometriedaten kompensiert.

**[0017]** DE 10 2009 007 439 A1 betrifft ein Verfahren zum Steuern einer Werkzeugmaschine zum spanenden Bearbeiten einer Oberfläche, insbesondere einer Zylinderlaufbahn einer Brennkraftmaschine. Hierzu wird zunächst ein Versuchswerkstück unter Verwendung eines Teststeuerungsparametersatzes bearbeitet und der Einfluss dieser Bearbeitung auf die Oberfläche des Versuchswerkstückes - also der Materialabtrag - ermittelt. Aus der Korrelation zwischen Teststeuerungsparametersatz und jeweiligem Materialabtrag an verschiedenen Positionen der Oberfläche wird eine erste Übertragungsfunktion bestimmt, welche den Einfluss der Werkzeugmaschinensteuerung auf die Oberfläche darstellt. Durch Ermitteln der Umkehrfunktion dieser ersten Übertragungsfunktion wird eine Funktion erhalten, mittels der ausgehend von der gewünschten Endgeometrie des Werkstückes ein Steuerungsparametersatz für die Werkzeugmaschine erstellt werden kann.

## Zusammenfassung der Erfindung

**[0018]** Zur Lösung der vorstehend genannten Aufgaben wird erfindungsgemäß ein Verfahren zum Ermitteln einer Spindelkompensation an einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine mit den Merkmalen des Anspruchs 1 und eine Vorrichtung zum Ermitteln einer Spindelkompensation an einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine mit den Merkmalen des Anspruchs 19 vorgeschlagen.

**[0019]** Weiterhin wird zur Lösung der vorstehend genannten Aufgabe erfindungsgemäß eine numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine mit den Merkmalen des Anspruchs 20 und ein Computerprogrammprodukt mit den Merkmalen des Anspruchs 22 vorgeschlagen.

**[0020]** Abhängige Ansprüche betreffen bevorzugte Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung.

**[0021]** Gemäß einem ersten Aspekt der vorliegenden Erfindung wird ein Verfahren zum Ermitteln einer Spindelkompensation, insbesondere in Abhängigkeit eines Betriebszustands der Spindel, an einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine, die eine werkzeugtragende Arbeitsspindel zum Aufnehmen eines Werkzeugs und ein Einspannmittel zum Einspannen eines Werkstücks umfasst, oder die eine werkstücktragende Arbeitsspindel zum Aufnehmen eines Werkstücks und ein Einspannmittel zum Einspannen eines Werkzeugs umfasst, vorgeschlagen.

**[0022]** Erfindungsgemäß umfasst das Verfahren das Einspannen eines Testwerkstücks an dem Einspannmittel der Werkzeugmaschine (im Falle einer werkzeugtragenden Spindel) oder an der Spindel der Werkzeugmaschine (im Falle einer werkstücktragenden Spindel), das Aufnehmen eines Zerspanwerkzeugs an der Spindel der Werkzeugmaschine (im Falle einer werkzeugtragenden Spindel) oder an dem Einspannmittel der Werkzeugmaschine (im Falle einer werkstücktragenden Spindel), das Bearbeiten des Testwerkstücks mittels des Zerspanwerkzeugs zum Herausarbeiten einer Mehrzahl von  $r$  Testflächen auf dem Testwerkstück in Abhängigkeit einer jeweiligen Vorgabeposition in der ersten Richtung, insbesondere bei einem bestimmten Betriebszustand der Spindel, das Einwechseln eines Tastwerkzeugs an der Spindel (im Falle einer werkzeugtragenden Spindel) oder an dem Einspannmittel der Werkzeugmaschine (im Falle einer werkstücktragenden Spindel), das Ermitteln einer jeweiligen Istposition in der ersten Richtung für jede der Mehrzahl von herausgearbeiteten Testflächen auf dem Testwerkstück mittels des Tastwerkzeugs, und das Ermitteln zumindest eines Spindelkompensationsparameters, insbesondere eines betriebszustandsabhängigen Spindelkompensationsparameters, in der ersten Richtung in Abhängigkeit und der

ermittelten Istpositionen, wobei die Mehrzahl von Testflächen bei unterschiedlichen Betriebszuständen der Spindel herausgearbeitet werden, und in Abhängigkeit eines Vergleichs von Vorgabeposition und Istpositionen in der ersten Richtung der herausgearbeiteten Testflächen oder in Abhängigkeit eines Vergleichs der Istpositionen untereinander eine betriebszustandsabhängige Spindelkompensation ermittelt wird.

**[0023]** Der Erfindung liegt hierbei die Idee zu Grunde, die Spindelkompensation in der ersten Richtung an der Werkzeugmaschine z.B. mittels einem an der werkzeugtragenden Spindel aufgenommenem Standardwerkzeug (z.B. einem Fräswerkzeug, insbesondere Schafffräser) und einem an dem Einspannmittel aufgenommenem Testwerkstück z.B. aus Metall, insbesondere Aluminium, und durch Abtasten des bearbeiteten Testwerkstücks mittels eines Standard-Messtasters durchzuführen, so dass folglich im Vergleich zum aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren einfachere, kostensparende Mittel verwendet werden können. Bei Werkzeugmaschinen mit werkstücktragender Spindel kann das Verfahren analog angewendet werden, indem die Spindelkompensation in der ersten Richtung an der Werkzeugmaschine z.B. mittels einem an dem Einspannmittel aufgenommenem Standardwerkzeug und einem an der Spindel aufgenommenem Testwerkstück z.B. aus Metall, insbesondere Aluminium, und durch Abtasten des bearbeiteten Testwerkstücks mittels eines Standard-Messtasters durchgeführt wird.

**[0024]** Hierbei kann zumindest eine Testfläche in Abhängigkeit einer Vorgabeposition, die vorzugsweise eine Vorgabeposition in der ersten Richtung angibt, mittels des Standard-Zerspanwerkzeugs auf dem Testwerkstück herausgearbeitet werden, die danach mittels des Messtasters zur Bestimmung der Istposition, die vorzugsweise eine Istposition in der ersten Richtung angibt, abgetastet wird. Ein Vergleich der vorgegebenen Vorgabeposition der Testfläche und der ermittelten Istposition der Testfläche bzw. beim Herausarbeiten von mehreren Testflächen der Vergleich der Istpositionen der Testflächen untereinander (inkrementell) kann dann vorteilhaft zur einfachen Ermittlung der Spindelkompensation verwendet werden. Im letzteren Falle ergibt sich zudem der Vorteil, dass etwaige Maschinenungenauigkeiten der Achsen beim Anfahren der Positionen kompensiert werden, da Herausarbeiten und Abtasten unter gleichen Bedingungen (z.B. aus der gleichen Richtung) erfolgen.

**[0025]** Erfindungsgemäß ist es somit vorteilhaft nicht mehr erforderlich, eine spezielle, nur von Spezialpersonal installierbare und bedienbare Messausrüstung, die noch für das herkömmlich bekannte Induktionsmessverfahren benötigt wird, bereitzustellen.

len, sondern die Spindelkompensation kann mittels einfacher Standardausrüstung der Werkzeugmaschine (Standardwerkzeug und Messtaster) und mittels eines kostengünstigen Testwerkstücks vollautomatisiert durchgeführt werden.

**[0026]** Zudem ist es nicht erforderlich, die Auswertung mittels eines separaten Auswertungscomputers durchzuführen, sondern das Verfahren zur Spindelkompensationsermittlung kann vorteilhaft direkt in der Maschinensteuerung der Werkzeugmaschine integriert werden und vollautomatisiert, und durch normales Bedienpersonal der Werkzeugmaschine gestartet, durchgeführt werden. Insbesondere ist es vorteilhaft denkbar, das Verfahren als vorgegebenes Steuerprogramm, z.B. in Form eines einfach zu bedienenden Anwenderzyklus, programmtechnisch in der Maschinensteuerung zu integrieren bzw. an der Maschinensteuerung durch nachträgliches Daten-Update durch zusätzlich angebotene Software-Produkte nachträglich aufzurüsten.

**[0027]** Weiterhin kann das erfindungsgemäße Verfahren vollautomatisiert, von der Maschinensteuerung der Werkzeugmaschine gesteuert durchgeführt werden, und kann somit besonders vorteilhaft als automatisch ablaufender Bestandteil in einen automatisierten Dauerlauftest bei Fertigstellung einer Werkzeugmaschine in der Serienproduktion integriert werden, so dass in der Serienproduktion ein automatisches und einfaches maschinenindividuelles Erstkalibrieren der Spindel einschließlich Spindelkompensation für jede gefertigte Werkzeugmaschine individuell durchgeführt werden kann. Eine Streuung in der Serienproduktion kann folglich signifikant reduziert werden, so dass die Bearbeitungsgenauigkeit der Werkzeugmaschinen einer Serienproduktion deutlich verbessert werden kann.

**[0028]** Es ist jedoch weiterhin davon auszugehen, dass sich die Spindelverlagerung aufgrund des thermischen und mechanischen Verhaltens während der Standzeit bei den Maschinenanwendern verändert, wobei das erfindungsgemäße Verfahren es einfach und vollautomatisiert ermöglicht, eine weitere spätere Nachkalibration je nach Bedarf und Genauigkeitsanforderungen bei den Maschinenanwendern durchzuführen.

**[0029]** Vorzugsweise unterscheiden sich unterschiedliche Betriebszustände der Spindel zumindest in Spindeldrehzahl und/oder Spindelbetriebsdauer. Dies hat den Vorteil, dass die Spindelkompensation vorteilhaft in Abhängigkeit unterschiedlichster Betriebszustände der Spindel ermittelt werden kann, um bei späterer Verwendung der Werkzeugmaschine eine auftretende Verlagerung der Spindel vorteilhaft in Abhängigkeit der unterschiedlichen Betriebszustände der Spindel kompensieren zu können.

**[0030]** Insbesondere ist es hierbei von Vorteil, dass bei Variation der Drehzahl der Spindel bei dem Herausarbeiten der Testflächen, wenn also unterschiedliche Testflächen mit unterschiedlichen Spindeldrehzahlen herausgearbeitet werden, eine Bestimmung der Drehzahlsprungkompensation ermöglicht wird, und/oder dass bei Variation der Betriebsdauer der Spindel bei dem Herausarbeiten der Testflächen, wenn also unterschiedliche Testflächen nach unterschiedlichen Betriebsdauern der Spindel herausgearbeitet werden, eine Bestimmung der thermischen Spindelkompensation ermöglicht wird.

**[0031]** Vorzugsweise ist die erste Richtung die Richtung der Spindelachse der Spindel, oder die erste Richtung kann auch quer oder senkrecht zu der Spindelachse der Spindel orientiert sein. Rein prinzipiell ist es möglich, dass die erste Richtung eine beliebige Richtung ist.

**[0032]** Gemäß einer möglichen Ausführung der Erfindung wird der Schritt des Ermitteln des zumindest einen Spindelkompensationsparameters auf Grundlage eines Vergleichs der Vorgabeposition und der Istposition in der ersten Richtung der zumindest einen herausgearbeiteten Testfläche bzw. der Istpositionen in der ersten Richtung von mehreren herausgearbeiteten Testflächen durchgeführt.

