

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges
Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales
Veröffentlichungsdatum
15. August 2013 (15.08.2013)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2013/117558 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
G05B 19/401 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2013/052263

(22) Internationales Anmeldedatum:
6. Februar 2013 (06.02.2013)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2012 201 732.1
6. Februar 2012 (06.02.2012) DE

(71) Anmelder: **DECKEL MAHO PFRONTEN GMBH**
[DE/DE]; Deckel Maho Straße 1, 87459 Pfronten (DE).

(72) Erfinder: **MAIER, Marzell**; Heslerhof 1, 88316
Isny/Sommersbach (DE). **NEUMAIER, Josef**; Bachweg 5,
87459 Pfronten (DE). **LOCHBIHLER, Thomas**; Lüsweg
2c, A-6682 Vils (AT).

(74) Anwalt: **MERH-IP MATIAS ERNY REICHL
HOFFMANN**; Paul-Heyse-Str. 29, 80336 Munich (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,

AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW,
BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP,
KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD,
ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI,
NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU,
RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ,
TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA,
ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,
GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ,
TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ,
RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY,
CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT,
LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE,
SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA,
GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz
3)

(54) Title: NUMERICALLY CONTROLLED MACHINE TOOL AND METHOD FOR CONTROLLING AN AUTOMATIC
ROTATORY ALIGNING PROCESS OF A GEAR WHEEL ON THE MACHINE TOOL

(54) Bezeichnung : NUMERISCH GESTEUERTE WERKZEUGMASCHINE UND VERFAHREN ZUM STEuern EINES
AUTOMATISCHEN ROTATORISCHEN AUSRICHTVORGANGS EINES ZAHNRADS AN DER WERKZEUGMASCHINE

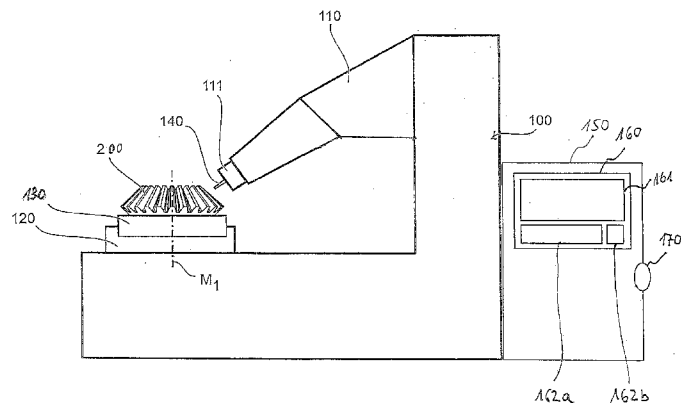


FIG. 1

(57) Abstract: The present invention relates to a numerically controlled machine tool (100) comprising at least 5 axes for machining a workpiece (200) clamped on a clamping means of the machine tool (100) by means of a tool mounted on a machining spindle (111) of the machine tool (100), comprising a numerical machine control device (150), which is set up to control the tool mounted on the machining spindle (111) of the machine tool (100) relative to the workpiece (200) clamped on the clamping means (130) of the machine tool on the basis of numerical control data, wherein the machine control device (150) is also set up to control an automatic rotatory aligning process for determining a rotatory zero point shift for a final machining of a gear wheel (200) clamped on the clamping means (130), and a method for controlling such an automatic rotatory aligning process on the machine tool (100).

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



WO 2013/117558 A1



Die vorliegende Erfindung betrifft eine numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine (100) mit zumindest 5-Achsen zur zerspanenden Bearbeitung eines an einem Einspannmittel der Werkzeugmaschine (100) eingespannten Werkstücks (200) mittels eines an einer Arbeitsspindel (111) der Werkzeugmaschine (100) aufgenommenen Werkzeugs, umfassend eine numerische Maschinensteuerungseinrichtung (150), die dazu eingerichtet ist, das an der Arbeitsspindel (111) der Werkzeugmaschine (100) aufgenommene Werkzeug relativ zu dem an dem Einspannmittel (130) der Werkzeugmaschine eingespannten Werkstück (200) auf Grundlage numerischer Steuerdaten zu steuern, wobei die Maschinensteuerungseinrichtung (150) weiterhin dazu eingerichtet ist, einen automatischen rotatorischen Ausrichtvorgang zur Bestimmung einer rotatorischen Nullpunktverschiebung für eine Endbearbeitung eines an dem Einspannmittel (130) eingespannten Zahnrads (200) zu steuern, und ein Verfahren zum Steuern eines derartigen automatischen rotatorischen Ausrichtvorgangs an der Werkzeugmaschine (100).

Numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine und Verfahren zum Steuern eines automatischen rotatorischen Ausrichtvorgangs eines Zahnrads an der Werkzeugmaschine

5

Beschreibung

Die vorliegende Erfindung betrifft eine numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine mit zumindest 4-Achsen und vorzugsweise 5-Achsen zur zerspanenden Bearbeitung, insbesondere Fräsbearbeitung, eines an einem Einspannmittel der Werkzeugmaschine eingespannten Zahnrads mittels eines an einer Arbeitsspindel der Werkzeugmaschine aufgenommenen Werkzeugs. Die Werkzeugmaschine umfasst eine numerische Maschinensteuerungseinrichtung, die dazu eingerichtet ist, das an der Arbeitsspindel der Werkzeugmaschine aufgenommene Werkzeug relativ zu dem an dem Einspannmittel der Werkzeugmaschine eingespannten Zahnrad (z.B. Stirnrad, Tellerrad bzw. Kegelrad) auf Grundlage numerischer Steuerdaten zu steuern. Insbesondere betrifft die vorliegende Erfindung eine funktionelle Erweiterung von Standardwerkzeugmaschinen, wie z.B. Fräs-Werkzeugmaschinen, Fräs-/Bohrwerkzeugmaschinen, Universal-Werkzeugmaschinen und Bearbeitungszentren.

20

Hintergrund der Erfindung

Aus der DE 10 2009 008 124 A1 ist ein Verfahren bekannt, Zahnräder, wie z.B. Stirnräder, Kegelräder und Tellerräder mit beliebiger Verzahnungsform (z.B. geradverzahnt, schrägverzahnt, bogenverzahnt oder spiralverzahnt, usw.) und mit beliebigen Zahnprofilen (z.B. Evolventenprofil, Zykloidenprofil, usw.) an numerisch gesteuerten CNC-Standard-Werkzeugmaschinen mittels Standardfräswerkzeugen herzustellen.

Bei einem derartigen Verfahren wird das Zahnrad in mehreren Schritten hergestellt, wobei zunächst in einer Weichbearbeitung ein vorgefrästes Zahnrad an der Standard-CNC-Werkzeugmaschine (im Gegensatz zu früheren Verfahren unter Verwendung von Spezial-Verzahnungsmaschinen) mit einer vorgegebenen Verzahnungsform aus einem Rohteil hergestellt wird. Nach der Weichbearbeitung wird das vorgefräste Zahnrad aus der Werkzeugmaschine ausgespannt und zum Härten zumindest einer Oberflächenschicht des vorgefrästen Zahnrads einer materialhärtenden Wärmebehandlung unterzogen. Nach dieser Wärmebehandlung wird das vorgefräste, gehärtete Zahnrad erneut an dem Einspannmittel der CNC-Standard-5-Achs-Werkzeugmaschine eingespannt, um einer abschließenden Endbearbeitung bzw. Hartbearbeitung unterzogen zu werden.

Hierbei ist es herkömmlich bekannt, dass nach Einspannen des vorgefrästen, gehärteten Zahnrads vor Beginn der abschließenden Endbearbeitung bzw. Hartbearbeitung an der Werkzeugmaschine ein Werkzeugmaschinenkoordinatensystem mit dem Werkstückkoordinatensystem des eingespannten Werkstücks abgeglichen werden muss, da die numerischen Steuerdaten (z.B. ein oder mehrere NC-Programme) zum Steuern der Endbearbeitung bzw. Hartbearbeitung auf Grundlage des Werkstückkoordinatensystems erstellt sind und Verfahrbefehle für Linear- und Rundachsen der Werkzeugmaschine enthalten, die von der Werkzeugmaschine nur auf Grundlage des Werkzeugmaschinenkoordinatensystems umgesetzt werden können. Hierbei spricht man von einer sog. Nullpunktverschiebung, bei der eine Abweichung zwischen dem Koordinatennullpunkt des Werkzeugmaschinenkoordinatensystems und dem Koordinatennullpunkt des Werkstückkoordinatensystems ermittelt wird, und diese Abweichung dann bei Abarbeitung der numerischen Steuerdaten für die Endbearbeitung bzw. Hartbearbeitung numerisch berücksichtigt wird.

Bei rotationssymmetrischen Werkstücken, wie z.B. vorgefrästen Zahnrädern, insbesondere Stirnrädern, Kegelrädern und auch Tellerrädern, ist es hierbei nach Einspannen des Werkstücks vor Beginn der Endbearbeitung insbesondere erforderlich, eine rotatorische Nullpunktverschiebung zu ermitteln. Bei einer Werkzeugmaschine, bei der das rotationssymmetrische Werkstück z.B. auf einem Drehtisch eingespannt ist, welcher mittels einer Rundachse der Werkzeugmaschine drehbar gesteuert werden kann, ist es insbesondere erforderlich, eine rotatorische Nullpunktverschiebung zwischen dem Nullpunkt der den Drehtisch steuernden Rundachse und dem rotatorischen Nullpunkt des eingespannten Werkstücks zu bestimmen.

Herkömmlich wird bei einem derartigen Ausrichtvorgang das vorgefräste, gehärtete Zahnrad zuerst auf Grundlage einer Positionsbestimmung der Mittelbohrung translatorisch ausgerichtet und danach in einem rotatorischen Ausrichtvorgang auf Grundlage eines Abtastvorgangs mittels eines Messtasters der Werkzeugmaschine oder auch mittels Positionsbestimmung einer außermittigen Positionsbohrung auf der Stirnseite des Zahnrads rotatorisch ausgerichtet. Im Anschluss kann das eingespannte und ausgerichtete Zahnrad auf Basis der ermittelten Nullpunktverschiebungen, ggf. translatorisch sowie rotatorisch, endbearbeitet werden. Bei der Ausrichtmethode mittels eines Messtasters werden herkömmlich zwei gegenüberliegende Zahnflanken eines Zahns oder einer Zahnücke jeweils einmalig abgetastet, um eine rotatorische Ausrichtung des eingespannten Zahnrads zu ermitteln.

Bei einem ausreichenden Aufmaß auf den Zahnflanken nach der Weichbearbeitung, einer ausreichenden Einhärtetiefe und einem geringen nach der Wärmebehandlung auftretenden

Wärmeverzug ist der vorstehend beschriebene Ausrichtvorgang zur Bestimmung einer rotatorischen Nullpunktverschiebung gerade bei kleineren Zahnrädern zumeist ausreichend.

Jedoch ermöglichen es die neuartigen Verfahren, in denen Zahnräder, wie z.B. Stirnräder, 5 Kegelräder und Tellerräder mit beliebiger Verzahnungsform an numerisch gesteuerten CNC-Standard-5-Achs-Werkzeugmaschinen mittels Standardfräs Werkzeugen hergestellt werden, an großen 5-Achs-Werkzeugmaschinen bzw. Bearbeitungszentren sehr große, teilweise einzelfertigte Zahnräder mit Durchmessern bis zu über einem Meter oder mehr herzustellen, bei denen ein ungewöhnlich großer Wärmeverzug an den Zahnflanken nach der 10 Wärmebehandlung auftreten kann. Hierbei tritt der größte Wärmeverzug meist an den Stellen auf, die die geringste Materialanhäufung und den größten Abstand zum Zahnradgrundkörper aufweisen, d.h. bei Zahnrädern also zumeist am Zahnkopf, so dass die Zähne quasi verbogen sind. Hierbei können sich gegenüberliegende Zahnflanken, d.h. linke und rechte Zahnflanken, durch die Wärmebehandlung ggf. vollkommen unterschiedlich verziehen bzw. verformen und 15 gegebenenfalls sogar in unterschiedliche Richtungen verziehen.

Werden insbesondere sehr große Zahnräder, wie sie z.B. für Schiffsgetriebe verwendet werden, mittels der vorstehend beschriebenen herkömmlichen Verfahren vor der Endbearbeitung rotatorisch ausgerichtet, kann der Verzug der Zahnflanken bzw. deren Verformung so groß sein, 20 dass bei der Endbearbeitung an manchen Stellen der Zahnflanken der Materialabtrag zu gering ist und ggf. sogar Stellen auf Zahnflanken auftreten können, an denen bei der Endbearbeitung kein Material abgetragen wird, so dass ein späteres unvorteilhaftes Rollverhalten des Zahnrads auftreten kann. Weiterhin kann auch an anderen Stellen der Zahnflanken ein Verzug der Zahnflanken so groß sein, dass an diesen Stellen zu viel Material abgetragen wird, wobei an 25 diesen Stellen ggf. beim Abtragen von Material die in der Wärmebehandlung gehärtete Einhärtetiefe überschritten wird und somit unvorteilhafte weiche bzw. nicht-gehärtete Stellen auf der Oberfläche der endbearbeiteten Zahnflanken auftreten können, wodurch die Verschleißanfälligkeit des Zahnrads signifikant reduziert wird.

Im Hinblick auf die vorstehend beschriebenen Probleme der aus dem Stand der Technik bekannten Ausrichtverfahren zum Bestimmen einer rotatorischen Nullpunktverschiebung ist es eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, einen verbesserten Ausrichtvorgang für 30 weichbearbeitete und einer Wärmebehandlung unterzogene Zahnräder an einer Werkzeugmaschine bereitzustellen, bei dem die vorstehend beschriebenen Nachteile vermieden werden können, und bei dem die rotatorische Nullpunktverschiebung insbesondere bei sehr großen Zahnrädern mit Durchmessern von bis zu über einem Meter immer noch vorteilhafte 35 Ergebnisse liefern kann, so dass bei der Endbearbeitung vermieden werden kann, dass an Zahnflanken Stellen auftreten, an denen zu viel und/oder zu wenig Material abgetragen wird.

Zusammenfassung der Erfindung

Zur Lösung der Aufgabe der vorliegenden Erfindung werden eine numerisch gesteuerte
5 Werkzeugmaschine nach Anspruch 1, ein Verfahren zum Steuern eines automatischen
rotatorischen Ausrichtvorgangs an einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine nach
Anspruch 16 und ein Computerprogrammprodukt nach Anspruch 17 vorgeschlagen. Abhängige
Ansprüche betreffen bevorzugte Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung.

10 Gemäß einem ersten Aspekt der Erfindung wird eine numerisch gesteuerte
Werkzeugmaschine mit zumindest 5-Achsen zur zerspanenden Bearbeitung, insbesondere
Fräsbearbeitung, eines an einem Einspannmittel der Werkzeugmaschine eingespannten
Werkstücks mittels eines an einer Arbeitsspindel der Werkzeugmaschine aufgenommenen
Werkzeugs vorgeschlagen. Die Werkzeugmaschine umfasst bevorzugt eine numerische
15 Maschinensteuerungseinrichtung, die dazu eingerichtet ist, das an der Arbeitsspindel der
Werkzeugmaschine aufgenommene Werkzeug relativ zu dem an dem Einspannmittel der
Werkzeugmaschine eingespannten Werkstück auf Grundlage numerischer Steuerdaten zu
steuern.

20 Erfindungsgemäß ist die Maschinensteuerungseinrichtung der Werkzeugmaschine dazu
eingerrichtet, einen automatischen rotatorischen Ausrichtvorgang zur numerischen Bestimmung
einer rotatorischen Nullpunktverschiebung für eine Endbearbeitung eines an dem Einspannmittel
eingespannten Zahnrads zu steuern. Unter einer „rotatorischen Nullpunktverschiebung“ wird
hierbei insbesondere ein numerischer Wert (bevorzugt insbesondere ein Winkelwert) einer zu
25 ermittelnden Rundachsverdrehung verstanden (insbesondere gemäß einem rotatorischen
Freiheitsgrad), die für die spätere Endbearbeitung erforderlich ist, um einen Koordinaten- bzw.
Winkel-Nullpunkt der Rundachse(n) im Werkzeugmaschinenkoordinatensystem mit einem
rotatorischen Koordinaten-bzw. Winkelnullpunkt des eingespannten Zahnrads im
Werkstückkoordinatensystem abzugleichen, wobei das Werkstückkoordinatensystem beim
30 Erstellen bzw. Erzeugen von numerischen Steuerdaten wie z.B. einem NC-Programm zu Grunde
gelegt werden, die Rundachse(n) jedoch mittels Befehlen der numerischen Steuerdaten wie z.B.
einem NC-Programm unter Bezugnahme auf das Werkzeugmaschinenkoordinatensystem
angesteuert werden.

35 In diesem automatischen rotatorischen Ausrichtvorgang ermittelt bzw. misst
erfindungsgemäß ein von der Maschinensteuerungseinrichtung gesteuertes Messtastmittel bei
einer Mehrzahl von Zahnflanken des Zahnrads an einer Mehrzahl von vorgegebenen
Tastpositionen auf jeder der Zahnflanken eine jeweilige Istposition, vergleicht die

Maschinensteuerungseinrichtung für jede der vorgegebenen Tastpositionen die ermittelte Istposition mit einer jeweiligen vorgegebenen Sollposition und ermittelt bzw. berechnet für jede Tastposition eine Soll-Ist-Abweichung auf Grundlage des Vergleichs, und die Maschinensteuerungseinrichtung ermittelt bzw. berechnet auf Grundlage der bestimmten Soll-Ist-
5 Abweichungen zumindest eine rotatorische Nullpunktverschiebung für die Endbearbeitung des an dem Einspannmittel eingespannten Zahnrads.

Hierbei liegt der Erfindung die Grundüberlegung zu Grunde, dass sich verschiedene Stellen der Zahnflanken des Zahnrads sich aufgrund der Wärmebehandlung im Aushärtevorgang
10 über die Zahnflanke verteilt unterschiedlich verziehen können, und auch verschiedene Zahnflanken sich über das Zahnrad verteilt unterschiedlich verziehen können. Um diese Verzugs Effekte verbessert durch die zu bestimmende rotatorische Nullpunktverschiebung ausgleichen zu können, wird die Bestimmung der rotatorischen Nullpunktverschiebung gemäß
15 der Erfindung durch eine Mehrzahl von Soll-Ist-Positionsvergleichen mittels eines Messtastmittels an einer Mehrzahl von Zahnflanken ausgeführt, um die Effekte des unterschiedlichen Verzugs verschiedener Zahnflanken verbessert ausgleichen zu können, und auf jeder dieser Zahnflanken jeweils an mehreren Tastpositionen, um die Effekte des unterschiedlichen Verzugs an verschiedenen Stellen der jeweiligen Zahnflanken verbessert ausgleichen zu können.

20 Nach dem Ermitteln der Soll-Ist-Abweichungen an einer Mehrzahl von Tastpositionen, die erfindungsgemäß sowohl auf einer Mehrzahl von Zahnflanken des Zahnrads und zudem auf jeder der Zahnflanken an verschiedenen Stellen angeordnet sind, werden die Mehrzahl von ermittelten Soll-Ist-Abweichungen zur Bestimmung einer rotatorischen Nullpunktverschiebung ausgewertet.

25 Bei der Ermittlung der rotatorischen Nullpunktverschiebung gemäß der Erfindung auf Grundlage eines Soll-Ist-Positionsvergleichs an einer Mehrzahl von Tastpositionen, die auf einer Mehrzahl von Zahnflanken des Zahnrads und auf jeder dieser Zahnflanken an einer Mehrzahl von verschiedenen Positionen angeordnet sind, können sowohl die möglicherweise verschieden auftretenden Verzüge an verschiedenen Stellen einer jeweiligen Zahnflanke als auch die
30 möglicherweise verschieden auftretenden Verzüge an verschiedenen Zahnflanken verbessert ausgeglichen werden.

Demzufolge ist es durch die vorliegende Erfindung verbessert ermöglicht, eine rotatorische Nullpunktverschiebung für die Endbearbeitung des Zahnrads zu bestimmen, bei der
35 gleichzeitig sowohl das Auftreten von Stellen auf Zahnflanken mit zu viel Materialabtrag und dem daraus möglicherweise folgenden Auftreten von weichen Stellen auf Zahnflanken, die zu erhöhter Verschleißanfälligkeit des Zahnrads führen, als auch das Auftreten von Stellen auf Zahnflanken mit zu wenig bzw. keinem Materialabtrag und dem daraus möglicherweise folgenden Auftreten

eines verschlechterten Rollverhaltens des Zahnrads zu vermeiden oder zumindest signifikant zu reduzieren.

Für die Bestimmung der rotatorischen Nullpunktverschiebung kann die rotatorische
5 Nullpunktverschiebung zum Beispiel gemäß einem besonders zweckmäßigen Beispiel auf
einfache Weise derart ermittelt bzw. berechnet werden, dass in einer Simulation durch Variation
der rotatorischen Nullpunktverschiebung überprüft wird, welche rotatorische
Nullpunktverschiebung mindestens erforderlich ist, um alle Soll-Ist-Abweichungen größer oder
gleich Null werden zu lassen.

10

Hierbei ist zu beachten, dass die Werte der einzelnen Soll-Ist-Abweichungen sowohl
positive als auch negative Werte annehmen können. Hierbei bedeuten positive Werte gemäß
einer gewählten Definition, dass die Zahnflanke an der jeweiligen Tastposition vom Zahn weg
verzogen ist, und negative Werte bedeuten, dass die Zahnflanke an der jeweiligen Tastposition
15 zum Zahn hin verzogen ist. Sobald bei einer derartigen Definition eine rotatorische
Nullpunktverschiebung ermittelt werden kann, bei der alle Soll-Ist-Abweichungen größer oder
gleich Null werden, ist es möglich, bei Einstellung dieser ermittelten rotatorischen
Nullpunktverschiebung und unter Berücksichtigung dieser ermittelten rotatorischen
Nullpunktverschiebung bei der folgenden Endbearbeitung an allen Tastpositionen derart zu
20 bearbeiten, dass nicht zu wenig Material abgetragen wird.

Insbesondere ist es zum Beispiel möglich auf besonders einfache Weise zu ermitteln,
welche Nullpunktverschiebung erforderlich ist, um die kleinste der ermittelten Soll-Ist-
Abweichungen größer oder gleich Null werden zu lassen, und diesen Wert als die ermittelte
25 rotatorische Nullpunktverschiebung zu erfassen.

Wahlweise zu den vorstehenden Aspekten ist es bevorzugt auch möglich, zusätzlich ein
Mindestaufmaß vorzugeben, wobei die rotatorische Nullpunktverschiebung dann derart ermittelt
werden kann, dass in einer Simulation durch Variation der rotatorischen Nullpunktverschiebung
30 überprüft wird, welche rotatorische Nullpunktverschiebung mindestens erforderlich ist, um alle
Soll-Ist-Abweichungen größer oder gleich des vorgegebenen Mindestaufmaßes werden zu lassen.
Insbesondere ist es zum Beispiel bevorzugt möglich auf besonders einfache Weise zu ermitteln,
welche Nullpunktverschiebung erforderlich ist, um die kleinste der ermittelten Soll-Ist-
Abweichungen größer oder gleich des vorgegebenen Aufmaßes werden zu lassen, und diesen
35 Wert als die ermittelte rotatorische Nullpunktverschiebung zu erfassen.