**[0033]** Gemäß einer möglichen Ausführung der Erfindung wird der Schritt des Ermitteln des zumindest einen Spindelkompensationsparameters auf Grundlage eines Vergleichs der jeweiligen Vorgabeposition und der jeweiligen Istposition in der ersten Richtung für zumindest eine der herausgearbeiteten Testfläche durchgeführt.

**[0034]** Gemäß einer besonders zweckmäßigen Ausführung der Erfindung wird der Schritt des Ermitteln des zumindest einen Spindelkompensationsparameters auf Grundlage eines Vergleichs der Istpositionen in der ersten Richtung der herausgearbeiteten Testflächen durchgeführt. Insbesondere diese Ausführung hat den enormen Vorteil, dass ohne zusätzliche Berechnungen oder komplexe Kalibrationen Maschinenungenauigkeiten der Achsen der Werkzeugmaschine außen vor bleiben, da sich diese aufgrund des Verfahrens von selbst kompensieren, da sie sowohl bei dem Herausarbeiten der Testflächen als auch beim Abtasten in gleichem Maße auftreten und somit gegenseitig kompensiert sind.

**[0035]** Gemäß einer zweckmäßigen Ausführung der Erfindung wird das Herausarbeiten einer ersten Testfläche auf dem Testwerkstück vorzugsweise bei einem vorbestimmten Betriebszustand der Spindel durchgeführt, und in Abhängigkeit eines Vergleichs der Vorgabeposition und Istposition in der ersten Richtung der herausgearbeiteten ersten Testfläche

wird vorzugsweise ein von dem vorbestimmten Betriebszustand abhängender Spindelkompensationsparameter ermittelt. Dies hat den Vorteil, dass die Spindelkompensation vorteilhaft in Abhängigkeit des Betriebszustandes der Spindel ermittelt werden kann, um bei späterer Verwendung der Werkzeugmaschine eine auftretende Verlagerung der Spindel in der ersten Richtung vorteilhaft in Abhängigkeit des Betriebszustandes der Spindel kompensieren zu können.

**[0036]** Gemäß einer besonders vorteilhaften Ausführung der Erfindung wird vorzugsweise eine Mehrzahl von Testflächen auf dem Testwerkstück herausgearbeitet, wobei die Testflächen der Mehrzahl von Testflächen vorzugsweise bei unterschiedlichen Betriebszuständen der Spindel herausgearbeitet werden, und wobei vorzugsweise in Abhängigkeit eines Vergleichs von Vorgabeposition(en) und Istpositionen oder eines Vergleichs der Istpositionen untereinander in der ersten Richtung der herausgearbeiteten Testflächen eine betriebszustandsabhängige Spindelkompensation ermittelt wird.

**[0037]** Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung umfasst das Bearbeiten des Testwerkstücks mittels des Zerspanwerkzeugs das Herausarbeiten einer ersten Testfläche in Abhängigkeit der Vorgabeposition in der ersten Richtung und das Herausarbeiten einer zweiten Testfläche in Abhängigkeit der Vorgabeposition in der ersten Richtung, wobei die erste und die zweite Testfläche vorzugsweise bei unterschiedlichen Drehzahlen der Spindel herausgearbeitet werden.

**[0038]** Vorzugsweise umfasst das Ermitteln zumindest eines Spindelkompensationsparameters das Ermitteln eines ersten Spindelkompensationsparameters in Abhängigkeit der Drehzahl der Spindel basierend auf einem Vergleich der ermittelten Istposition in der ersten Richtung der ersten Testfläche und der ermittelten Istposition in der ersten Richtung der zweiten Testfläche. Dies ermöglicht es vorteilhaft eine Drehzahlsprungkompensation durchzuführen.

**[0039]** Vorzugsweise wird eine Mehrzahl von Testflächen einer ersten Gruppe bei jeweils unterschiedlichen Drehzahlen herausgearbeitet, und die Spindelkompensation wird vorzugsweise in Abhängigkeit der Drehzahl der Spindel durch Vergleich der Istpositionen in der ersten Richtung der Testflächen der ersten Gruppe ermittelt. Dies ermöglicht es vorteilhaft eine Drehzahlsprungkompensation in Abhängigkeit vieler unterschiedlicher Spindel-drehzahlen durchzuführen.

**[0040]** Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung umfasst das Bearbeiten des Testwerkstücks mittels des Zerspanwerkzeugs das Herausarbeiten einer ersten Testfläche in

Abhängigkeit der Vorgabeposition in der ersten Richtung und das Herausarbeiten einer dritten Testfläche in Abhängigkeit der Vorgabeposition in der ersten Richtung, wobei die erste und die dritte Testfläche vorzugsweise bei unterschiedlichen Betriebsdauern der Spindel herausgearbeitet werden.

**[0041]** Vorzugsweise umfasst das Ermitteln zumindest eines Spindelkompensationsparameters das Ermitteln eines zweiten Spindelkompensationsparameters in Abhängigkeit der Betriebsdauer der Spindel basierend auf einem Vergleich der ermittelten Istposition in der ersten Richtung der ersten Testfläche und der ermittelten Istposition in der ersten Richtung der dritten Testfläche. Dies ermöglicht es vorteilhaft eine thermische Spindelkompensation durchzuführen.

**[0042]** Vorzugsweise wird eine Mehrzahl von Testflächen einer zweiten Gruppe bei jeweils unterschiedlichen Betriebsdauern der Spindel herausgearbeitet, und die Spindelkompensation wird vorzugsweise in Abhängigkeit der Betriebsdauer der Spindel durch Vergleich der Istpositionen in der ersten Richtung der Testflächen der zweiten Gruppe ermittelt. Dies ermöglicht es vorteilhaft eine thermische Spindelkompensation in Abhängigkeit vieler unterschiedlicher Betriebsdauern der Spindel durchzuführen.

**[0043]** Vorzugsweise werden bei einer ersten Betriebsdauer der Spindel die erste und die zweite Testfläche auf dem Testwerkstück herausgearbeitet und bei einer zweiten Betriebsdauer der Spindel die dritte und eine vierte Testfläche auf dem Testwerkstück herausgearbeitet. Vorzugsweise werden die erste Testfläche und die dritte Testfläche bei der gleichen ersten Drehzahl der Spindel herausgearbeitet, und vorzugsweise werden die zweite Testfläche und die vierte Testfläche bei der gleichen zweiten, von der ersten Drehzahl unterschiedlichen Drehzahl der Spindel herausgearbeitet. Dies ermöglicht auf einfache Weise eine gleichzeitige Durchführung einer thermischen Spindelkompensation und einer Drehzahlsprungkompensation.

**[0044]** Gemäß einer vorteilhaften Ausführung der vorliegenden Erfindung wird das Bearbeiten des Testwerkstücks in einer Mehrzahl von Bearbeitungssätzen ausgeführt, wobei vorzugsweise ein erster Bearbeitungssatz das Herausarbeiten der ersten und zweiten Testfläche umfasst und ein zweiter Bearbeitungssatz das Herausarbeiten der dritten und vierten Testfläche umfasst. Insbesondere werden vorzugsweise in jedem Bearbeitungssatz Testflächen einer jeweiligen ersten Gruppe (Flächensatz) mit unterschiedlichen vorbestimmten Drehzahlen bei einer vorbestimmten Betriebsdauer der Spindel herausgearbeitet, und für jede einer Mehrzahl von vorbestimmten Betriebsdauern wird vorzugsweise ein jeweiliger Bearbeitungssatz ausgeführt, derart,

dass eine jeweilige zweite Gruppe von Testflächen einer vorbestimmten Drehzahl jeweils eine Testfläche in jedem Bearbeitungssatz (bzw. eine Testfläche in jedem Flächensatz) umfasst.

**[0045]** Vorzugsweise wird die Bearbeitung des Testwerkstücks in Bearbeitungssätzen ohne Werkzeugwechsel durchgeführt, und nach Bearbeitung des Testwerkstücks wird vorzugsweise das Tastwerkzeug an der Spindel (oder an dem Einspannmittel) eingewechselt, und alle herausgearbeiteten Testflächen werden vorzugsweise ohne Werkzeugwechsel mittels des Tastwerkzeugs zum Ermitteln der Istpositionen der Tastflächen abgetastet. Dies hat den Vorteil, dass die Genauigkeit des Verfahrens noch deutlich verbessert werden kann, da einerseits ein Fehler bei der Bearbeitung der Testflächen und bei der Abtastung der Testflächen minimiert werden kann, da jeweils kein Werkzeugwechsel während der Bearbeitung der Testflächen bzw. während der Abtastung der Testflächen durchgeführt wird.

**[0046]** Zudem werden die jeweiligen Testflächen vorteilhaft jeweils an der gleichen Maschinenposition durchgeführt, so dass Kompensation- bzw. Geometriefehler der Maschine ausgeschlossen werden können, insbesondere wenn die Messergebnisse der jeweiligen Testflächen inkrementell (d.h. Vergleich der Istpositionen untereinander) verglichen werden. Weiterhin können Messfehler aufgrund einer Fehlkalibration des Messtasters ausgeschlossen werden, da unabhängig von der jeweiligen Kalibration Messfehler bei Wiederholungen der Messung als kleiner als 1 µm anzunehmen sind, und eine fehlerhafte Kalibration des Messtasters die Genauigkeit des Vergleichs der hintereinander ausgeführten Messungen nicht beeinflusst.

**[0047]** Vorzugsweise wird die Spindel zwischen zwei Bearbeitungssätzen für einen vorbestimmten Zeitraum bei einer vorbestimmten Drehzahl ohne Bearbeitung des Testwerkstücks betrieben. Vorzugsweise wird die Spindel alternativ zwischen zwei Bearbeitungssätzen für einen vorbestimmten Zeitraum bei einer Drehzahl gleich Null mit Spindelstillstand betrieben.

**[0048]** Vorzugsweise weist das Testwerkstück eine ebene Oberflächenseite auf, und vorzugsweise wird das Bearbeiten des Testwerkstücks in einer Orientierung des Testwerkstücks ausgeführt, in der die ebene Oberflächenseite des Testwerkstücks orthogonal zur dritten Richtung ausgerichtet ist.

**[0049]** Vorzugsweise umfasst das erfindungsgemäße Verfahren weiterhin Ermitteln einer Nullpunktverschiebung des eingespannten Testwerkstücks mittels des Tastwerkzeugs.

**[0050]** Gemäß einem zweiten Aspekt der vorliegenden Erfindung wird eine Vorrichtung zum Ermitteln einer Spindelkompensation, die dazu eingerichtet ist, ein Verfahren gemäß dem vorhergehend beschriebenen ersten Aspekt bzw. einer oder mehrerer von dessen bevorzugter Ausführungen an einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine, die eine Spindel zum Aufnehmen eines Werkzeugs und ein Einspannmittel zum Einspannen eines Testwerkstücks oder eine Spindel zum Aufnehmen eines Testwerkstücks und ein Einspannmittel zum Einspannen eines Werkzeugs umfasst, vorgeschlagen.