Bei den vorstehend beschriebenen Ausführungsbeispielen zur Ermittlung der
rotatorischen Nullpunktverschiebung ist es zu berücksichtigen, dass eine rotatorische

Nullpunktverschiebung bei der vorstehend genannten Definition der Vorzeichen der Soll-Ist-Abweichungen die Soll-Ist-Abweichungen auf rechten Flanken verkleinert, während sie die Soll-Ist-Abweichungen auf linken Flanken vergrößert, bzw. die Soll-Ist-Abweichungen auf rechten Flanken vergrößert, während sie die Soll-Ist-Abweichungen auf linken Flanken verkleinert. Falls es nicht
5 möglich ist, rechte und linke Zahnflanken mittels der gleichen rotatorischen Nullpunktverschiebung einzustellen, ist es in weiteren Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung vorgesehen, rechte und linke Flanken getrennt voneinander auszuwerten und getrennte rotatorische Nullpunktverschiebungen zu ermitteln. Dies wird später noch detaillierter beschrieben.

10

Für die Bestimmung der rotatorischen Nullpunktverschiebung kann die rotatorische Nullpunktverschiebung zum Beispiel gemäß weiteren zweckmäßigen Ausführungsbeispielen als Fit-Wert bzw. Best-Fit-Wert mittels einer mathematischen Ausgleichsrechnung ermittelt bzw. errechnet werden.

15

Zur Bestimmung eines Fit-Werts bzw. Best-Fit-Werts kann hierbei vorzugsweise ein Distanzwert auf Grundlage der ermittelten Soll-Ist-Abweichungen errechnet werden, wobei der Distanzwert vorzugsweise einen die Größe der Gesamtabweichung unter Berücksichtigung aller ermittelten Soll-Ist-Abweichungen beschreibenden Wert darstellt. In dem mathematischen
20 Ausgleichsverfahren wird dann vorzugsweise durch Variation der rotatorischen Nullpunktverschiebung automatisch dieser Distanzwert minimiert, und der Wert der rotatorischen Nullpunktverschiebung bei minimiertem Distanzwert ergibt dann im Rahmen dieser mathematischen Ausgleichsrechnung die ermittelte rotatorische Nullpunktverschiebung zur Verwendung bei der späteren Endbearbeitung des Zahnrads.

25

Hierbei ist zu beachten, dass die Werte der einzelnen Soll-Ist-Abweichungen sowohl positive als auch negative Werte annehmen können. Hierbei bedeuten vorzugsweise positive Werte gemäß einer gewählten Definition, dass die Zahnflanke an der jeweiligen Tastposition vom Zahn weg verzogen ist, und negative Werte bedeuten vorzugsweise, dass die Zahnflanke an der
30 jeweiligen Tastposition zum Zahn hin verzogen ist. Aus diesem Grunde sollte der Distanzwert als Funktion der Soll-Ist-Abweichungen vorzugsweise derart gewählt werden, dass er als Funktion der Beträge der Soll-Ist-Abweichungen oder bevorzugt als Funktion der Quadrate der Soll-Ist-Abweichungen beschrieben werden kann. Weiterhin sollte der Distanzwert als Funktion der Soll-Ist-Abweichungen vorzugsweise derart gewählt werden, dass der Wert des Distanzwerts streng
35 monoton steigt mit dem Betrag oder bevorzugt mit dem Quadrat jeder einzelnen Soll-Ist-Abweichung. Zweckmäßigerweise könnte der Distanzwert als streng monoton steigende Funktion der Summe der Beträge aller Soll-Ist-Abweichungen oder bevorzugt als streng monoton steigende Funktion der Summe der Quadrate aller Soll-Ist-Abweichungen definiert werden. Bei Verwendung

von mathematischen Ausgleichsrechnungen ist es weiterhin bevorzugt, dass noch eine weitere zusätzliche Überprüfung durchgeführt wird, ob an allen Tastpositionen nach rotatorischer Nullpunktverschiebung entsprechend dem in der Ausgleichsrechnung ermittelten Wert wirklich positive Werte für die Soll-Ist-Abweichungen erreicht werden können (bzw. gemäß weiteren Ausführungen Werte größer oder gleich eines vorgegebenen Aufmaßes). Falls dies nicht der Fall ist, kann der Wert der ermittelten rotatorischen Nullpunktverschiebung entsprechend korrigiert werden (ggf. für linke und rechte Zahnflanken getrennt voneinander), bis an allen Tastpositionen positive Soll-Ist-Abweichungen bzw. Soll-Ist-Abweichungen größer oder gleich einem vorgegebenen Aufmaß erreicht werden.

10

Vorzugsweise ist die Maschinensteuerungseinrichtung weiterhin dazu eingerichtet, nach dem automatischen Ausrichtvorgang automatisch die Endbearbeitung des eingespannten Zahnrads auf Grundlage von für die Endbearbeitung vorgegebenen Steuerdaten zu steuern, wobei die zumindest eine ermittelte rotatorische Nullpunktverschiebung vorzugsweise automatisch beim Steuern der Endbearbeitung des Zahnrads berücksichtigt wird (insbesondere numerisch berücksichtigt).

15

Gemäß dieser bevorzugten Ausführung kann die Endbearbeitung des Zahnrads an der Werkzeugmaschine wesentlich effizienter und bei stark reduzierten Standzeiten an der Maschine ausgeführt werden, da nach dem auf die härtende Wärmebehandlung folgende Einspannen des Zahnrads an der Werkzeugmaschine sofort automatisch zuerst eine optimale rotatorische Nullpunktverschiebung ermittelt werden kann, die dann in der direkt anschließenden automatisch gestarteten Endbearbeitung des Zahnrads vorteilhaft automatisch berücksichtigt wird. Ein manuelles, steuerndes Eingreifen des Bedieners nach Bestimmung der rotatorischen Nullpunktverschiebung und vor Beginn der Endbearbeitung an der Werkzeugmaschine ist vorteilhaft nicht erforderlich.

20

25

Vorzugsweise umfassen die Mehrzahl von Zahnflanken eine Gruppe von linken Zahnflanken und eine Gruppe von rechten Zahnflanken, wobei die Maschinensteuerungseinrichtung vorzugsweise dazu eingerichtet ist, die für die Gruppe von linken Zahnflanken ermittelten Soll-Ist-Abweichungen und die für die Gruppe von rechten Zahnflanken ermittelten Soll-Ist-Abweichungen getrennt auszuwerten.

30

Gemäß dieser bevorzugten Ausführung wird die Erkenntnis genutzt, dass sich zwar alle Zahnflanken aufgrund der härtenden Wärmebehandlung unterschiedlich verziehen können, wobei die Unterschiede im Verzug zwischen zwei verschiedenen linken Flanken bzw. Unterschiede im Verzug zwischen zwei verschiedenen rechten Flanken typischerweise geringer ausfallen als Unterschiede im Verzug zwischen einer linken Flanke und einer rechten Flanke. Bei zusätzlicher

35

oder alternativer getrennter Auswertung der Soll-Ist-Abweichungen von Tastpositionen auf linken Flanken und der Soll-Ist-Abweichungen von Tastpositionen auf rechten Flanken ist es somit vorteilhaft möglich, zusätzlich bzw. alternativ zur Bestimmung einer einzigen rotatorischen Nullpunktverschiebung getrennt voneinander eine erste rotatorische Nullpunktverschiebung für linke Zahnflanken und eine zweite rotatorische Nullpunktverschiebung für rechte Zahnflanken zu bestimmen.

Bevorzugt ist die Maschinensteuerungseinrichtung bei getrennter Auswertung der für die Gruppe von linken Zahnflanken ermittelten Soll-Ist-Abweichungen und der für die Gruppe von rechten Zahnflanken ermittelten Soll-Ist-Abweichungen weiterhin dazu eingerichtet, eine erste rotatorische Nullpunktverschiebung für die Gruppe von linken Zahnflanken und eine zweite rotatorische Nullpunktverschiebung für die Gruppe von rechten Zahnflanken zu ermitteln.

Dies hat den Vorteil, dass die Endbearbeitung des Zahnrads weiter verbessert werden kann. Sollte nämlich die Bestimmung einer einzigen rotatorischen Nullpunktverschiebung bei gemeinsamer Auswertung der Soll-Ist-Abweichungen der linken und rechten Zahnflanken zu einem Ergebnis führen, bei dem noch nach Endverarbeitung aufgrund eines zu großen und zu unterschiedlichen Wärmeverzugs der Zahnflanken Stellen mit zu viel Materialabtrag und/oder Stellen mit zu wenig oder keinem Materialabtrag auftreten sollten, kann dies bei getrennter Auswertung der linken und rechten Zahnflanken und Ermittlung der ersten Nullpunktverschiebung für die linken Zahnflanken und zweiten Nullpunktverschiebung für die rechten Zahnflanken verbessert vermieden werden.

Vorzugsweise ist die Maschinensteuerungseinrichtung in diesem Fall dazu eingerichtet, nach dem automatischen Ausrichtvorgang automatisch die Endbearbeitung des eingespannten Zahnrads auf Grundlage von für die Endbearbeitung vorgegebenen Steuerdaten zu steuern, wobei die erste ermittelte rotatorische Nullpunktverschiebung vorzugsweise automatisch beim Steuern der Endbearbeitung der linken Zahnflanken berücksichtigt wird und die zweite ermittelte rotatorische Nullpunktverschiebung vorzugsweise automatisch beim Steuern der Endbearbeitung der rechten Zahnflanken berücksichtigt wird.

Wie bereits vorstehend erwähnt, kann somit bei getrennter Auswertung der linken und rechten Zahnflanken und Ermittlung der ersten Nullpunktverschiebung für die linken Zahnflanken und zweiten Nullpunktverschiebung für die rechten Zahnflanken verbessert vermieden werden, dass Stellen mit zu viel Materialabtrag und/oder Stellen mit zu wenig oder keinem Materialabtrag auftreten. Der einzige auftretende Effekt wäre bei Anwendung von einer ersten Nullpunktverschiebung für die Endbearbeitung der linken Flanken und einer unterschiedlichen zweiten Nullpunktverschiebung für die Endbearbeitung der rechten Flanken, dass die Zahndicke

der Zähne des fertiggestellten Zahnrads gegenüber der Soll-Zahndicke reduziert wäre. Weil durch eine derartige reduzierte Zahndicke das Abrollverhalten des späteren Zahnrads jedoch nicht signifikant beeinflusst wird, da bei Verwendung des Zahnrads zumeist nur entweder die linken oder die rechten Zahnflanken jeweils mit Gegenflanken eines Gegenzahnrad abrollen, kann dieser Effekt toleriert werden und bringt keine wirklichen Nachteile mit.

In Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung ist es möglich, grundsätzlich eine erste und eine zweite Nullpunktverschiebung für die linken und rechten Zahnflanken getrennt voneinander zu ermitteln. Dies würde jedoch öfter als eigentlich nötig dazu führen, dass die Zahndicke des fertigen Zahns dünner ausfällt, als die eigentlich vom Konstrukteur vorgegebene Zahndicke. Um diesen Effekt zumindest in den Fällen, in denen es nicht nötig ist, zu vermeiden, werden weitere bevorzugte Ausführungsbeispiele vorgeschlagen, in denen zuerst grundsätzlich eine gemeinsame Auswertung von rechten und linken Zahnflanken durchgeführt werden kann, um eine gemeinsame rotatorische Nullpunktverschiebung zu ermitteln. Bei dieser wird dann überprüft, ob an allen Tastpositionen auf linken sowie rechten Zahnflanken ein positiver Wert bzw. ein Wert größer oder gleich eines vorgegebenen Aufmaßes erreicht wird bzw. erreichbar ist. Sollte dies nicht möglich sein, können im nächsten Schritt durch getrennte Auswertung der linken und rechten Zahnflanken jeweils eine erste und zweite Nullpunktverschiebung ermittelt werden.

Vorzugsweise sind die Mehrzahl von Tastpositionen einer Zahnflanke auf der Zahnflanke in Zeilen, die in Zahnbreitenrichtung verlaufen, und Spalten, die in Zahnhöhenrichtung verlaufen, angeordnet, wobei das von der Maschinensteuerungseinrichtung gesteuerte Messtastmittel die Tastpositionen einer Zahnflanke vorzugsweise spaltenweise abtastet, vorzugsweise indem Tastpositionen einer Spalte hintereinander abgetastet werden und nach Abtasten der Tastpositionen der Spalte die Tastpositionen einer benachbarten Spalte abgetastet werden.

Dies hat den Vorteil, dass die Tastpositionen einer Zahnflanke auf dieser Zahnflanke gemäß einem regelmäßigen Punktgitter in Zeilen und Spalten auf besonders einfache Weise im Wesentlichen über die gesamte Breite und die gesamte Höhe der Zahnflanke verteilt werden können. Somit können auf einfache Weise Tastpositionen auf einer Zahnflanke derart angeordnet werden, dass sich der Wärmeverzug bzw. die Wärmeverzugsänderung über im Wesentlichen über die gesamte Zahnflankenfläche regelmäßig verteilt nachvollziehen lässt. Eine derartige Wärmeverzugsänderung über die Zahnflankenfläche ist auch stark vom jeweiligen Zahnradtyp und von der jeweiligen Verzahnungsform abhängig, da der Verzug typischerweise bei größer werdender Entfernung zum Grundkörper und zum Zahnkopf hin zunimmt.

Durch das spaltenweise Abtasten der Tastpositionen einer Zahnflanke gemäß dieser bevorzugten Ausführungsform kann zudem der Abtastvorgang für die einzelnen Zahnflanken

vorteilhaft effizienter und mit höherer Vorschubgeschwindigkeit durchgeführt werden, da ein dem entgegengesetztes zeilenweises Abtasten insbesondere in Nähe des Zahngrunds, bei dem die Zahnücke typischerweise eine geringste Dicke aufweist, zur Vermeidung von Kollisionen sehr vorsichtig und langsam geführt werden müsste, und im Gegensatz dazu bei spaltenweisem
5 Abtasten der Abtastvorgang demzufolge vorteilhaft effizienter bei schnellerer Vorschubgeschwindigkeit durchgeführt werden kann.

Vorzugsweise tastet das Messtastmittel die Tastpositionen einer Spalte in Richtung zum Zahngrund hin ab, vorzugsweise indem für jede Spalte zuerst die dem Zahnkopf am Nächsten
10 liegende Tastposition abgetastet wird und die die dem Zahngrund am Nächsten liegende Tastposition zuletzt abgetastet wird. Vorzugsweise steuert die Maschinensteuerungseinrichtung das Tastmittel nach Abtasten der dem Zahngrund am Nächsten liegende Tastposition einer Spalte im Eilgang zu der dem Zahnkopf am Nächsten liegenden Tastposition der benachbarten Spalte.

Gemäß dieser bevorzugten Ausführung ergibt sich der Vorteil einer noch schnelleren und effizienteren Abtastung der Tastpositionen einer Zahnflanke, da die langsamere Vorschubgeschwindigkeit beim Abtasten der Tastpositionen einer Spalte zum enger werdenden Zahngrund hin durchgeführt wird und das Verfahren des Tastmittels zur nächsten Tastposition der benachbarten Spalte somit schräg aus dem Zahngrund heraus zum Zahnkopf hin erfolgen kann,
15 demzufolge aufgrund der zum Zahnkopf hin größer werdenden Zahnlückendicke beim Verfahren zur benachbarten Spalte im effizienten und schnellen aber ungenauer steuerbaren Eilgang verfahren werden kann, wobei gleichzeitig das Risiko von Kollisionen signifikant reduziert ist gegenüber einem Verfahren schräg zum Zahngrund hin, bei dem der Eilgang aufgrund der zum Zahngrund hin dünner werdenden Zahnlückendicke nicht angewendet werden könnte.

Vorzugsweise umfasst die Mehrzahl von Zahnflanken eine erste Zahnflanke und eine zweite Zahnflanke, wobei die erste und zweiten Zahnflanken vorzugsweise entweder beide linke Zahnflanken oder beide rechte Zahnflanken sind, und wobei die erste Zahnflanke vorzugsweise auf einer ersten Seite des Zahnrads angeordnet ist, die einer zweiten Seite des Zahnrads, auf der
25 die zweite Zahnflanke angeordnet ist, vorzugsweise in Bezug auf die Zahnradachse im Wesentlichen radial gegenüberliegt. Alternativ umfasst die Mehrzahl von Zahnflanken vorzugsweise eine Gruppe von N Zahnflanken, wobei die N Zahnflanken der Gruppe vorzugsweise entweder alle linke Zahnflanken sind oder alle rechte Zahnflanken sind, und wobei die N Zahnflanken der Gruppe vorzugsweise umfänglich des Zahnrads mit im Wesentlichen jeweils
30 gleichem Winkelabstand zwischen einander angeordnet sind, d.h. vorzugsweise im Wesentlichen bei einem Winkelabstand von $360^\circ/N$. Die zuvor beschriebene Ausführungsform in Bezug auf die erste und zweite Zahnflanke entspricht hierbei im Wesentlichen dem Spezialfall $N = 2$.

Wie bereits vorstehend beschrieben, kann nicht nur für Tastpositionen auf einer Zahnflanke eine starke Veränderung des Wärmeverzugs auftreten, der durch die rotatorische Nullpunktverschiebung ausgeglichen werden soll, sondern es kann auch für unterschiedliche Zahnflanken ein unterschiedlicher Wärmeverzug auftreten. Um dies verbessert ausgleichen zu können, sieht diese bevorzugte Ausführungsform nicht nur vor, mehrere Zahnflanken abzutasten, sondern die abzutastenden Zahnflanken zudem möglichst umfänglich des Zahnrads im Wesentlichen gleichverteilt auszuwählen.

Bei zwei (bevorzugt entweder linken oder rechten) abzutastenden Zahnflanken werden diese bevorzugt im Wesentlichen auf gegenüberliegenden Seiten des Zahnrads ausgewählt. Hierbei bedeutet „im Wesentlichen“ insbesondere bevorzugt, dass die Zahnflanken nicht notwendigerweise genau gegenüber, d.h. bei 180° angeordnet sein müssen, sondern bevorzugt innerhalb gegenüberliegender Winkelsegmente, die einen Winkel kleiner oder gleich 90° aufweisen, bevorzugt kleiner oder gleich 45° .

Bei drei oder mehr (bevorzugt entweder linken oder rechten) abzutastenden Zahnflanken, d.h. $N > 2$, werden diese bevorzugt im Wesentlichen bei einem Winkelabstand von $360^\circ/N$ zueinander ausgewählt. Hierbei bedeutet „im Wesentlichen“ insbesondere bevorzugt, dass die N Zahnflanken nicht notwendigerweise bei einem Winkelabstand von $360^\circ/N$ angeordnet sein müssen, sondern bevorzugt jeweils innerhalb von Winkelsegmenten, die einen Winkelabstand von $360^\circ/N$ zueinander aufweisen und bevorzugt einen jeweiligen Winkel von kleiner oder gleich $180^\circ/N$ aufweisen, bevorzugt kleiner oder gleich $90^\circ/N$.

Vorzugsweise ist die Maschinensteuerungseinrichtung dazu eingerichtet, das Messtastmittel zum Abtasten der Tastpositionen auf Grundlage von Tastdaten zu steuern, wobei die Tastdaten für jede Tastposition vorzugsweise eine vorgegebene Zielposition, eine vorgegebene Tastrichtung und/oder eine vorgegebene Orientierungsrichtung für das Messtastmittel angeben.

Hierbei bezeichnet die Orientierungsrichtung für das Messtastmittel eine Vorgabe einer einzunehmenden Richtung einer Längsachse des Messtastmittels bei dem Abtastvorgang bei der Tastposition, z.B. bei Verwendung eines Taststiftes mit an der Spitze angeordneter Tastkugel der Längsachse des Taststifts.

Die Zielposition gibt (bevorzugt im Werkzeugmaschinenkoordinatensystem) die Position eines Abtastziels für die Tastposition an und die Tastrichtung gibt bevorzugt eine Vorschubrichtung für das Tastmittel beim Abtasten der Tastposition zur Zielposition hin vor.

Insgesamt wird eine Tastposition auf Grundlage der Tastdaten dann bevorzugt derart abgetastet, dass das Messtastmittel in einer festgehaltenen Orientierung gemäß der vorgegebenen Orientierungsrichtung in Richtung der vorgegebenen Tastrichtung zu der vorgegebenen Zielposition verfahren wird bis ein Tastkontakt mit der Zahnflanke an der
5 Tastposition erreicht wird, an der dann die Istposition gemessen werden kann. Die vorgegebene Zielposition kann hierbei z.B. der vorgegebenen Sollposition der Zahnflanke (d.h. ohne Verzug) entsprechen oder auch einer Position, die definiert ist durch die vorgegebenen Sollposition plus ein vordefinierter Aufmaß-Betrag eines vorgegebenen Aufmaßes, z.B. in Richtung der Flächennormalen der Sollflankenform an der Tastposition.

10

Vorzugsweise geben die Tastdaten für alle Tastpositionen einer Zahnflanke die gleiche vorgegebene Orientierungsrichtung für das Messtastmittel an, so dass die Maschinensteuerungseinrichtung das Messtastmittel vorzugsweise derart steuert, dass die Orientierungsrichtung des Messtastmittels beim Abtastvorgang der Tastpositionen einer
15 Zahnflanke unverändert bleibt. Vorzugsweise umfassen die zumindest 5-Achsen der Werkzeugmaschine hierbei zumindest zwei Rundachsen, wobei die vorgegebene Orientierungsrichtung der Tastdaten für eine Tastposition vorzugsweise eine numerische Stellungsvorgabe für die einzunehmende Stellung der zumindest zwei Rundachsen der Werkzeugmaschine beim Abtasten der Zahnflanke an der Tastposition angibt.

20

Dies hat den Vorteil, dass die Genauigkeit beim Abtasten der Tastpositionen einer Zahnflanke vorteilhaft erhöht werden kann, da die vorgegebene Tastorientierung und somit die eingehaltene Rundachsstellung der Rundachsen beim Abtastvorgang aller Tastpositionen einer Zahnflanke nicht verändert wird. Die Abtastbewegungen an einer Zahnflanke werden dann nur
25 von den Linearachsen der Werkzeugmaschine bei festgehaltenen Rundachsen gesteuert, so dass die Abtast-Istpositionen für die jeweilige Zahnflanke vorteilhaft bei höherer relativer Genauigkeit zueinander erfasst werden können.

Vorzugsweise umfasst die Werkzeugmaschine weiterhin ein Eingabemittel, über das ein
30 Benutzer für eine oder mehrere Zahnflanken eine jeweilige Mehrzahl von Tastpositionen vorgeben kann, und/oder ein Schnittstellenmittel, über das Tastpositionsdaten eingegeben werden können, die für eine oder mehrere Zahnflanken eine jeweilige Mehrzahl von Tastpositionen vorgeben. Vorzugsweise ist die Maschinensteuereinrichtung dann dazu eingerichtet, auf Grundlage der vorgegebenen Tastpositionen die Tastdaten automatisch zu erzeugen.

35

Dies hat den Vorteil, dass ein Benutzer der Werkzeugmaschine auf einfache Art und Weise Tastpositionen vorgeben kann, die dem Ausrichtvorgang zu Grunde gelegt werden sollen, indem die Tastpositionen entweder mittels des Eingabemittels direkt an der Werkzeugmaschine

eingeebene werden können oder über die Schnittstelle an die Maschinensteuerungseinrichtung der Werkzeugmaschine übermittelt werden können. Die Schnittstelle kann hierbei z.B. eine Ethernet-, LAN-, WLAN-, und/oder USB-Schnittstelle zur Ein- und Ausgabe von Daten an der Werkzeugmaschine umfassen. Der Benutzer kann hierbei vorteilhaft nur die jeweiligen Zielpositionen vorgeben, wobei die weiteren erforderlichen Tastdaten automatisch an der Werkzeugmaschine von der Maschinensteuerungseinrichtung erzeugt werden können.