**[0051]** Die Vorrichtung umfasst erfindungsgemäß ein Werkzeugwechsel-Steuermittel zum Steuern eines Aufnehmens eines Zerspanwerkzeugs an der Spindel bzw. dem Einspannmittel der Werkzeugmaschine und zum Einwechseln eines Tastwerkzeugs an der Spindel bzw. dem Einspannmittel, ein Bearbeitungs-Steuermittel zum Bearbeiten des Testwerkstücks mittels des an der Spindel bzw. dem Einspannmittel aufgenommenen Zerspanwerkzeugs zum Herausarbeiten einer Mehrzahl von Testflächen auf dem Testwerkstück in Abhängigkeit einer jeweiligen Vorgabeposition in der ersten Richtung, ein Messmittel zum Ermitteln einer jeweiligen Istposition in der ersten Richtung für jede der Mehrzahl von herausgearbeiteten Testflächen auf dem Testwerkstück mittels des an der Spindel bzw. dem Einspannmittel eingewechselten Tastwerkzeugs, ein Kompensationsmittel zum Ermitteln zumindest eines Spindelkompensationsparameters in Abhängigkeit der ermittelten Istpositionen, wobei das Bearbeitungs-Steuermittel dazu eingerichtet ist, die Mehrzahl von Testflächen bei unterschiedlichen Betriebszuständen der Spindel herauszuarbeiten, und das Kompensationsmittel dazu eingerichtet ist, in Abhängigkeit eines Vergleichs von Vorgabeposition und Istpositionen in der ersten Richtung der herausgearbeiteten Testflächen oder in Abhängigkeit eines Vergleichs der Istpositionen untereinander eine betriebszustandsabhängige Spindelkompensation zu ermitteln.

**[0052]** Gemäß einem dritten Aspekt der vorliegenden Erfindung wird ein numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine vorgeschlagen, umfassend eine (werkzeugtragende) Spindel zum Aufnehmen eines Werkzeugs, ein Einspannmittel zum Einspannen eines Werkstücks, und eine Vorrichtung zum Ermitteln einer Spindelkompensation an der Werkzeugmaschine gemäß dem vorstehend beschriebenen zweiten Aspekt bzw. bevorzugter Ausführungen des zweiten Aspekts, oder umfassend eine (werkstücktragende) Spindel zum Aufnehmen eines Werkstücks, ein Einspannmittel zum Einspannen eines Werkzeugs, und eine Vorrichtung zum Ermitteln einer Spindelkompensation an der Werkzeugmaschine gemäß dem vorstehend beschriebenen zwei-

ten Aspekt bzw. bevorzugter Ausführungen des zweiten Aspekts.

**[0053]** Gemäß einem vierten Aspekt der vorliegenden Erfindung wird ein Computerprogrammprodukt vorgeschlagen, mit Programmmitteln, die auf einem Datenträger gespeichert sind, und die dazu eingerichtet sind, auf einer Steuervorrichtung einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine umfassend eine Spindel zum Aufnehmen eines Werkzeugs und ein Einspannmittel zum Einspannen eines Werkstücks oder eine Spindel zum Aufnehmen eines Werkstücks und ein Einspannmittel zum Einspannen eines Werkzeugs ausgeführt zu werden, derart, dass ein Verfahren nach dem vorhergehend beschriebenen ersten Aspekt bzw. einer oder mehrerer von dessen bevorzugter Ausführungen ausgeführt wird.

**[0054]** Zusammenfassend ermöglicht es die vorliegende Erfindung, ein Verfahren bzw. eine Vorrichtung zum Ermitteln einer Spindelkompensation an einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine bereitzustellen, bei der im Vergleich zum aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren einfachere, kostensparende Mittel verwendet werden können. Des Weiteren ermöglicht es die vorliegende Erfindung, ein Verfahren bzw. eine Vorrichtung zum Ermitteln einer Spindelkompensation an einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine bereitzustellen, welche leichter in die Maschinensteuerung der Werkzeugmaschine integrierbar ist und von der Maschinensteuerung vollautomatisch gesteuert werden kann, ohne zusätzliche Verwendung eines angeschlossenen Auswertungscomputers. Des Weiteren ermöglicht es die vorliegende Erfindung, ein Verfahren bzw. eine Vorrichtung zum Ermitteln einer Spindelkompensation an einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine bereitzustellen, welche in einer Serienproduktion effizient angewendet werden kann und auch direkt bei Besitzern der Werkzeugmaschine vor Ort ohne aufwendige Anreise von Spezialpersonal des Maschinenherstellers durchgeführt werden kann.

#### Kurzbeschreibung der Figuren

**Fig. 1** zeigt beispielhaft eine schematische Darstellung einer Werkzeugmaschine gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung.

**Fig. 2** zeigt beispielhaft eine schematische Darstellung einer Vorrichtung zum Ermitteln einer Spindelkompensation gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung.

**Fig. 3** zeigt beispielhaft ein Flussdiagramm eines Verfahrens zum Ermitteln einer Spindelkompensation gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung.

**Fig. 4** zeigt beispielhaft eine schematische Darstellung einer vorderen Oberfläche eines Test-

werkstücks mit herausgearbeiteten Testflächen zum Ermitteln einer Spindelkompensation an einer Werkzeugmaschine mit werkzeugtragender gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung.

**Fig. 5** zeigt beispielhaft eine weitere schematische Darstellung einer vorderen Oberfläche eines Testwerkstücks mit herausgearbeiteten Testflächen zum Ermitteln einer Spindelkompensation an einer Werkzeugmaschine mit werkzeugtragender Spindel gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung.

**Fig. 6** zeigt beispielhaft eine schematische Perspektivdarstellung eines angetasteten Testwerkstücks mit herausgearbeiteten Testflächen zum Ermitteln einer Spindelkompensation an einer Werkzeugmaschine mit werkstücktragender Spindel gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung.

#### Ausführliche Beschreibung der angehängten Figuren und bevorzugter Ausführungsbeispiele

**[0055]** Im Folgenden werden beispielhafte bevorzugte Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung unter Bezugnahme auf die beigefügten Figuren detailliert beschrieben. Die vorliegende Erfindung ist jedoch nicht auf die beschriebenen Ausführungsbeispiele beschränkt. Die vorliegende Erfindung ist durch den Umfang der Patentansprüche definiert. Gleiche bzw. ähnliche Merkmale der Ausführungsbeispiele werden in den Figuren mit gleichen Bezugsziffern gekennzeichnet.

**[0056]** **Fig. 1** zeigt beispielhaft eine schematische Darstellung einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine 100 gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung. In diesem Falle betrifft die Ausführung gemäß **Fig. 1** eine Werkzeugmaschine 100 mit werkzeugtragender Spindel, jedoch kann das erfindungsgemäße Verfahren gleichwohl auch bei Werkzeugmaschinen mit werkstücktragenden Spindeln analog angewendet werden. Siehe hierzu insbesondere die Beschreibung der **Fig. 6**.

**[0057]** Die Werkzeugmaschine 100 gemäß **Fig. 1** umfasst ein Längsbett 101, auf dem ein Maschinentisch mit Einspannmittel 105 in Z-Richtung verfahrbar angeordnet ist, und ein Querbett 102, an dem ein Spindelträger 103 in X-Richtung verfahrbar angeordnet ist. Zusätzlich zu den beiden Linearachsen in X- und Z-Richtung können noch weitere Linearachsen und Rundachsen vorgesehen sein (nicht gezeigt).

**[0058]** Das Einspannmittel 105 ist dazu eingerichtet, ein Werkstück einzuspannen, beispielhaft ein Testwerkstück TS. Der Spindelträger 103 trägt eine werkzeugtragende Arbeitsspindel 104, in der ein Fräs- werkzeug WZ (zum Beispiel ein Schafffräser oder

andere Fräs- bzw. Bohrwerkzeuge) aufgenommen ist. Im Falle einer werkstücktragenden Spindel müsste das Einspannmittel zum Einspannen eines Werkzeugs und später Messtasters eingerichtet sein.

**[0059]** Die gestrichelt-gepunktete Linie SA in **Fig. 1** bezeichnet die Spindelachse SA der Spindel 104. Weiterhin umfasst die numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine 100 eine Maschinensteuerung (z.B. PLC und/oder CNC-Steuerungseinrichtungen) zum Steuern der Linearachsen (und ggf. Rundachsen) der Werkzeugmaschine 100 (siehe z.B. Steuerungseinrichtung 200 in **Fig. 2**).

**[0060]** Zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens gemäß einer bevorzugten Ausführung der Erfindung weist das Testwerkstück TS eine der Spindel 104 zugewandte, ebene Oberflächenseite auf, die beispielhaft senkrecht zur Spindelachse SA (erste Richtung) ausgerichtet ist (d.h. weiterhin senkrecht zur Z-Richtung in **Fig. 1**). Alternativ hierzu, insbesondere an Werkzeugmaschinen mit 5 oder mehr Achsen (drei orthogonale Linearachsen und zwei Rundachsen) ist es möglich, das Testwerkstück TS beliebig bzw. in beliebiger Orientierung an dem Einspannmittel 105 einzuspannen. Nach Abtastung des Testwerkstücks mittels eines Messtasters ist es dann möglich, die Achsen der Werkzeugmaschine derart zu steuern, dass die ebene Oberflächenseite des Testwerkstücks derart ausgerichtet wird, dass diese Oberflächenseite senkrecht zur Spindelachse SA ausgerichtet ist.

**[0061]** Im Folgenden wird beispielhaft davon ausgegangen, dass eine Spindelkompensation in Richtung der Spindelachse (d.h. erste Richtung entspricht Spindelachsrichtung) durchgeführt wird. Jedoch kann das erfindungsgemäße Verfahren zudem angewendet werden, um Spindelkompensationsparameter in anderen Richtungen senkrecht oder schräg zur Spindelachse zu bestimmen, so dass die Erfindung nicht darauf beschränkt ist, dass die erste Richtung der Richtung der Spindelachse entspricht.

**[0062]** **Fig. 2** zeigt beispielhaft eine schematische Darstellung einer Vorrichtung 200 zum Ermitteln einer Spindelkompensation an der Werkzeugmaschine 100 gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung. Die Vorrichtung 200 kann als externe Steuervorrichtung ausgebildet sein, die an die Werkzeugmaschine 100 angeschlossen wird oder die Vorrichtung 200 kann in der internen Maschinensteuerung der Werkzeugmaschine 100 integriert sein bzw. die Maschinensteuerung der Werkzeugmaschine 100 ausbilden.