Vorzugsweise ist die jeweilige vorgegebene Tastrichtung für jede Tastposition auf einer Zahnflanke jeweils parallel zu einem Normalenvektor ausgerichtet, der an der jeweiligen Tastposition auf der Zahnflanke senkrecht steht. Somit kann die Tastrichtung auf einfache Weise bereits auf Grundlage der Sollflankengeometrie und der Zielpositionen errechnet werden, da sich die Tastrichtung an der Flächennormale der Sollflanke an der Tastposition orientiert. Zudem kann hierdurch der eigentliche Tastvorgang an einer Tastposition genauer ausgeführt werden. Am genauesten würde der Tastvorgang bei senkrechtem Antasten der tatsächlichen Flanke erreicht werden können, wobei die exakte senkrechte Richtung zu der tatsächlichen Flanke an der Tastposition aufgrund des unbekanntem Verzugs nicht exakt bekannt ist. Indem die Flächennormale auf die Soll-Flankenfläche an der Tastposition zur Ausrichtung der Tastrichtung genutzt wird, kann die Genauigkeit der Abtastung jedoch im Durchschnitt über alle Tastpositionen selbst ohne Kenntnis der echten Flächennormalen der Flankenform mit Verzug auf einfache Weise vorteilhaft optimiert werden.

Vorzugsweise ist die Maschinensteuerungseinrichtung dazu eingerichtet, die zumindest eine rotatorische Nullpunktverschiebung des an dem Einspannmittel eingespannten Zahnrads unter der Maßgabe zu ermitteln, bei Endbearbeitung des Zahnrads an jeder Tastposition Material abzutragen. Dies kann dadurch auf einfache Weise ermöglicht werden, indem die bestimmte rotatorische Nullpunktverschiebung zum Beispiel für alle ermittelten Soll-Ist-Abweichungen überprüft wird, um herauszufinden, ob an einer oder mehreren der Tastpositionen die ermittelte Nullpunktverschiebung nicht ausreichend ist, um an dieser Tastposition bei Endbearbeitung Material abzutragen. Auf Grundlage dieser Überprüfung kann dann die ermittelte Nullpunktverschiebung ggf. noch leicht korrigiert werden, um auch an diesen Tastpositionen Material abzutragen zu können, wobei bevorzugt noch erneut überprüft werden sollte, ob diese Korrektur nicht dazu führen könnte, dass dann an anderen Tastpositionen kein Material abgetragen wird. Durch das Ermitteln einer Nullpunktverschiebung bzw. korrigierten Nullpunktverschiebung, bei der während der Endbearbeitung an allen Tastpositionen Material abgetragen wird, kann es insbesondere verbessert vermieden werden, dass überhaupt Stellen auf Zahnflanken auftreten, an denen kein Material abgetragen wird.

In ähnlicher Weise ist es wie folgend beschrieben auch möglich, Maßgaben einer minimalen Materialabtragungstiefe bei der Endbearbeitung für die Ermittlung der rotatorischen Nullpunktverschiebung vorzugeben. Diese kann ggf. durch einen Benutzer erneut über ein Eingabemittel oder in Datenform über eine Datenschnittstelle vorgegeben werden.

5

Vorzugsweise ist die Maschinensteuerungseinrichtung dazu eingerichtet, die zumindest eine rotatorische Nullpunktverschiebung des an dem Einspannmittel eingespannten Zahnrads unter Berücksichtigung einer vorgegebenen minimalen Materialabtragungstiefe zu ermitteln, mit der Maßgabe, bei Endbearbeitung des Zahnrads an jeder Tastposition mindestens Material bis zu der vorgegebenen minimalen Materialabtragungstiefe abzutragen.

10

Vorzugsweise umfasst die Maschinensteuerungseinrichtung ein Speichermittel und ist dazu eingerichtet, die zumindest eine ermittelte rotatorische Nullpunktverschiebung für das eingespannte Zahnrad zu speichern. Dies hat den Vorteil, dass die abgespeicherte rotatorische Nullpunktverschiebung auf einfache Weise bei der späteren Endbearbeitung numerisch berücksichtigt werden kann, da auch noch während der Abarbeitung der Steuerdaten bei Ausführung der Endbearbeitung stets erneut auf den gespeicherten Wert zurückgegriffen werden kann.

15

20

Gemäß einem zweiten Aspekt der Erfindung wird ein Verfahren zum Steuern eines automatischen rotatorischen Ausrichtvorgangs zur Bestimmung einer rotatorischen Nullpunktverschiebung für eine Endbearbeitung eines Zahnrads an einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine vorgeschlagen, wobei die Werkzeugmaschine vorzugsweise gemäß einem oder mehreren der vorstehend beschriebenen Ausführungen ausgebildet ist bzw. der Ausrichtvorgang durchgeführt wird, wie an einer Werkzeugmaschine gemäß einem oder mehreren der vorstehend beschriebenen Ausführungen.

25

Erfindungsgemäß umfasst das Verfahren Ermitteln einer jeweiligen Istposition an einer Mehrzahl von vorgegebenen Tastpositionen auf jeder Zahnflanke einer Mehrzahl von Zahnflanken des Zahnrads mittels eines Messtastmittels, Vergleichen der ermittelten Istposition für jede der vorgegebenen Tastpositionen mit einer jeweiligen vorgegebenen Sollposition, Ermitteln einer Soll-Ist-Abweichung auf Grundlage des Vergleichs für jede Tastposition, und Ermitteln zumindest einer rotatorischen Nullpunktverschiebung für die Endbearbeitung des an dem Einspannmittel eingespannten Zahnrads auf Grundlage der bestimmten Soll-Ist-Abweichungen.

30

35

Vorzugsweise folgt die von dem Maschinensteuerungseinrichtung gesteuerte Endbearbeitung des eingespannten Zahnrads auf Grundlage von für die Endbearbeitung vorgegebenen Steuerdaten automatisch nach dem automatischen Ausrichtvorgang, wobei die

zumindest eine ermittelte rotatorische Nullpunktverschiebung vorzugsweise automatisch beim Steuern der Endbearbeitung des Zahnrads berücksichtigt wird.

Vorzugsweise umfassen die Mehrzahl von Zahnflanken eine Gruppe von linken Zahnflanken und eine Gruppe von rechten Zahnflanken, wobei die für die Gruppe von linken Zahnflanken ermittelten Soll-Ist-Abweichungen und die für die Gruppe von rechten Zahnflanken ermittelten Soll-Ist-Abweichungen vorzugsweise getrennt ausgewertet werden. Vorzugsweise werden im Schritt Ermitteln zumindest einer rotatorischen Nullpunktverschiebung eine erste Nullpunktverschiebung für die Gruppe von linken Zahnflanken und eine zweite Nullpunktverschiebung für die Gruppe von rechten Zahnflanken ermittelt.

Vorzugsweise folgt die von der Maschinensteuerungseinrichtung gesteuerte Endbearbeitung des eingespannten Zahnrads auf Grundlage von für die Endbearbeitung vorgegebenen Steuerdaten automatisch nach dem automatischen Ausrichtvorgang, wobei die erste ermittelte rotatorische Nullpunktverschiebung vorzugsweise automatisch beim Steuern der Endbearbeitung der linken Zahnflanken berücksichtigt wird und die zweite ermittelte rotatorische Nullpunktverschiebung vorzugsweise automatisch beim Steuern der Endbearbeitung der rechten Zahnflanken berücksichtigt wird.

Vorzugsweise sind die Mehrzahl von Tastpositionen einer Zahnflanke auf der Zahnflanke in Zeilen, die in Zahnbreitenrichtung verlaufen, und Spalten, die in Zahnhöhenrichtung verlaufen, angeordnet, wobei im Schritt Ermitteln der jeweiligen Istpositionen das Messtastmittel vorzugsweise die Tastpositionen einer Zahnflanke spaltenweise abtastet, indem Tastpositionen einer Spalte hintereinander abgetastet werden und nach Abtasten der Tastpositionen der Spalte die Tastpositionen einer benachbarten Spalte abgetastet werden.

Vorzugsweise tastet das Messtastmittel die Tastpositionen einer Spalte in Richtung zum Zahngrund hin ab, indem für jede Spalte zuerst die dem Zahnkopf am Nächsten liegende Tastposition abgetastet wird und die die dem Zahngrund am Nächsten liegende Tastposition zuletzt abgetastet wird. Vorzugsweise wird das Tastmittel hierbei nach Abtasten der dem Zahngrund am Nächsten liegende Tastposition einer Spalte im Eilgang zu der dem Zahnkopf am Nächsten liegenden Tastposition der benachbarten Spalte gesteuert.

Vorzugsweise umfassen die Mehrzahl von Zahnflanken eine erste Zahnflanke und eine zweite Zahnflanke, wobei die erste und zweiten Zahnflanken vorzugsweise entweder beide linke Zahnflanken oder beide rechte Zahnflanken sind, und wobei die erste Zahnflanke vorzugsweise auf einer ersten Seite des Zahnrads angeordnet ist, die einer zweiten Seite des Zahnrads, auf der die zweite Zahnflanke angeordnet ist, in Bezug auf die Zahnradachse im Wesentlichen radial

gegenüberliegt. Alternativ umfassen die Mehrzahl von Zahnflanken vorzugsweise eine Gruppe von N Zahnflanken, wobei die N Zahnflanken der Gruppe vorzugsweise entweder alle linke Zahnflanken sind oder alle rechte Zahnflanken sind, und wobei die N Zahnflanken der Gruppe vorzugsweise umfänglich des Zahnrads mit im Wesentlichen jeweils gleichbleibendem Winkelabstand zwischen einander angeordnet sind.

Vorzugsweise wird das Messtastmittel zum Abtasten der Tastpositionen auf Grundlage von Tastdaten gesteuert, wobei die Tastdaten vorzugsweise für jede Tastposition eine vorgegebene Zielposition, eine vorgegebene Tastrichtung und/oder eine vorgegebene Orientierungsrichtung für das Messtastmittel angeben. Vorzugsweise geben die Tastdaten für alle Tastpositionen einer Zahnflanke die gleiche vorgegebene Orientierungsrichtung für das Messtastmittel an, so dass das Messtastmittel vorzugsweise derart gesteuert wird, dass die Orientierungsrichtung des Messtastmittels beim Abtastvorgang der Tastpositionen einer Zahnflanke unverändert bleibt.

Vorzugsweise umfassen die zumindest 5-Achsen der Werkzeugmaschine zumindest zwei Rundachsen, wobei die vorgegebene Orientierungsrichtung der Tastdaten für eine Tastposition vorzugsweise eine Stellungsvorgabe für die zumindest zwei Rundachsen der Werkzeugmaschine beim Abtasten der Zahnflanke an der Tastposition angibt.

Vorzugsweise werden die Tastdaten auf Grundlage von vorgegebenen Tastpositionen automatisch erzeugt, wobei die vorgegebenen Tastpositionen vorzugsweise über ein Eingabemittel von einem Benutzer und/oder über ein Schnittstellenmittel für eine oder mehrere Zahnflanken vorgegeben werden können.

Vorzugsweise ist die jeweilige vorgegebene Tastrichtung für jede Tastposition auf einer Zahnflanke jeweils parallel zu einem Normalenvektor ausgerichtet, der an der jeweiligen Tastposition auf der Zahnflanke senkrecht steht.

Vorzugsweise wird die zumindest eine rotatorische Nullpunktverschiebung des an dem Einspannmittel eingespannten Zahnrads unter der Maßgabe ermittelt, bei Endbearbeitung des Zahnrads an jeder Tastposition Material abzutragen. Vorzugsweise wird die zumindest eine rotatorische Nullpunktverschiebung des an dem Einspannmittel eingespannten Zahnrads unter Berücksichtigung einer vorgegebenen minimalen Materialabtragstiefe ermittelt, mit der Maßgabe, bei Endbearbeitung des Zahnrads an jeder Tastposition mindestens Material bis zu der vorgegebenen minimalen Materialabtragstiefe abzutragen.

Vorzugsweise wird die zumindest eine ermittelte rotatorische Nullpunktverschiebung für das eingespannte Zahnrad in einem Speichermittel gespeichert.

Gemäß einem dritten Aspekt wird ein Computerprogrammprodukt vorgeschlagen, das ein computerlesbares Medium und ein darin gespeichertes Computerprogramm umfasst, wobei das Computerprogramm in der Form einer Abfolge von Zuständen gespeichert ist, die Befehlen entspricht, die eingerichtet sind von einer Maschinensteuerungseinrichtung einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine gemäß einer oder mehrerer der vorstehend beschriebenen Ausführungsformen verarbeitet zu werden, so dass die Maschinensteuerungseinrichtung auf Grundlage der Befehle ein Verfahren gemäß einer oder mehrerer der vorstehend beschriebenen Ausführungsformen an der Werkzeugmaschine steuert.

Zusammenfassend ermöglicht es die vorliegende Erfindung im Hinblick auf die vorstehend bereits beschriebenen, im Zusammenhang mit einem Ausrichtvorgang zur Bestimmung einer rotatorischen Nullpunktverschiebung auftretenden Problemen der aus dem Stand der Technik bekannten Ausrichtverfahren, einen verbesserten Ausrichtvorgang für weichbearbeitete und einer Wärmebehandlung unterzogene Zahnräder an einer Werkzeugmaschine bereitzustellen, bei dem die vorstehend beschriebenen Nachteile vermieden werden können, und bei dem die rotatorische Nullpunktverschiebung insbesondere bei sehr großen Zahnrädern mit Durchmessern von bis zu über einem Meter oder mehr immer noch vorteilhafte Ergebnisse liefern kann, so dass bei der Endbearbeitung vermieden werden kann, dass an Zahnflanken Stellen auftreten, an denen zu viel und/oder zu wenig Material abgetragen wird.

Kurzbeschreibung der angehängten Figuren

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

Fig. 2 zeigt beispielhaft eine schematische Darstellung zweier benachbarter Zähne eines
geradverzahnten Stirnrads in Perspektivdarstellung.

10 Fig. 3 zeigt beispielhaft eine schematische Darstellung einer rechten Zahnflanke zur
Veranschaulichung eines Abtastvorgangs an einer Zahnflanke gemäß einem Ausführungsbeispiel
der Erfindung.

Fig. 4 zeigt beispielhaft eine schematische Darstellung von Istpositionen und
15 Sollpositionen einer Spalte von Tastpositionen auf Zahnflanken eines Zahns aus Fig. 2.

Fig. 5 zeigt ein beispielhaftes Ablaufdiagramm eines Ausrichtvorgangs zur Endbearbeitung
eines Zahnrads gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung.

20

Ausführliche Beschreibung der angehängten Figuren und bevorzugter Ausführungsbeispiele

Im Folgenden werden beispielhafte bevorzugte Ausführungsbeispiele der vorliegenden
25 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.

30

Fig. 1 zeigt beispielhaft eine schematische Darstellung einer Werkzeugmaschine 100
gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung. Die Werkzeugmaschine 100 ist eine numerisch
gesteuerte Werkzeugmaschine mit zumindest 5-Achsen zur zerspanenden Bearbeitung eines an
einem Einspannmittel 130 der Werkzeugmaschine 100 eingespannten Werkstücks 200 mittels
35 eines an einer Arbeitsspindel 111 der Werkzeugmaschine 100 aufgenommenen Werkzeugs.

Die Werkzeugmaschine 100 umfasst drei Linearachsen X, Y, und Z (nicht dargestellt) und
zwei Rundachsen, z.B. eine erste Rundachse A, B oder eine Kombination aus A und B (nicht

dargestellt) und eine zweite Rundachse C (um Rotationsachse M1 in Fig. 1), mittels denen das an der Arbeitsspindel 111 aufgenommene Werkzeug relativ zu dem am Einspannmittel 120 eingespannten Werkstück 200 gesteuert werden kann, insbesondere in drei translatorischen Freiheitsgraden und zwei rotatorischen Freiheitsgraden. Zum Steuern der Achsbewegungen der drei Linearachsen X, Y, und Z und der zwei Rundachsen umfasst die Werkzeugmaschine eine numerische Maschinensteuerungseinrichtung 150, welche vorzugsweise eine CNC-Steuerungseinrichtung und eine PLC-Steuerungseinrichtung aufweist, wobei die Maschinensteuerungseinrichtung 150 dazu eingerichtet ist, das an der Arbeitsspindel 111 der Werkzeugmaschine 100 aufgenommene Werkzeug relativ zu dem an dem Einspannmittel 130 der Werkzeugmaschine 100 eingespannten Werkstück 200 auf Grundlage numerischer Steuerdaten zu steuern, insbesondere zum Beispiel auf Grundlage eines oder mehrerer NC-Programme.

Die Arbeitsspindel 111 ist an einem Spindelkopf 110 der Werkzeugmaschine gehalten, welcher über eine Rundachse (nicht dargestellt) rotatorisch angetrieben werden kann, und ist dazu eingerichtet, ein oder mehrere Werkzeuge an einer Werkzeugaufnahmeschnittstelle aufzunehmen. Des Weiteren ist die Arbeitsspindel 111 dazu eingerichtet, ein an der Werkzeugaufnahme aufgenommenes Werkzeug, wie z.B. ein Fräs- oder Bohrwerkzeug, zum Erzeugen der zerspanenden Schnittbewegung bei Bearbeitung eines Werkstücks an der Werkzeugmaschine bei hoher Drehzahl rotatorisch anzutreiben (werkzeugtragende Spindel). Weiterhin ist es jedoch neben zerspanenden Werkzeugen auch möglich, nicht-zerspanende Werkzeug an der Arbeitsspindel 111 aufzunehmen und mittels der zumindest 5 Achsen relativ zu dem an dem Einspannmittel 130 eingespannten Werkstück 200 zu verfahren. Das in Fig. 1 dargestellte Werkzeug ist z.B. ein Messtastwerkzeug 140 (z.B. Messtaster bzw. Taststift) mittels dem das eingespannte Werkstück 200 an einer Tastposition zur Positionsbestimmung der Werkstückoberfläche abgetastet werden kann.

Die Werkzeugmaschine umfasst weiterhin einen Drehtisch 120, auf dem das Einspannmittel 130 zum Einspannen eines Werkstücks 200 befestigt ist und der mittels der Rundachse B drehbar um die Rotationsachse M1 in Fig. 1 steuerbar ist.

Die Maschinensteuerungseinrichtung 150 umfasst in diesem Ausführungsbeispiel beispielhaft eine Schnittstelle 170 zur Ein- und Ausgabe von Steuerdaten wie z.B. NC-Daten umfassend ein oder mehrere NC-Programme. Die Schnittstelle 170 kann hierbei unterschiedlichste Datenschnittstellen aufweisen, z.B. eine LAN-Schnittstelle, eine WLAN-Schnittstelle, eine Ethernet-Schnittstelle, eine Bluetooth-Schnittstelle, eine USB-Schnittstelle etc.

Weiterhin umfasst die Maschinensteuerungseinrichtung 150 eine Bedieneinrichtung 160, über die ein Bediener die Werkzeugmaschine 100 und insbesondere die Maschinensteuerungseinrichtung 150 bedienen kann. Die Bedieneinrichtung 160 umfasst in diesem Ausführungsbeispiel eine Darstelleinheit 161 zum Darstellen einer graphischen Benutzerschnittstelle (umfassend Mittel zur visuellen Informationsübertragung d.h. z.B. ein Monitor, Touchscreen bzw. Bildschirm, oder auch Balkenanzeigen, Lämpchen, LEDs etc.) und Bedieneinheiten 162a und 162b zur manuellen Eingabe von Bedienbefehlen. Beispielsweise kann die Bedieneinheit 162a mit einer Tastatur und/oder Softkeys ausgebildet sein, und die Bedieneinheit 162b kann beispielsweise als positionsangegebende Bedieneinheit ausgebildet sein, z.B. als eine Computermaus, ein Trackingball, ein Touchpad, ein Joystick oder ähnliches.

Gemäß der vorliegenden Erfindung ist die Werkzeugmaschine 100 gemäß Fig. 1 dazu eingerichtet einen automatischen rotatorischen Ausrichtvorgang zur Bestimmung einer rotatorischen Nullpunktverschiebung für eine Endbearbeitung eines an dem Einspannmittel 130 eingespannten Zahnrads 200 zu steuern. Beispielfhaft ist das Zahnrad 200 in Fig. 1 als geradzahntes Kegelrad dargestellt. Die vorliegende Erfindung ist jedoch vorteilhaft anwendbar zur Durchführung eines automatischen rotatorischen Ausrichtvorgangs zur Bestimmung einer rotatorischen Nullpunktverschiebung für eine Endbearbeitung verschiedenster Zahnräder (z.B. Stirnräder, Kegelräder, Tellerräder, usw.) mit beliebigen Verzahnungsformen (z.B. geradzahnt, schrägverzahnt, bogenverzahnt, spiralverzahnt, usw.) und auch mit beliebigen Verzahnungsprofilen (z.B. Evolventenprofil, Zykloidenprofil, usw.). Hierbei erfolgt die Bearbeitung, insbesondere Fräsbearbeitung, als auch die Steuerung des Tastvorgangs im Sinne der Erfindung bei Kegelrädern 5-achsig (d.h. über Ansteuerung der zumindest drei Linearachsen und zumindest zwei Rundachsen), jedoch kann die Bearbeitung, insbesondere Fräsbearbeitung, als auch die Steuerung des Tastvorgangs im Sinne der Erfindung bei Stirnrädern auch 4-achsig erfolgen (d.h. über Ansteuerung der zumindest drei Linearachsen und zumindest einer Rundachse).

In diesem automatischen rotatorischen Ausrichtvorgang ermittelt bzw. misst der von der Maschinensteuerungseinrichtung 150 gesteuerte, an der Arbeitsspindel 111 aufgenommene Messtaster 140 bei einer Mehrzahl von vorgegebenen Zahnflanken des Zahnrads 200 an einer Mehrzahl von vorgegebenen Tastpositionen auf jeder der vorgegebenen Zahnflanken eine jeweilige Istposition. Danach vergleicht die Maschinensteuerungseinrichtung 150 für jede der vorgegebenen Tastpositionen die ermittelte Istposition mit einer jeweiligen vorgegebenen Sollposition und ermittelt bzw. berechnet für jede Tastposition eine Soll-Ist-Abweichung auf Grundlage dieses Vergleichs. Darauffolgend ermittelt bzw. berechnet die Maschinensteuerungseinrichtung 150 automatisch auf Grundlage der bestimmten Soll-Ist-Abweichungen zumindest eine rotatorische Nullpunktverschiebung für die Endbearbeitung des an dem Einspannmittel 130 eingespannten Zahnrads 200. Dies wird später detaillierter

beschrieben.

Vorzugsweise werden die bestimmten Istpositionen zusammen mit den Sollpositionen und den dazugehörigen Soll-Ist-Abweichungen in einem Speichermittel der Maschinensteuerungseinrichtung 150 gespeichert. Weiterhin wird vorzugsweise auch die ermittelte rotatorische Nullpunktverschiebung für die Endbearbeitung in dem Speichermittel gespeichert, um in der darauffolgenden Endbearbeitung berücksichtigt zu werden.

Fig. 2 zeigt beispielhaft eine schematische Darstellung zweier benachbarter Zähne 201 und 202 eines geradzahnten Stirnrads in Perspektivdarstellung. Die Richtungspfeile ZH, ZB, und ZD in Fig. 2 geben die Richtungen ZH in Richtung der Zahnhöhe (Zahnhöhenrichtung), ZB in Richtung der Zahnbreite (Zahnbreitenrichtung) und ZD in Richtung der Zahndicke (Zahndickenrichtung) an. Der Zahn 201 weist eine linke Zahnflanke 201a und eine rechte Zahnflanke 201b auf, und der Zahn 202 weist ebenfalls eine linke Zahnflanke 202a und eine rechte Zahnflanke 202b auf. Zwischen den Zähnen 201 und 202 weist das Zahnrad eine Zahnücke mit dem Zahngrund 203 auf.