**[0063]** Die Vorrichtung 200 zum Ermitteln einer Spindelkompensation an der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine 100 umfasst ein Werkzeug-

wechsel-Steuermittel 201 zum Steuern eines Aufnehmens des Werkzeugs WZ an der Spindel 104 der Werkzeugmaschine 100 (oder am Einspannmittel bei Ausführung mit werkstücktragender Spindel) und zum Steuern eines Einwechsels eines Tastwerkzeugs an der Spindel 104 (oder am Einspannmittel bei Ausführung mit werkstücktragender Spindel), ein Bearbeitungs-Steuermittel 202 zum Bearbeiten des Testwerkstücks TS mittels des an der Spindel 104 (oder am Einspannmittel bei Ausführung mit werkstücktragender Spindel) aufgenommenen Werkzeugs WZ in Abhängigkeit einer Vorgabeposition in Richtung der Spindelachse SA (oder einer anderen beliebigen ersten Richtung) zum Herausarbeiten zumindest einer Testfläche F11 auf dem Testwerkstück TS, ein Messmittel 203 zum Ermitteln einer Istposition in Richtung der Spindelachse SA (in der ersten Richtung) der zumindest einen herausgearbeiteten Testfläche F11 auf dem Testwerkstück TS mittels des an der Spindel 104 (oder am Einspannmittel bei Ausführung mit werkstücktragender Spindel) eingewechselten Tastwerkzeugs, und ein Kompensationsmittel 204 zum Ermitteln zumindest eines Spindelkompensationsparameters in Abhängigkeit eines Vergleichs von Vorgabeposition und Istposition(en) der zumindest einen herausgearbeiteten Testfläche F11 und/oder in Abhängigkeit eines Vergleichs von Istpositionen untereinander von mehreren herausgearbeiteten Testflächen. Das Werkzeugwechsel-Steuermittel 201, das Bearbeitungs-Steuermittel 202, das Messmittel 203 und das Kompensationsmittel 204 sind über eine Datenverbindung 205 miteinander verbunden und mit einer Daten-Schnittstelle 204, über die die Vorrichtung 200 mit der Werkzeugmaschine 100 (z.B. direkt mit Aktoren und Antrieben der Werkzeugmaschine 100 zum Ansteuern der Aktoren und Antriebe oder indirekt mit der Maschinensteuerung der Werkzeugmaschine 100).

**[0064]** **Fig. 3** zeigt beispielhaft ein Flussdiagramm eines Verfahrens zum Ermitteln einer Spindelkompensation gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung.

**[0065]** In einem Schritt S1 wird das Testwerkstück TS an dem Einspannmittel 105 der Werkzeugmaschine 100 manuell, automatisiert oder vollautomatisch eingespannt (oder an der Spindel, im Falle einer werkstücktragenden Spindel).

**[0066]** Optional werden dann Schritte S2 und S3 durchgeführt, wobei in Schritt S2 (vor oder nach Schritt S1) ein Messtaster in der Spindel 104 (oder am Einspannmittel, im Falle einer werkstücktragenden Spindel) aufgenommen wird bzw. an der Spindel 104 (oder am Einspannmittel, im Falle einer werkstücktragenden Spindel) eingewechselt wird, und dann in Schritt S3 das Testwerkstück TS mittels des in der Spindel 104 (oder am Einspannmittel, im Falle

einer werkstücktragenden Spindel) aufgenommenen Messtasters abgetastet wird, insbesondere zur Bestimmung einer Nullpunktverschiebung des Testwerkstücks TS, insbesondere zur Bestimmung einer Nullpunktverschiebung des Testwerkstücks TS in Richtung der Spindelachse SA (oder einer beliebigen ersten Richtung).

**[0067]** Nach dem optionalen Abtastvorgang der Schritte S2 und S3 wird im Schritt S4 beispielhaft ein Standard-Schafffräser als Werkzeug WZ an der Spindel 104 (oder am Einspannmittel, im Falle einer werkstücktragenden Spindel) eingewechselt. Ohne die optionalen Schritte S2 und S3 kann der Schritt S4 vor oder nach Schritt S1 erfolgen.

**[0068]** Weiterhin kann das Verfahren einen Schritt enthalten, in der die Oberfläche des Testwerkstücks mittels des Werkzeugs WZ bei fixierter Position der Spindelrichtung plangefräst wird, um eine genaue plane Testoberfläche auf dem Testwerkstück bei einer vorgegebenen Z-Position zu schaffen.

**[0069]** In einem Schritt S5 werden eine oder mehrere Testflächen auf der ebenen Oberflächenseite (ggf. nach vorhergehendem planfräsen derselben) des Testwerkstücks TS mittels des in der Spindel 104 (oder am Einspannmittel, im Falle einer werkstücktragenden Spindel) aufgenommenen Schafffräasers WZ in Abhängigkeit einer vorgegebenen Vorgabeposition, die eine Vorgabeposition in Richtung der Spindelachse (oder in einer beliebigen ersten Richtung) der einen oder mehreren Testflächen nach Bearbeitung mit dem Schafffräser WZ angibt, herausgearbeitet.

**[0070]** Hierbei wird bei dem Herausarbeiten von mehreren Testflächen bevorzugt für jede Testfläche die gleiche Vorgabeposition in Richtung der Spindelachse (bzw. in der beliebigen ersten Richtung) vorgegeben, jedoch werden die Testflächen benachbart auf der der Spindel 104 (oder dem Einspannmittel, im Falle einer werkstücktragenden Spindel) zugewandten Oberflächenseite des Testwerkstücks TS herausgearbeitet (d.h. an unterschiedlichen Positionen in Bezug auf eine zur Spindelachse SA senkrecht liegenden Ebene). Alternativ ist es jedoch denkbar, für verschiedene Testflächen unterschiedliche Vorgabepositionen in Richtung der Spindelachse SA (oder der beliebigen ersten Richtung) anzugeben, wobei weiterhin die Testflächen benachbart auf der der Spindel 104 (oder dem Einspannmittel, im Falle einer werkstücktragenden Spindel) zugewandten Oberflächenseite des Testwerkstücks TS herausgearbeitet (d.h. an unterschiedlichen Positionen in Bezug auf eine zur Spindelachse SA senkrecht liegenden Ebene) herausgearbeitet werden.

**[0071]** In einem Schritt S6 wird ein Messtaster an der Spindel 104 (oder am Einspannmittel, im Falle

einer werkstücktragenden Spindel) eingewechselt (d.h. das bisher aufgenommene Werkzeug WZ wird ausgewechselt) und im Schritt S7 werden die Istposition(en) der einen oder mehreren herausgearbeiteten Testflächen auf dem Testwerkstück TS in Richtung der Spindelachse SA (oder der beliebigen ersten Richtung) durch Abtasten der einen oder mehreren Testflächen mittels des an der Spindel 104 (oder dem Einspannmittel, im Falle einer werkstücktragenden Spindel) eingewechselten Messtasters ermittelt.

**[0072]** Im letzten Schritt S8 werden die vorgegeben (en) Vorgabeposition(en) mit der einen oder den mehreren Istpositionen verglichen (oder bevorzugt die Istpositionen untereinander, d.h. bei mehreren Testflächen können weiterhin bzw. alternativ die jeweiligen Istpositionen inkrementell verglichen werden). Im Schritt S8 werden hierbei ein oder mehrere Spindelkompensationsparameter ermittelt, die in Abhängigkeit des Vergleichs eine Verlagerung der Spindel 104 in Richtung der Spindelachse SA (bzw. in der beliebigen ersten Richtung) angeben.

**[0073]** Bei einer Testfläche ergibt sich die Verlagerung der Spindel 104 durch die Differenz von Soll- und Istposition dieser Testfläche. Wird die Testfläche unter einem bestimmten Betriebszustand der Spindel 104 durchgeführt (d.h. bei einer bestimmten Drehzahl und/oder nach einer bestimmten Betriebsdauer der Spindel 104), kann ein betriebszustandsabhängiger Spindelkompensationsparameter bestimmt werden. Hierbei kann weiterhin durch Herausarbeiten von zwei oder mehr Testflächen eine Drehzahlsprungkompensation bzw. eine thermische Spindelkompensation bestimmt werden.

**[0074]** Für das Bestimmen einer Drehzahlsprungkompensation werden zwei oder mehr Testflächen auf dem Testwerkstück TS bei unterschiedlichen Spindeldrehzahlen herausgearbeitet (z.B. eine erste Testfläche bei einer Drehzahl N1, eine zweite Testfläche bei einer Drehzahl N2 und eine dritte Testfläche bei einer Drehzahl N3, etc.) und durch Vergleich der jeweiligen Istpositionen der Testflächen in Richtung der Spindelachse SA untereinander und/oder jeweils mit der Vorgabeposition ergibt sich ein oder mehrere eine Drehzahlsprungkompensation angegebene Kompensationsparameter in Abhängigkeit der Drehzahl der Spindel 104.

**[0075]** Für das Bestimmen einer thermischen Spindelkompensation werden zwei oder mehr Testflächen auf dem Testwerkstück TS bei unterschiedlichen Betriebsdauern herausgearbeitet (z.B. eine erste Testfläche nach Inbetriebnahme der Spindel bei  $t = 0$ , eine zweite Testfläche nach einer Betriebsdauer der Spindel 104 von 10 Minuten und eine dritte Testfläche nach einer Betriebsdauer der Spindel nach 20 Minuten, etc.) und durch Vergleich der jewei-

ligen Istpositionen der Testflächen in Richtung der Spindelachse SA untereinander und/oder jeweils mit der Vorgabeposition ergibt sich ein oder mehrere eine thermische Spindelkompensation angegebende Kompensationsparameter in Abhängigkeit der Betriebsdauer der Spindel 104.

**[0076]** Fig. 4 zeigt beispielhaft eine schematische Darstellung einer vorderen Oberfläche eines Testwerkstücks TS mit herausgearbeiteten Testflächen zum Ermitteln einer Spindelkompensation einschließlich einer thermischen Spindelkompensation und einer Drehzahlsprungkompensation gemäß einem besonders zweckmäßigen Ausführungsbeispiel der Erfindung. Hierbei werden die mehreren Testflächen F11 bis Fn4 in mehreren Bearbeitungssätzen benachbart auf der ebenen Oberflächenseite des Testwerkstücks TS herausgearbeitet.

**[0077]** Fig. 4 zeigt die Draufsicht auf die ebene Oberflächenseite des Testwerkstücks TS (d.h. die Spindelachsrichtung bzw. die Z-Richtung liegt senkrecht zur Zeichenebene der Fig. 4).

**[0078]** Nach einer vorbestimmten Betriebsdauer T1 der Spindel 104 (z.B. betrieben bei einer vorbestimmten festen Drehzahl N0 über die vorbestimmte Betriebsdauer T1 oder auch in einer Abkühlungsphase mit Spindelstillstand, d.h.  $N = 0$ , über die vorbestimmte Betriebsdauer T1) werden in einem ersten Bearbeitungssatz die Testflächen F11, F12, F13 und F14 (erste Gruppe bzw. erster Flächensatz) bei den unterschiedlichen Drehzahlen N1, N2, N3 und N4 herausgearbeitet (beispielhaft mit dem gleichen vorgegebenen Vorgabepositionsparameter Z1 in Richtung der Z-Richtung bzw. der Spindelachse SA, jedoch bei unterschiedlichen X- bzw. Y-Achsenpositionen).

**[0079]** Lediglich beispielhaft werden in Fig. 4 die Testflächen jeweils durch eine einzige Verfahrensbewegung des Schafffräasers WZ in Y-Richtung bei der jeweiligen X-Position und einer Z-Position entsprechend des vorgegebenen Vorgabepositionsparameters in stirnseitiger Bearbeitung von links kommend herausgearbeitet (so dass an der rechten Seite der Testfläche jeweils eine Rundung entsprechend des Werkzeugradius des Schafffräasers WZ entsteht).