Fig. 3 zeigt beispielhaft eine schematische Darstellung der rechten Zahnflanke 201b zur Veranschaulichung eines Abtastvorgangs an der Zahnflanke 201b gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung. Der Abtastvorgang gemäß diesem Ausführungsbeispiel wird auf Grundlage von Tastdaten von der Maschinensteuerungseinrichtung 150 gesteuert. Hierbei ist zu beachten, dass die vorliegende Erfindung es vorsieht, dass eine Mehrzahl von Zahnflanken abgetastet wird. Fig. 3 veranschaulicht hierbei den Abtastvorgang an nur einer Zahnflanke, und es ist vorgesehen einen derartigen Abtastvorgang gemäß Fig. 3 nacheinander an einer Mehrzahl von Zahnflanken des Zahnrads durchzuführen.

Hierbei ist es gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung insbesondere bevorzugt, dass die Mehrzahl von abzutastenden Zahnflanken eine Gruppe von linken Zahnflanken und eine Gruppe von rechten Zahnflanken umfasst. Vorzugsweise ist hierbei die Anzahl der abzutastenden linken Zahnflanken und die Anzahl der abzutastenden rechten Zahnflanken gleich. Um hierbei vorteilhaft kurze Verfahrenwege beim gesamten Abtastvorgang zu ermöglichen, können z.B. bevorzugt jeweils die linke und die rechte Zahnflanke des gleichen Zahns abgetastet werden oder noch zweckmäßiger die linke und die rechte Zahnflanke einer gleichen Zahnücke.

Die Tastdaten geben vorzugsweise zunächst die abzutastenden Zahnflanken an, oder zumindest die abzutastenden Zähne bzw. Zahnücken, wobei dann bevorzugt pro angegebenem Zahn bzw. pro angegebener Zahnücke jeweils die linke und rechte Zahnflanke abgetastet wird. Für eine Zahnflanke (bzw. gleichzeitig für alle abzutastenden rechten und/oder linken

Zahnflanken) geben die Tastdaten weiterhin eine Mehrzahl von vorgegebenen Tastpositionen für den Abtastvorgang an. Die Maschinensteuerungseinrichtung 150 ist dazu eingerichtet, den an der Arbeitsspindel 111 aufgenommenen Messtaster 140 zum Abtasten einer Mehrzahl von auf der Zahnflanke angeordneten Tastpositionen auf Grundlage der Tastdaten zu steuern, wobei die
5 Tastdaten für jede Tastposition $x(i,j)$ eine vorgegebene Zielposition, eine vorgegebene Tastrichtung und eine vorgegebene Orientierungsrichtung TO für den Messtaster 140 angeben.

Gemäß diesem Ausführungsbeispiel sind Tastpositionen $x(i,j)$ in einem Gitter auf der abzutastenden Zahnflanke 201b an den jeweiligen Kreuzungspunkten von Gitterzeilen $L1, L2, L3$
10 und $L4$, die in Zahnbreitenrichtung ZB auf der Zahnflanke verlaufen, und Gitterspalten $S1, S2, S3, S4, S5$ und $S6$, die in Zahnhöhenrichtung ZH auf der Zahnflanke verlaufen, angeordnet. Hierbei beschreibt der Index i beispielhaft die Zeilennummer und der Index j beispielhaft die Spaltennummer. Folglich sind in diesem Beispiel in Fig. 3 auf der Zahnflanke 24 Tastpositionen $x(1,1), x(1,2), \dots, x(4,5), x(4,6)$ angeordnet, wobei die jeweilige Istposition an den 24
15 Tastpositionen mittels des Messtasters 140 abzutasten ist. Hierbei und auch im Folgenden ist die Anzahl von Zeilen und Spalten bzw. die Anzahl von vorgegebenen Tastpositionen lediglich beispielhaft gewählt. Die Tastpositionen werden bevorzugt derart angeordnet, dass alle Tastpositionen auf der später verzahnungsaktiven Zahnflankenfläche angeordnet sind. Hierbei stellt diese Anordnung der Tastpositionen auf einer Zahnflanke in einem Raster in Zeilen und
20 Spalten lediglich eine besonders zweckmäßige Ausführung der Erfindung dar. In weiteren Ausführungen der Erfindung ist es möglich, dass der Benutzer für eine oder mehrere der Zahnflanken eine oder mehrere frei gewählte Tastpositionen vorgibt.

Die weiterhin in den Tastdaten angegebene Orientierungsrichtung TO für den Messtaster
25 140 bezeichnet gemäß diesem Ausführungsbeispiel eine Vorgabe einer einzunehmenden Richtung einer Längsachse des Messtasters 140 bei dem Abtastvorgang der 24 Tastpositionen der Zahnflanke 201b. Fig. 3 zeigt beispielhaft eine Spitze des Messtasters 140 mit einem Taststift 140b, an dessen Ende eine Tastkugel 140a angebracht ist, die zum Abtasten der Oberfläche der Zahnflanke 201b zur Bestimmung einer Istposition an den Tastpositionen $x(i,j)$ mit
30 der Zahnflankenoberfläche in Kontakt zu bringen ist.

Die in den Tastdaten weiterhin angegebenen Zielpositionen für jede der Tastpositionen geben (bevorzugt im Werkzeugmaschinenkoordinatensystem) die jeweilige Position eines Abtastziels für die jeweilige Tastposition an, und die in den Tastdaten weiterhin angegebenen
35 Tastrichtungen geben eine jeweilige Vorschubrichtung für den Messtaster 140 beim Abtasten der jeweiligen Tastposition zur jeweiligen Zielposition hin vor. Somit wird an einer bestimmten Tastposition mittels des Messtasters 140 derart abgetastet, dass der Messtaster 140 in einer Orientierung gemäß der vorgegebenen Orientierungsrichtung TO (d.h. Längsachse des Taststifts

140b in Fig. 3 parallel ausgerichtet zu der in den Tastdaten vorgegebenen Orientierungsrichtung T_0) vor der Zahnflanke derart positioniert wird, dass das Zentrum der Messkugel 140a auf einer Gerade liegt, die die Tastposition bzw. die in den Tastdaten angegebene Zielposition schneidet und deren Richtung vorgegeben wird durch den Normalenvektor auf der Zahnflankenfläche an der Tastposition bzw. an der von den Tastdaten vorgegebenen Zielposition.

Nach einer derartigen Positionierung wird der Messtaster 140 nur unter Ansteuerung einer oder mehrerer Linearachsen und bei festgehaltenen Rundachsen derart gesteuert, dass die Messkugel 140a in der in den Tastdaten angegebenen Tastrichtung, die parallel zu der Richtung des Normalenvektors auf der Zahnflankenfläche an der Tastposition bzw. an der von den Tastdaten vorgegebenen Zielposition ausgerichtet ist, zu der Zahnflanke hin verfahren wird, d.h. in Richtung der in den Tastdaten angegebenen Zielposition, bis festgestellt wird, dass die Tastkugel 140 mit der Zahnflanke 201b an der Tastposition in Kontakt kommt. Diese Kontaktposition wird erfasst und wird verwendet, die Istposition der Zahnflanke an dieser jeweiligen Tastposition zu ermitteln. Dieser Vorgang wird für alle 24 Tastpositionen $x(i,j)$ wiederholt, bis bei der Zahnflanke 201b für jede Tastposition $x(i,j)$ die jeweilige Istposition ermittelt wurde.

Eine besonders zweckmäßige Ausführung der Abtastbewegung ist mittels der gestrichelten Pfeile in Fig. 3 dargestellt. Hierbei werden die Abtastpositionen spaltenweise, beginnend bei einer der beiden äußeren Spalten, in Richtung zum Zahngrund hin (d.h. entgegengesetzt zur Zahnhöhenrichtung ZH) abgetastet, wobei also die Tastpositionen einer Spalte j hintereinander in der Reihenfolge $x(1,j)$, $x(2,j)$, $x(3,j)$ und $x(4,j)$ abgetastet werden.

Nach Abtasten der dem Zahngrund 203 am nächsten liegenden Tastposition $x(4,j)$ der Spalte j (z.B. Pfeile t_1 und t_2 von $x(3,3)$ zu $x(4,3)$ in Fig. 3) wird der Messtaster 140 für den nächsten Abtastschritt von der Tastposition $x(4,j)$ im Eilgang zu der dem Zahnkopf am nächsten liegenden Tastposition $x(1,j+1)$ der der Spalte j benachbarten Spalte $j+1$ verfahren (z.B. Pfeil t_3 von $x(4,3)$ in Richtung von $x(1,4)$ in Fig. 3). Hierbei wird der Messtaster im Eilgang zur nächsten Spalte verfahren, wobei die Bewegungsrichtung vom engen Zahngrund weg geführt ist, so dass ein derartiger Abtastvorgang mit signifikant reduziertem Kollisionsrisiko schnell, genau und effizient ausgeführt werden kann.

In dem Abtastvorgang ändern sich zwar für jede Tastposition $x(i,j)$ die Zielposition und die Tastrichtung (die jeweils parallel zu dem jeweiligen Normalenvektor ausgerichtet ist) in den Tastdaten, jedoch werden die Tastdaten besonders zweckmäßigerweise derart erzeugt bzw. vorgegeben, dass die vorgegebene Orientierungsrichtung T_0 beim Abtasten aller 24 Tastpositionen der Zahnflanke durch den Taststift 140 beibehalten wird, d.h. dass die

Rundachsen der Werkzeugmaschine bei den Verfahrbewegungen während des Abtastvorgangs der gesamten Zahnflanke 201b festgehalten werden. Dies erhöht insbesondere vorteilhaft die erreichbare relative Genauigkeit der Istposition-Bestimmungen an den Tastpositionen der Zahnflanke 201b. Die Orientierungsrichtung T0 ist hierbei unter der Maßgabe vorzugeben, dass
5 keine Kollisionen während des Abtastvorgangs auftritt (ggf. mittels einer vorhergehenden virtuellen Kollisionssimulation). Dies ist bei fast allen Verzahnungsformen typischerweise möglich und nur bei Zahnrädern mit sehr starkem Drall der Flanken (z.B. bei Kegelrädern mit sehr stark gekrümmter Bogen- oder Spiralverzahnung) kann es vorkommen, dass die Orientierung ggf. während des Abtastvorgangs ein- oder mehrmals variiert werden sollte, um etwaige Kollisionen
10 vermeiden zu können.

Anschließend wird der Tastvorgang gemäß Fig. 3 für alle vorgegebenen linken und rechten Zahnflanken wiederholt, bis die Istpositionen an jeder der vorgegebenen Tastpositionen der Mehrzahl von vorgegebenen Zahnflanken mittels des Messtasters 140 ermittelt wurden.
15 Erfindungsgemäß ist nach Ermitteln der Istpositionen vorgesehen, für jede Tastposition einen Soll-Ist-Vergleich durchzuführen. Ein derartiger Soll-Ist-Vergleich ist beispielhaft für Tastpositionen einer Spalte einer linken und einer rechten Zahnflanke eines Zahns in Fig. 4 veranschaulicht.

Üblicherweise beziehen sich die Angaben der Tastdaten auf ein Koordinatensystem, bei
20 dem eine der Hauptachsen der Werkzeugmaschine (üblicherweise die Z-Achse) exakt auf der Mittelachse des Werkstücks liegt bzw. in der die Mittelachse des Werkstücks exakt mit der Rotationsachse M1 des Drehtischs 120 ausgerichtet ist. Bei dem vorhergehend beschriebenen Tastvorgang an der Werkzeugmaschine kann das Werkstück 200 jedoch in weiteren Ausführungsbeispielen auch beliebig in dem Einspannmittel 130 eingespannt sein, z.B. indem die
25 Mittelachse des Werkstücks 200 ggf. achsparallel aber verschoben zur Rotationsachse M1 des Drehtischs 120 ausgerichtet ist.