**[0080]** Nach einer vorbestimmten Betriebsdauer T2 der Spindel 104 (z.B. wieder betrieben bei der vorbestimmten Drehzahl N0 oder in einer Abkühlphase mit Spindelstillstand über die vorbestimmte Betriebsdauer T2) werden in einem zweiten Bearbeitungssatz die Testflächen F21, F22, F23 und F24 (zweiter Flächensatz) bei den unterschiedlichen Drehzahlen N1, N2, N3 und N4 herausgearbeitet, etc. Schließlich werden nach einer vorbestimmten Betriebsdauer Tn der Spindel 104 (z.B. wieder betrieben bei der vorbestimmten Drehzahl N0, sog. Dauerlaufdrehzahl) in

einem n-ten Bearbeitungssatz die Testflächen Fn1, Fn2, Fn3 und Fn4 (n-ter Flächensatz) bei den unterschiedlichen Drehzahlen N1, N2, N3 und N4 herausgearbeitet.

**[0081]** Ein inkrementeller Vergleich der durch Abtasten mittels des Messtasters der Testflächen bestimmten Istpositionen der Testflächen (oder ein jeweiliger Vergleich mit der vorgegebenen Vorgabeposition in Richtung der Spindelachse SA) kann zur Bestimmung betriebszustandsabhängiger Spindelkompensationsparameter verwendet werden.

**[0082]** Hierbei kann eine Drehzahlsprungkompensation für eine Mehrzahl von Drehzahlen N1 bis N4 (die Anzahl von vier Drehzahlen ist hier lediglich beispielhaft gewählt) ermittelt werden anhand der ermittelten Istpositionen der Testflächen eines jeweiligen Flächensatzes bzw. der Flächensätze, z.B. anhand der Istpositionen der Testflächen F11, F12, F13 und F14 (erste Gruppe bzw. erster Flächensatz), anhand der Istpositionen der Testflächen F21, F22, F23 und F24 (zweiter Flächensatz), etc., und/oder anhand der Istpositionen der Testflächen Fn1, Fn2, Fn3 und Fn4 (n-ter Flächensatz).

**[0083]** Somit kann mittels eines jeden Flächensatzes aufgrund der unterschiedlichen Messwerte innerhalb eines Flächensatzes der Drehzahlsprung der Spindel 104 bestimmt werden. Durch Vergleich aller Flächensätze kann sogar ein betriebsdauerabhängiger Drehzahlsprung der Spindel 104 bestimmt werden. Die Auswertung kann vorteilhaft und automatisch auf der Maschinensteuerung erfolgen.

**[0084]** Weiterhin kann eine thermische Spindelkompensation für eine Mehrzahl von Betriebsdauern der Spindel 104 ermittelt werden anhand der ermittelten Istpositionen der Testflächen aus den mehreren Flächensätzen, z.B. anhand der Istpositionen der Testflächen F11, F21, ... und Fn1 (zweite Gruppe), anhand der Istpositionen der Testflächen F12, F22, ... und Fn2, anhand der Istpositionen der Testflächen F13, F23, ... und Fn3, und/oder anhand der Istpositionen der Testflächen F14, F24, ... und Fn4.

**[0085]** Somit kann anhand der unterschiedlichen Messwerte unter den Flächensätzen die thermische Verlagerung der Spindel 104 ermittelt werden. Durch Vergleich aller Flächensätze kann sogar eine drehzahlabhängige thermische Verlagerung der Spindel 104 bestimmt werden. Die Auswertung kann vorteilhaft und automatisch auf der Maschinensteuerung erfolgen.

**[0086]** Fig. 5 zeigt beispielhaft eine weitere schematische Darstellung einer vorderen Oberfläche eines Testwerkstücks mit herausgearbeiteten Testflächen zum Ermitteln einer Spindelkompensation an einer

Werkzeugmaschine mit werkzeugtragender Spindel gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung.

**[0087]** Zusätzlich zu den Testflächen F11 bis Fn4 gemäß **Fig. 4** sind hierbei weitere Testflächen G1, G2, G3 und G4 auf der oben in X-Richtung weisenden Oberfläche des Werkstücks TS angefräst und weitere Testflächen H1, H2, H3 und H4 auf der rechts in Y-Richtung weisenden Oberfläche des Werkstücks TS angefräst.

**[0088]** Die Testflächen G1 bis G4 sind hierbei analog zu den Testflächen F11 bis Fn4 angefräst, z.B. in Sätzen bei unterschiedlichen Drehzahlen und/oder unterschiedlichen Spindelbetriebsdauern. Alle Testflächen G1 bis G4 werden aus der X-Richtung anfahrhend bei vorgegebener X-Position gefräst und danach analog zu den vorstehend für die Z-Richtung beschriebenen Abtastungsprozessen mittels des Messtasters abgetastet, und durch inkrementellen Vergleich der Istpositionen der Testflächen G1 bis G4 in X-Richtung kann eine vom Betriebszustand abhängende Spindelkompensation in X-Richtung bestimmt werden.

**[0089]** Die Testflächen H1 bis H4 sind hierbei analog zu den Testflächen F11 bis Fn4 und den Testflächen G1 bis G4 angefräst, z.B. in Sätzen bei unterschiedlichen Drehzahlen und/oder unterschiedlichen Spindelbetriebsdauern. Alle Testflächen H1 bis H4 werden aus der Y-Richtung anfahrhend bei vorgegebener Y-Position gefräst und danach analog zu den vorstehend für die Z-Richtung beschriebenen Abtastungsprozessen mittels des Messtasters abgetastet, und durch inkrementellen Vergleich der Istpositionen der Testflächen H1 bis H4 in Y-Richtung kann eine vom Betriebszustand abhängende Spindelkompensation in Y-Richtung bestimmt werden. Sollte der Block des Testwerkstücks schräg eingespannt sein, derart dass die seitlichen Oberflächen nicht senkrecht zu den X- und Y-Achsen stehen sollten, so können die jeweiligen Seiten dennoch auf Basis einer Orientierungsbestimmung des Winkels des Blocks mittels des Abtasters bestimmt werden, und die jeweiligen Seiten können dann mittels Interpolation der X- und Y-Achsen immer noch jeweils senkrecht angefahren werden, und die jeweiligen erhaltenen Spindelkompensationsparameter zu den beiden senkrecht zueinander stehenden Oberflächenseiten können dann über die bekannte Winkelorientierung des Testblocks vektoriell durch Koordinatentransformation zu den jeweiligen Spindelkompensationsparametern in X- und Y-Richtung umgerechnet werden.

**[0090]** **Fig. 6** zeigt beispielhaft eine schematische Perspektivdarstellung eines angetasteten Testwerkstücks mit herausgearbeiteten Testflächen zum Ermitteln einer Spindelkompensation an einer Werkzeugmaschine mit werkstücktragender Spindel

gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung. An einer Werkzeugmaschine mit einer werkstücktragenden Spindel ergeben sich kleinere Unterschiede in der Spindelkompensationsermittlung im Vergleich zu den bisherigen für Werkzeugmaschinen mit werkzeugtragenden Spindeln beschriebenen Verfahren.

**[0091]** Beispielhaft ist in **Fig. 6** ein rotationssymmetrisches Testwerkstück TS gezeigt, wie es in eine werkstücktragende Spindel an einer Werkzeugmaschine (z.B. eine Drehmaschine) eingespannt werden kann, wobei die Rotationsachse des Testwerkstücks TS im eingespannten Zustand vorzugsweise parallel zur Spindelachse verläuft, da die Spindel eine Rotationsbewegung des Testwerkstücks antreibt. Die Z-Achse in **Fig. 6** entspricht somit beispielhaft wieder der Spindelachse.

**[0092]** Im oberen Bildbereich der **Fig. 6** ist eine plane Vorderseite VS des Testwerkstücks TS dargestellt, auf der ringförmige Testflächen R1 bis R7 mit unterschiedlichen Radien herausgearbeitet sind. Hierbei können die ringförmige Testflächen R1 bis R7 mittels eines aus Z-Richtung angefahrenen Schneidwerkzeugs herausgearbeitet werden, und bei angehaltener Spindel können diese ringförmige Testflächen R1 bis R7 jeweils an einer Stelle oder mehreren Stellen aus der Z-Richtung kommend abgetastet werden mittels eines Messtasters, um eine Spindelkompensation in Z-Richtung ermitteln zu können. Werden die ringförmigen Testflächen R1 bis R7 jeweils bei unterschiedlichen Spindeldrehzahlen und/oder Spindelbetriebsdauern herausgearbeitet, kann wieder auf einfache Art und Weise eine betriebsabhängige Spindelkompensation in Z-Richtung ermittelt werden.

**[0093]** Eine Spindelkompensation in einer zur Spindelachse Z senkrecht liegenden Richtung kann dahingegen ermittelt werden, wenn auf dem Testwerkstück TS seitliche ringförmige Testflächen SR1 bis SR6 mittels eines Schneidwerkzeugs herausgearbeitet werden, z.B. die Testflächen SR1 bis SR3 mittels eines aus X-Richtung angefahrenen Schneidwerkzeugs und die Testflächen SR4 bis SR6 mittels eines aus Y-Richtung angefahrenen Schneidwerkzeugs, und werden die jeweiligen Testflächen dann aus der gleichen Richtung kommend abgetastet, d.h. z.B. die Testflächen SR1 bis SR3 mittels eines aus X-Richtung angefahrenen Messtasters und die Testflächen SR4 bis SR6 mittels eines aus Y-Richtung angefahrenen Messtasters, so können wieder jeweilige Spindelkompensationswerte in X- und Y-Richtung ermittelt werden, und durch vektorielle Umrechnung kann auch eine maximale senkrecht zur Spindelrichtung liegende Spindelverlagerung ermittelt werden sowie die Richtung der tatsächlichen Spindelverlagerung.

**[0094]** Zusammenfassend ermöglicht es die vorliegende Erfindung, ein Verfahren bzw. eine Vorrichtung zum Ermitteln einer Spindelkompensation an einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine bereitzustellen, bei der im Vergleich zum aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren einfachere, kostensparende Mittel verwendet werden können. Des Weiteren ermöglicht es die vorliegende Erfindung, ein Verfahren bzw. eine Vorrichtung zum Ermitteln einer Spindelkompensation an einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine bereitzustellen, welche leichter in die Maschinensteuerung der Werkzeugmaschine integrierbar ist und von der Maschinensteuerung vollautomatisch gesteuert werden kann, ohne zusätzliche Verwendung eines angeschlossenen Auswertungscomputers. Des Weiteren ermöglicht es die vorliegende Erfindung, ein Verfahren bzw. eine Vorrichtung zum Ermitteln einer Spindelkompensation an einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine bereitzustellen, welche in einer Serienproduktion effizient angewendet werden kann und auch direkt bei Besitzern der Werkzeugmaschine vor Ort ohne aufwendige Anreise von Spezialpersonal des Maschinenherstellers durchgeführt werden kann.

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Ermitteln einer Spindelkompensation an einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine (100) umfassend eine Spindel (104) zum Aufnehmen eines Werkzeugs (WZ) oder eines Werkstücks und ein Einspannmittel (105) zum Einspannen eines Werkstücks oder eines Werkzeugs (WZ), wobei das Verfahren umfasst:

- Einspannen (S1) eines Testwerkstücks (TS) an dem Einspannmittel (105) oder an der Spindel (104) der Werkzeugmaschine (100),
- Aufnehmen (S4) eines Zerspanwerkzeugs (WZ) an der Spindel (104) oder an dem Einspannmittel (105) der Werkzeugmaschine (100),
- Bearbeiten (S5) des Testwerkstücks (TS) mittels des Zerspanwerkzeugs (WZ) zum Herausarbeiten einer Mehrzahl von Testflächen (F11-Fn4) auf dem Testwerkstück (TS) in Abhängigkeit einer jeweiligen Vorgabeposition in einer ersten Richtung,
- Einwechseln (S6) eines Zerspanwerkzeugs an der Spindel (104) oder an dem Einspannmittel (105) der Werkzeugmaschine (100),
- Ermitteln (S7) einer jeweiligen Istposition in der ersten Richtung für jede der Mehrzahl von herausgearbeiteten Testflächen (F11-Fn4) auf dem Testwerkstück (TS) mittels des Zerspanwerkzeugs, und
- Ermitteln (S8) zumindest eines Spindelkompensationsparameters in der ersten Richtung in Abhängigkeit der ermittelten Istpositionen, wobei die Mehrzahl von Testflächen (F11-Fn4) bei unterschiedlichen Betriebszuständen der Spindel (104) herausgearbeitet werden, und in Abhängigkeit

eines Vergleichs von Vorgabeposition und Istpositionen in der ersten Richtung der herausgearbeiteten Testflächen (F11-Fn4) oder in Abhängigkeit eines Vergleichs der Istpositionen untereinander eine betriebszustandsabhängige Spindelkompensation ermittelt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Richtung die Richtung der Spindelachse (SA) der Spindel (104) ist, oder die erste Richtung quer oder senkrecht zu der Spindelachse (SA) der Spindel (104) orientiert ist.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Schritt des Ermitteln (S8) des zumindest einen Spindelkompensationsparameters auf Grundlage eines Vergleichs der jeweiligen Vorgabeposition und der jeweiligen Istposition in der ersten Richtung für zumindest eine der herausgearbeiteten Testflächen (F11) durchgeführt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Schritt des Ermitteln (S8) des zumindest einen Spindelkompensationsparameters auf Grundlage eines Vergleichs der Istpositionen in der ersten Richtung der herausgearbeiteten Testflächen durchgeführt wird.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Herausarbeiten einer ersten Testfläche (F11) auf dem Testwerkstück (TS) bei einem vorbestimmten Betriebszustand der Spindel (104) durchgeführt wird, und in Abhängigkeit eines Vergleichs von der Vorgabeposition und Istposition in der ersten Richtung der herausgearbeiteten ersten Testfläche (F11) ein von dem vorbestimmten Betriebszustand abhängender Spindelkompensationsparameter ermittelt wird.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass sich unterschiedliche Betriebszustände der Spindel (104) zumindest in einem aus Spindeldrehzahl und Spindelbetriebsdauer unterscheiden.

7. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Bearbeiten des Testwerkstücks (TS) mittels des Zerspanwerkzeugs (WZ) das Herausarbeiten einer ersten Testfläche (F11) in Abhängigkeit der Vorgabeposition in der ersten Richtung und das Herausarbeiten einer zweiten Testfläche (F12) in Abhängigkeit der Vorgabeposition in der ersten Richtung umfasst, wobei die erste und die zweite Testflächen (F11, F12) bei unterschiedlichen Drehzahlen der Spindel (104) herausgearbeitet werden, und das Ermitteln zumindest eines Spindelkompensa-

tionsparameters das Ermitteln eines ersten Spindelkompensationsparameters in Abhängigkeit der Drehzahl der Spindel (104) basierend auf einem Vergleich der ermittelten Istposition in Richtung der Spindelachse der ersten Testfläche (F11) und der ermittelten Istposition in Richtung der Spindelachse der zweiten Testfläche (F12) umfasst.

8. Verfahren nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Mehrzahl von Testflächen (F11, F12, F13, F14) einer ersten Gruppe bei jeweils unterschiedlichen Drehzahlen herausgearbeitet wird, und die Spindelkompensation in Abhängigkeit der Drehzahl der Spindel (104) durch Vergleich der Istpositionen in Richtung der Spindelachse der Testflächen (F11, F12, F13, F14) der ersten Gruppe ermittelt wird.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Bearbeiten des Testwerkstücks (TS) mittels des Zerspanwerkzeugs (WZ) das Herausarbeiten einer ersten Testfläche (F11) in Abhängigkeit der Vorgabeposition in der ersten Richtung und das Herausarbeiten einer dritten Testfläche (F21) in Abhängigkeit der Vorgabeposition in der ersten Richtung umfasst, wobei die erste und die dritte Testflächen (F11, F21) bei unterschiedlichen Betriebsdauern der Spindel herausgearbeitet werden, und das Ermitteln zumindest eines Spindelkompensationsparameters das Ermitteln eines zweiten Spindelkompensationsparameters in Abhängigkeit der Betriebsdauer der Spindel (104) basierend auf einem Vergleich der ermittelten Istposition in der ersten Richtung der ersten Testfläche (F11) und der ermittelten Istposition in der ersten Richtung der dritten Testfläche (F21) umfasst.

10. Verfahren nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Mehrzahl von Testflächen (F11, F21, Fn1) einer zweiten Gruppe bei jeweils unterschiedlichen Betriebsdauern der Spindel (104) herausgearbeitet wird, und die Spindelkompensation in Abhängigkeit der Betriebsdauer der Spindel (104) durch Vergleich der Istpositionen in der ersten Richtung der Testflächen (F11, F21, Fn1) der zweiten Gruppe ermittelt wird.

11. Verfahren nach den Ansprüchen 7 und 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei einer ersten Betriebsdauer der Spindel (104) die erste Testfläche (F11) und die zweite Testfläche (F12) auf dem Testwerkstück (TS) herausgearbeitet werden und bei einer zweiten Betriebsdauer der Spindel (104) die dritte Testfläche (F21) und eine vierte Testfläche (F22) auf dem Testwerkstück (TS) herausgearbeitet werden.

12. Verfahren nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Testfläche (F11) und die dritte Testfläche (F21) bei der gleichen ersten Drehzahl der Spindel (104) herausgearbeitet werden, und die zweite Testfläche (F12) und die vierte Testfläche (F22) bei der gleichen zweiten Drehzahl der Spindel (104) herausgearbeitet werden.

13. Verfahren nach Anspruch 11 oder 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Bearbeiten des Testwerkstücks (TS) in einer Mehrzahl von Bearbeitungssätzen ausgeführt wird, wobei ein erster Bearbeitungssatz das Herausarbeiten der ersten und zweiten Testflächen (F11, F21) umfasst und ein zweiter Bearbeitungssatz das Herausarbeiten der dritten und vierten Testflächen (F21, F22) umfasst.

14. Verfahren nach den Ansprüchen 8 und 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Bearbeiten des Testwerkstücks (TW) in einer Mehrzahl von Bearbeitungssätzen ausgeführt wird, wobei in jedem Bearbeitungssatz Testflächen einer jeweiligen ersten Gruppe mit unterschiedlichen vorbestimmten Drehzahlen bei einer vorbestimmten Betriebsdauer der Spindel (104) herausgearbeitet werden, und für jede einer Mehrzahl von vorbestimmten Betriebsdauern ein jeweiliger Bearbeitungssatz ausgeführt wird, derart, dass eine jeweilige zweite Gruppe von Testflächen einer vorbestimmten Drehzahl jeweils eine Testfläche in jedem Bearbeitungssatz umfasst.

15. Verfahren nach Anspruch 13 oder 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Bearbeitung des Testwerkstücks (TS) in Bearbeitungssätzen ohne Werkzeugwechsel durchgeführt wird und nach Bearbeitung des Testwerkstücks (TS) das Tastwerkzeug an der Spindel (104) eingewechselt wird und alle herausgearbeiteten Testflächen ohne Werkzeugwechsel mittels des Tastwerkzeugs zum Ermitteln der Istpositionen der Tastflächen abgetastet werden.

16. Verfahren nach einem der Ansprüche 13 bis 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Spindel (104) zwischen zwei Bearbeitungssätzen für einen vorbestimmten Zeitraum bei einer vorbestimmten Drehzahl ohne Bearbeitung des Testwerkstücks (TS) betrieben wird, oder dass die Spindel (104) zwischen zwei Bearbeitungssätzen für einen vorbestimmten Zeitraum bei einer Drehzahl gleich Null mit Spindelstillstand betrieben wird.

17. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Testwerkstück (TS) eine ebene Oberflächenseite aufweist, und das Bearbeiten des Testwerkstücks (TS) in einer

Orientierung des Testwerkstücks ausgeführt wird, in der die ebene Oberflächenseite des Testwerkstücks (TS) orthogonal zu einer dritten Richtung ausgerichtet ist.

18. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch

- Ermitteln (S3) einer Nullpunktverschiebung (NPV) des eingespannten Testwerkstücks (TS) mittels des Tastwerkzeugs.

19. Vorrichtung zum Ermitteln einer Spindelkompensation, die dazu eingerichtet ist, ein Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche an einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine (100), die eine Spindel (104) zum Aufnehmen eines Werkzeugs (WS) oder eines Werkstücks und ein Einspannmittel (105) zum Einspannen eines Testwerkstücks (TS) oder eines Werkzeugs umfasst, auszuführen, mit

- einem Werkzeugwechsel-Steuermittel (201) zum Steuern eines Aufnehmens eines Zerspanwerkzeugs (WZ) an der Spindel (104) oder an dem Einspannmittel (105) der Werkzeugmaschine (100) und zum Steuern eines Einwechsels eines Tastwerkzeugs an der Spindel (104) oder an dem Einspannmittel (105),

- einem Bearbeitungs-Steuermittel (202) zum Bearbeiten des Testwerkstücks (TS) mittels des an der Spindel (104) oder an dem Einspannmittel (105) aufgenommenen Zerspanwerkzeugs (WZ) zum Herausarbeiten einer Mehrzahl von Testflächen (F11-Fn4) auf dem Testwerkstück (TS) in Abhängigkeit einer jeweiligen Vorgabeposition in einer ersten Richtung,

- einem Messmittel (203), das dazu eingerichtet ist, eine jeweilige Istposition in der ersten Richtung für jede der Mehrzahl von herausgearbeiteten Testflächen (F11-Fn4) auf dem Testwerkstück (TS) mittels des an der Spindel (104) oder an dem Einspannmittel (105) eingewechselten Tastwerkzeugs zu ermitteln, und

- einem Kompensationsmittel (204), das dazu eingerichtet ist, zumindest einen Spindelkompensationsparameter in Abhängigkeit der ermittelten Istpositionen zu ermitteln;

wobei das Bearbeitungs-Steuermittel (202) dazu eingerichtet ist, die Mehrzahl von Testflächen (F11-Fn4) bei unterschiedlichen Betriebszuständen der Spindel (104) herauszuarbeiten, und

das Kompensationsmittel (204) dazu eingerichtet ist, in Abhängigkeit eines Vergleichs von Vorgabeposition und Istpositionen in der ersten Richtung der herausgearbeiteten Testflächen (F11-Fn4) oder in Abhängigkeit eines Vergleichs der Istpositionen untereinander eine betriebszustandsabhängige Spindelkompensation zu ermitteln.

20. Numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine umfassend

- eine Spindel (104) zum Aufnehmen eines Werkzeugs (WZ),  
- ein Einspannmittel (105) zum Einspannen eines Werkstücks (TS), und  
- eine Vorrichtung (200) zum Ermitteln einer Spindelkompensation an der Werkzeugmaschine (100) gemäß Anspruch 19.

21. Numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine umfassend

- eine Spindel (104) zum Aufnehmen eines Werkstücks (TS),  
- ein Einspannmittel (105) zum Einspannen eines Werkzeugs (WZ), und  
- eine Vorrichtung (200) zum Ermitteln einer Spindelkompensation an der Werkzeugmaschine (100) gemäß Anspruch 19.

22. Computerprogrammprodukt mit Programmmitteln, die auf einem Datenträger gespeichert sind, und die dazu eingerichtet sind, auf einer Steuervorrichtung (200) einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine (100) umfassend eine Spindel (104) zum Aufnehmen eines Werkzeugs (WZ) oder Werkstücks und ein Einspannmittel (105) zum Einspannen eines Werkstücks (TS) oder Werkzeugs (WZ) ausgeführt zu werden, derart, dass ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 18 an der Werkzeugmaschine (100) ausgeführt wird.

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1

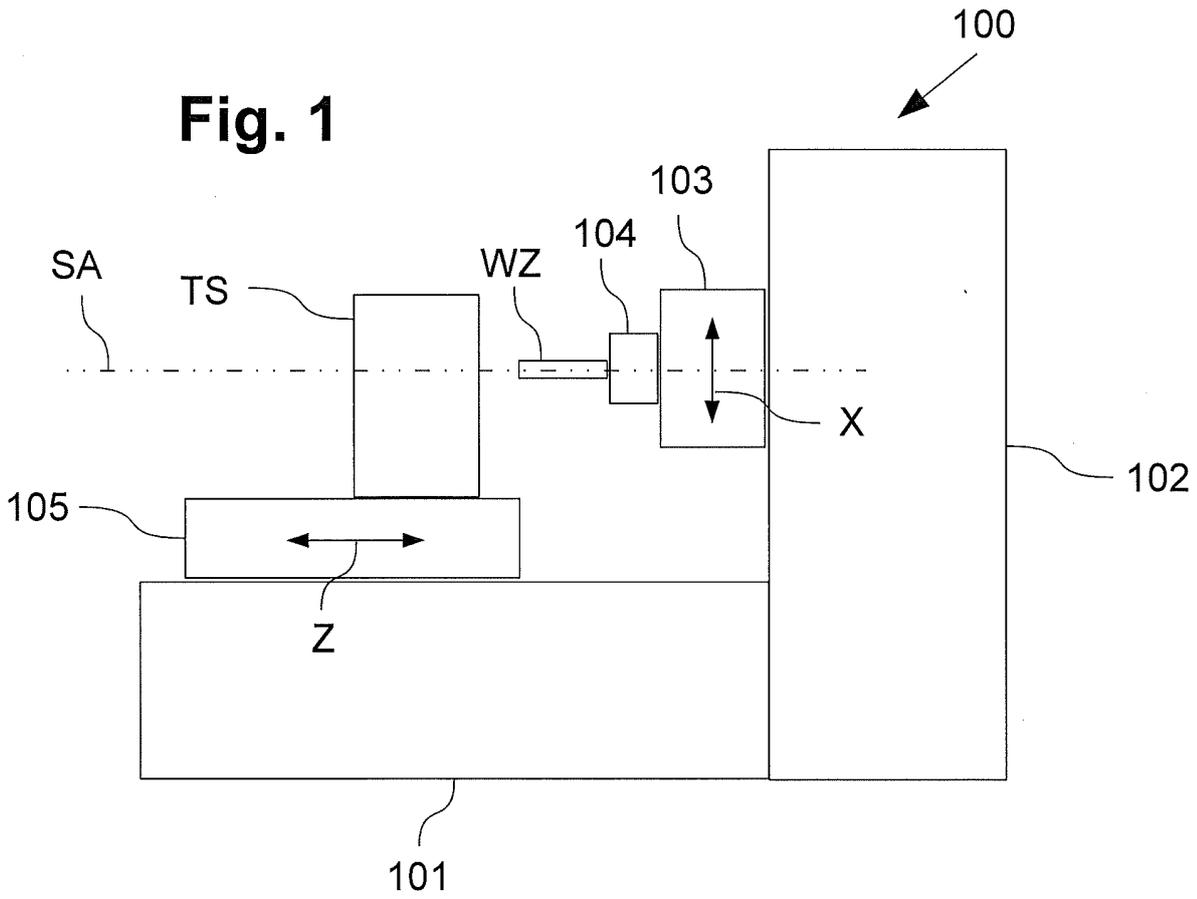
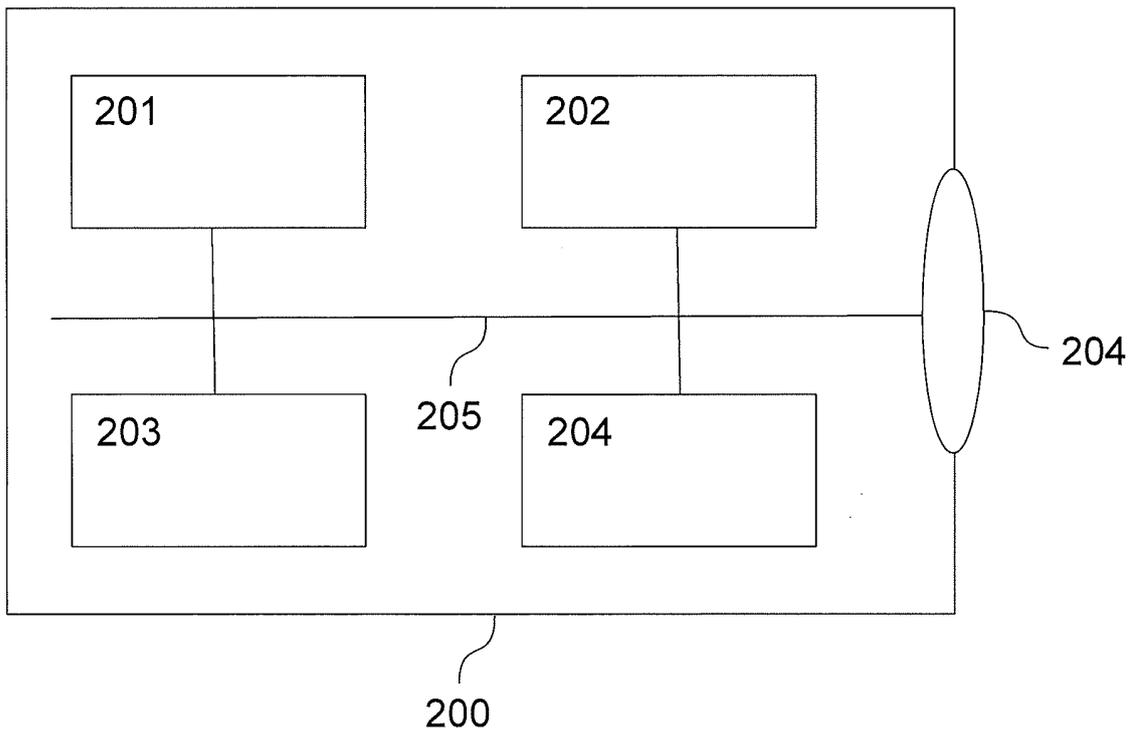
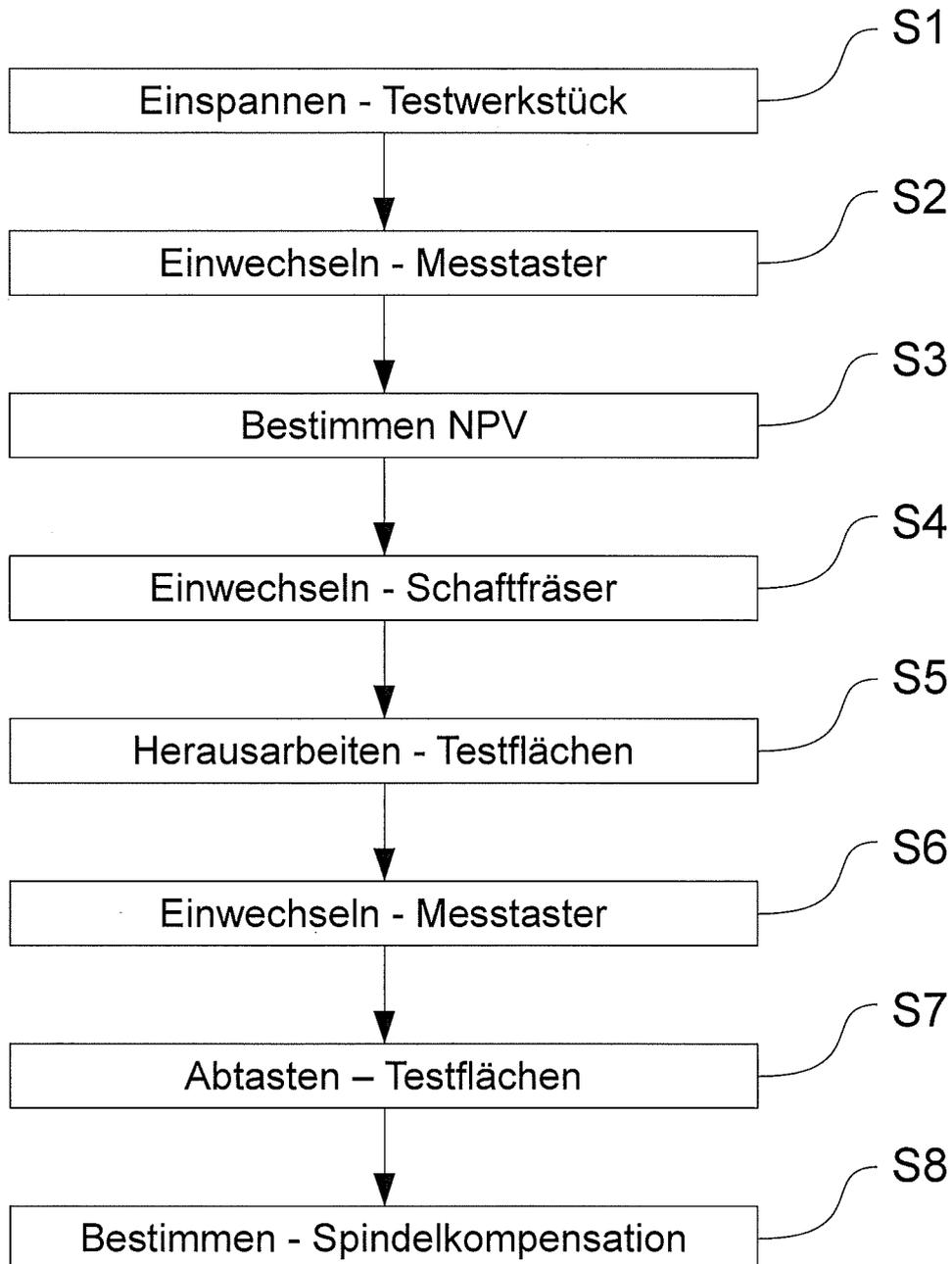


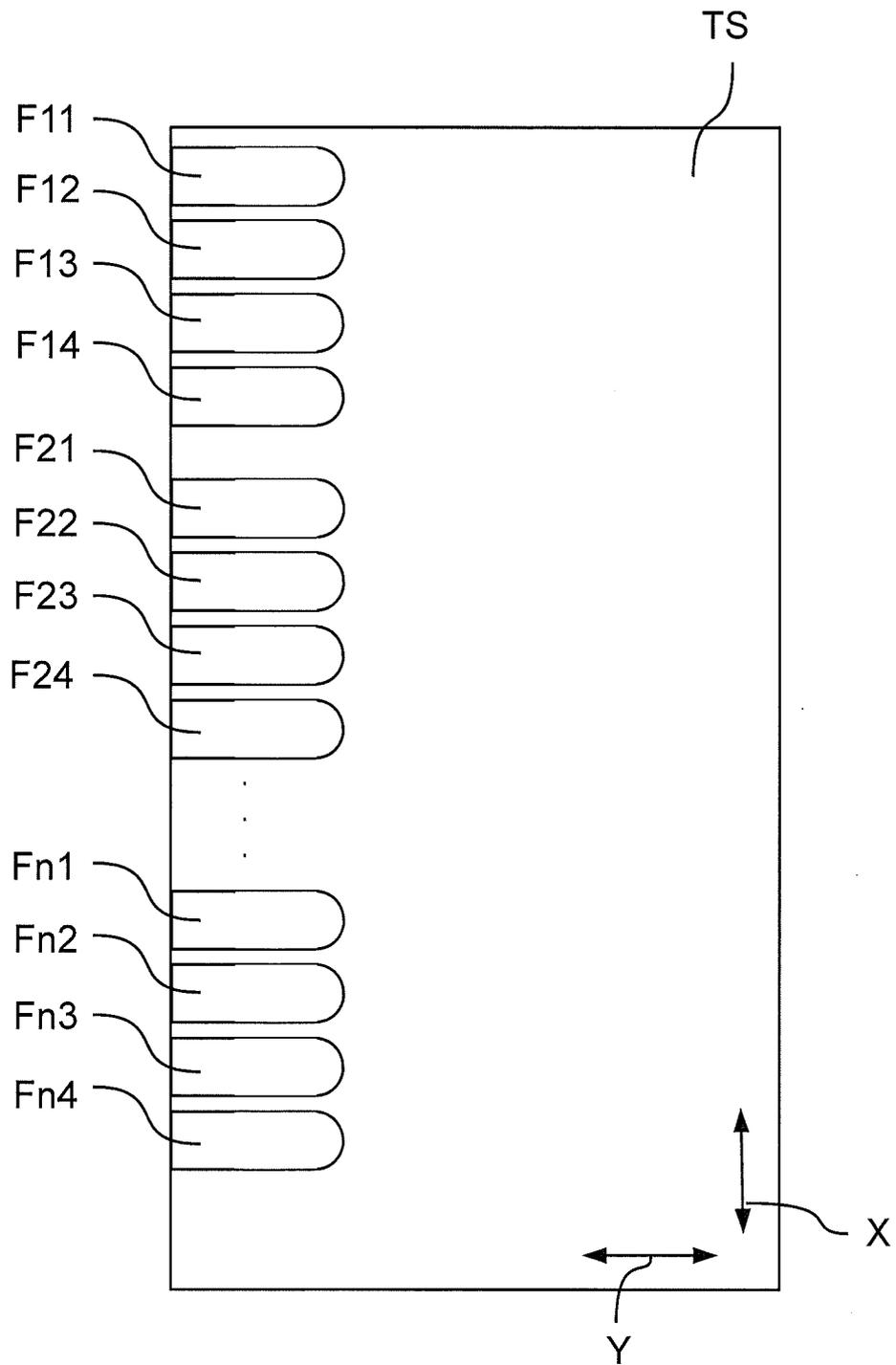
Fig. 2



**Fig. 3**



**Fig. 4**



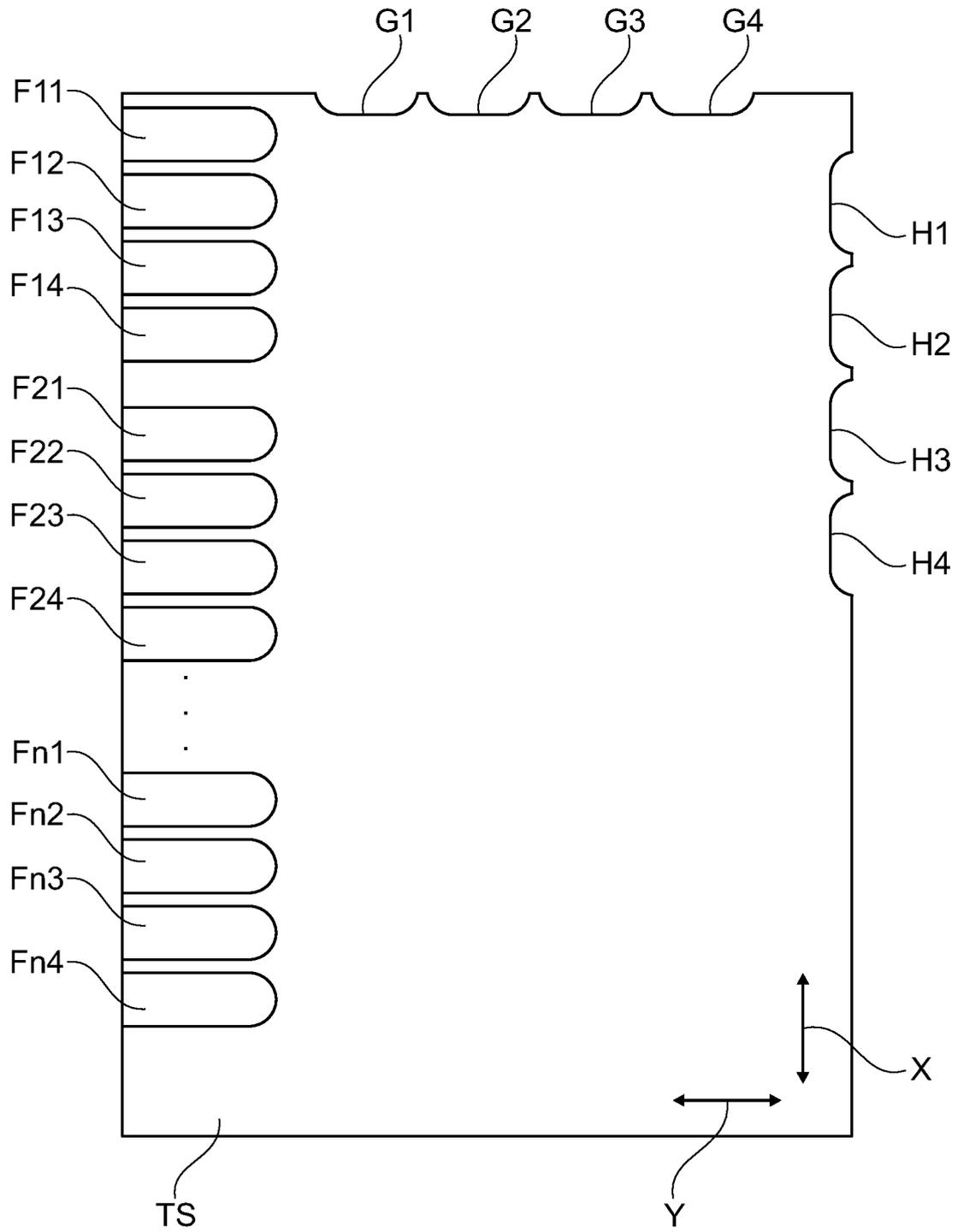


Fig. 5

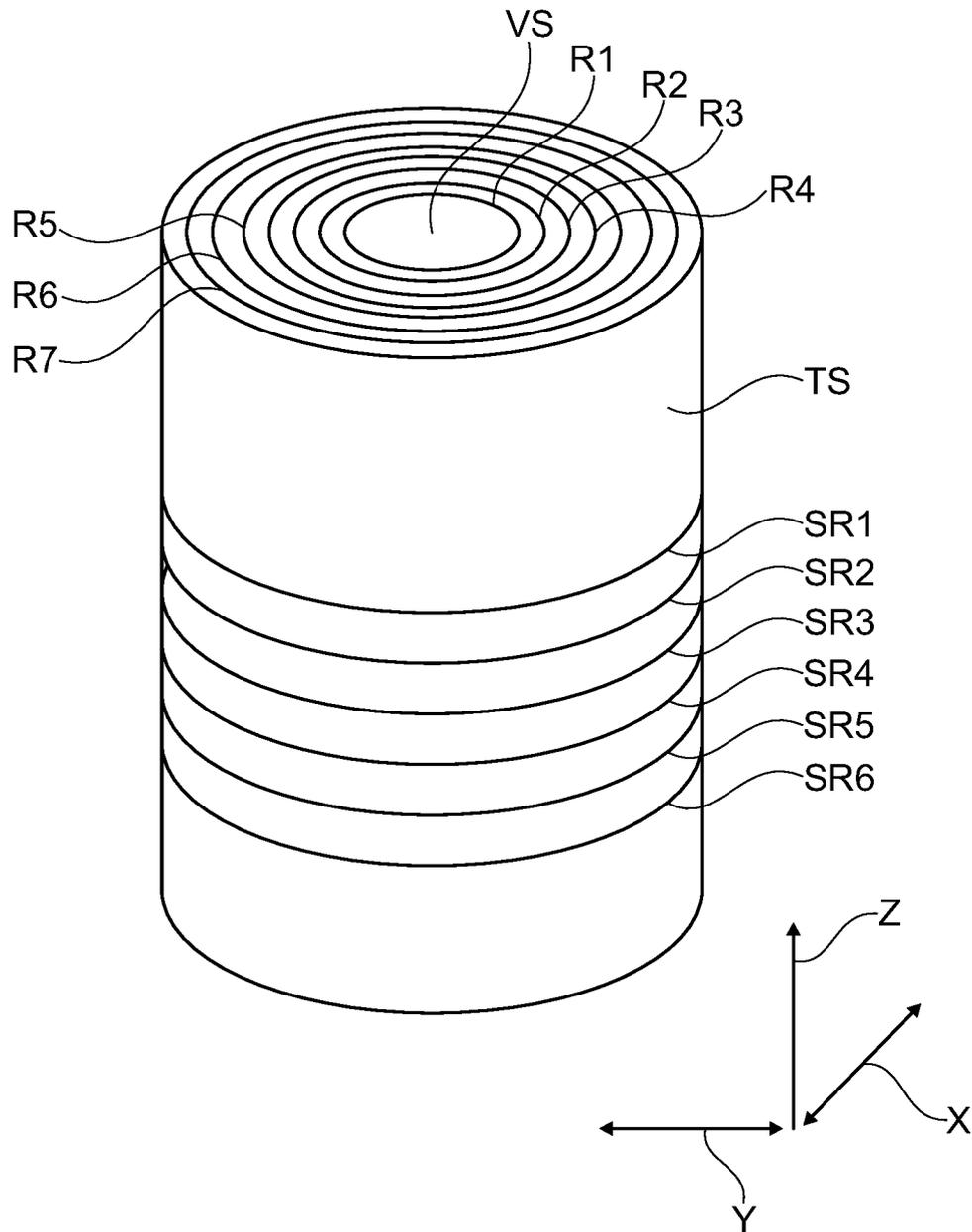


Fig. 6