In derartigen Ausführungsbeispielen kann eine derartige Einspannabweichung zwischen dem Rotationszentrum der Rundachse B der Werkzeugmaschine und der Mittelachse des
30 Werkstücks 200 automatisch durch die Maschinensteuerungseinrichtung 150 mittels einer Koordinatenumrechnung bzw. Koordinatentransformation kompensiert werden, d.h. die Tastdaten bzw. die Positions- und Richtungsangaben in den Tastdaten können einer automatischen Koordinatentransformation unterzogen werden, um eine Einspannabweichung zwischen dem Rotationszentrum der Rundachse B der Werkzeugmaschine und der Mittelachse des Werkstücks
35 200 automatisch zu kompensieren. Analog können die Sollpositionen einer automatischen Koordinatentransformation unterzogen werden und/oder die im Tastvorgang ermittelten Istpositionen einer Rücktransformation unterzogen werden.

Fig. 4 zeigt beispielhaft eine schematische Darstellung von Istpositionen und Sollpositionen einer Spalte von Tastpositionen auf Zahnflanken 201a (linke Zahnflanke) und 201b (rechte Zahnflanke) des Zahns 201 aus Fig. 2 bzw. der Zahnflanke 201b aus Fig. 3 der Spalte S6 (im Wesentlichen im Profilschnitt durch den Zahn 201).

5

Die gestrichelten Linien in Fig. 4 entsprechen dem Sollverlauf der Zahnflanken 201a und 201b, gekennzeichnet als 201a_{SOLL} und 201b_{SOLL} entlang der Spalte S6 aus Fig. 3. Der Sollverlauf der Zahnflanken bzw. die benötigten Sollpositionen der Zahnflanke an den Tastpositionen kann z.B. auf Grundlage eines numerischen virtuellen Modells der Zahnradgeometrie nach einer zuvor erfolgten Weichbearbeitung an der Werkzeugmaschine bestimmt werden, z.B. auf Grundlage eines CAD-Modells des weichbearbeiteten Zahnrads, wobei das virtuelle Modell des Zahnrads ggf. der Erzeugung der numerischen Steuerdaten für die Weichbearbeitung zu Grunde gelegt worden sein kann. Hierbei kann für den Sollverlauf der Zahnflanken zusätzlich ein vom Bediener vorgegebenes Aufmaß berücksichtigt werden.

10

Beispielhaft folgt der Verlauf der Spalten S6 in Fig. 4 genau dem Profilschnitt, so dass beispielhaft die Spalten S6 der linken und der rechten Flanke beide in einer Profilschnittebene liegen. Dies dient jedoch nur Illustrationszwecken und im Allgemeinen ist es nicht erforderlich, dass eine Spalte von Tastpositionen auf einer Zahnflanke genau in einer Profilschnittebene des jeweiligen Zahns liegt. Ebenso ist es nicht erforderlich, dass die Spalten einer linken und einer rechten Zahnflanke jeweils in einer gemeinsamen Ebene liegen. Die Anordnung der Tastdaten der linken und rechten Zahnflanken können auch vollkommen unabhängig voneinander vorgegeben sein.

15

In Fig. 4 sind die jeweiligen Tastpositionen der linken Flanke 201a_{SOLL} mit $x(1,6,L)$ bis $x(4,6,L)$ und die jeweiligen Tastpositionen der rechten Flanke 201b_{SOLL} mit $x(1,6,R)$ bis $x(4,6,R)$ bezeichnet. Hierbei wurde ein weiterer Index k hinzugefügt, so dass $x(i,j,k)$ nun genau den jeweiligen Tastpunkt bezeichnet mit $i = 1, \dots, N_z$, wobei N_z die Anzahl der Zeilen pro Zahnflanke angibt, $j = 1, \dots, N_s$, wobei N_s die Anzahl der Spalten pro Zahnflanke angibt, und $k = R, L$ mit R für eine rechte Zahnflanke und L für eine linke Zahnflanke. Hierbei sind die Anzahl der Zeilen und Spalten auf rechten und linken Zahnflanken als gleich angenommen, jedoch können diese auch unterschiedlich sein, so dass die Anzahl der Tastpositionen auf linken Zahnflanken und die Anzahl der Tastpositionen auf rechten Zahnflanken unterschiedlich sein kann.

25

30

35

Die durchgehenden Linien in Fig. 4 entsprechen dem Istverlauf der Zahnflanken 201a und 201b, gekennzeichnet als 201a_{IST} und 201b_{IST} entlang der Spalte S6 aus Fig. 3. Hierbei wurde in Fig. 4 angenommen, dass der Istverlauf der Zahnflanken von dem Sollverlauf der Zahnflanken aufgrund eines aus einer vorangegangenen härtenden Wärmebehandlung nach

Weichbearbeitung des Zahnrads resultierenden Verzugs der Zahnflanken abweicht. An den jeweiligen Tastpositionen werden gemäß Fig. 3 die tatsächlichen Istpositionen mittels des Messtasters 140 ermittelt. Die jeweiligen ermittelten Istpositionen bei den jeweiligen Tastpositionen sind beispielhaft mit $y(i,j,k)$ gekennzeichnet, wobei die Indizes i , j und k analog zu den Indizes der Sollpositionen $x(i,j,k)$ die Zeilennummer i und die Spaltennummer j kennzeichnen, und ob die Flanke eine rechte Flanke ($k = R$) oder eine linke Flanke ist ($k=L$). Da die Istpositionen $y(i,j,k)$ jedoch gemäß Fig. 3 beispielhaft in einer Tastrichtung entsprechend dem jeweiligen Normalenvektor auf der jeweiligen Zahnflanke (gemäß Sollverlauf 201a_{sOLL} bzw. 201b_{sOLL}) an der Tastposition ausgeführt werden, liegen die ermittelten Istpositionen $y(i,j,k)$ im Wesentlichen in jeweiliger Normalenrichtung der Sollpositionen $x(i,j,k)$ positioniert.

Durch Vergleich der jeweiligen Sollpositionen $x(i,j,k)$ und ermittelten Istpositionen $y(i,j,k)$ können in einem nächsten Schritt entsprechende Soll-Ist-Abweichungsparameter $\Delta(i,j,k)$ ermittelt werden. Diese Soll-Ist-Abweichungsparameter $\Delta(i,j,k)$ werden bevorzugt berechnet als Betrag der Distanz zwischen den jeweiligen Soll- und Istpositionen $x(i,j,k)$ und $y(i,j,k)$ mit einem Vorzeichen, das anzeigt, ob die Zahnflanke zum Zahn hin oder vom Zahn weg verzogen ist (Verzugsrichtung).

Hierbei können die Soll-Ist-Abweichungsparameter $\Delta(i,j,k)$ sowohl positive als auch negative Werte annehmen, wobei ein positives Vorzeichen beispielsweise angibt, dass die Zahnflanke an der jeweiligen Tastposition vom Zahn weg verzogen ist, und ein negatives Vorzeichen beispielsweise angibt, dass die Zahnflanke an der jeweiligen Tastposition zum Zahn hin verzogen ist. In diesem Falle wären beispielsweise die Parameterwerte für $\Delta(1,6,L)$ bis $\Delta(4,6,L)$ sowie $\Delta(3,6,R)$ und $\Delta(4,6,R)$ in Fig. 4 positiv und $\Delta(1,6,R)$ wäre negativ; $\Delta(2,6,R)$ wäre beispielhaft gleich Null, da die Soll- und Istpositionen $x(2,6,R)$ und $y(2,6,R)$ in Fig. 4 beispielhaft deckungsgleich bzw. identisch sind (lokal kein Verzug an der Tastposition $i = 2$, $j = 6$ und $k = R$).

Um die Bestimmung der rotatorischen Nullpunktverschiebung noch weiter zu optimieren, ist es gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung weiterhin vorgesehen, eine Mehrzahl von linken und rechten Zahnflanken an verschiedenen Stellen des Zahnrads abzutasten. Hierbei können insbesondere N Paare von rechten und linken Zahnflanken an verschiedenen Stellen des Zahnrads abgetastet werden. Hierbei ist es z.B. denkbar, dass für eine Mehrzahl von vorgegebenen Zähnen bzw. Zahnlücken an verschiedenen Stellen des Zahnrads jeweils die rechte und linke Zahnflanke wie vorstehend beschrieben abgetastet werden. Hierbei können die Tastpositionen weiter mit einem zusätzlichen Index m angegeben werden mit Sollpositionen $x(m,i,j,k)$, Istpositionen $y(m,i,j,k)$ und Soll-Ist-Abweichungen $\Delta(m,i,j,k)$, wobei $m = 1, \dots, N$ den jeweiligen abzutastenden Zahn bzw. die abzutastende Zahnücke angibt (wobei N der Anzahl der vorgegebenen abzutastenden Zähne bzw. Zahnücken entspricht) und die Indizes i , j und k für jeden dieser Zähne bzw. jede dieser Zahnücken die jeweilige Zeile und Spalte angeben, und ob

die jeweilige Tastposition auf der linken oder der rechten Zahnflanke angeordnet ist.

Bei zwei abzutastenden Zähnen bzw. Zahnlücken ($m = 1, 2$) werden diese bevorzugt im Wesentlichen auf gegenüberliegenden Seiten des Zahnrads ausgewählt. Hierbei bedeutet „im Wesentlichen“ insbesondere bevorzugt, dass die Zähne bzw. Zahnlücken nicht notwendigerweise genau gegenüber, d.h. bei 180° angeordnet sein müssen, sondern bevorzugt innerhalb gegenüberliegender Winkelsegmente, die einen Winkel kleiner oder gleich 90° aufweisen, bevorzugt kleiner oder gleich 45° . Bei drei oder mehr abzutastenden Zähnen bzw. Zahnlücken, d.h. $m = 1, 2, \dots, N$ mit $N > 2$, werden diese bevorzugt im Wesentlichen bei einem Winkelabstand von $360^\circ/N$ zueinander ausgewählt. Hierbei bedeutet „im Wesentlichen“ insbesondere bevorzugt, dass die N Zähne bzw. Zahnlücken nicht notwendigerweise bei einem Winkelabstand von $360^\circ/N$ angeordnet sein müssen, sondern bevorzugt jeweils innerhalb von Winkelsegmenten, die einen Winkelabstand von $360^\circ/N$ zueinander aufweisen und bevorzugt einen jeweiligen Winkel von kleiner oder gleich $180^\circ/N$ aufweisen, bevorzugt kleiner oder gleich $90^\circ/N$.

Nach Ermittlung der jeweiligen Soll-Ist-Abweichungen $\Delta(m,i,j,k)$ an den vorgegebenen Tastpositionen der vorgegebenen Zahnflanken wird eine rotatorische Nullpunktverschiebung auf Grundlage der ermittelten Soll-Ist-Abweichungen $\Delta(m,i,j,k)$ ermittelt. Hierzu können die ermittelten Soll-Ist-Abweichungen $\Delta(m,i,j,k)$ als Funktion der ein-parametrischen rotatorischen Nullpunktverschiebung angesehen werden, wobei die Nullpunktverschiebung einer positiven bzw. negativen Rotation des Zahnrads um die Rotationsachse des Zahnrads angesehen werden kann, wobei die ermittelten Soll-Ist-Abweichungen $\Delta(m,i,j,k)$ den Funktionswerten bei einer Nullpunktverschiebung gleich Null entsprechen. Durch Simulationsrechnung können die jeweiligen Funktionswerte der Soll-Ist-Abweichungen als Funktion der Nullpunktverschiebung variiert werden, um eine optimale rotatorische Nullpunktverschiebung durch Bestimmung eines Fit-Werts bzw. Best-Fit-Werts mittels einer mathematischen Ausgleichsrechnung ermitteln zu können. Die Nullpunktverschiebung kann hierbei z.B. durch einen Winkelwert θ angegeben werden (oder auch durch eine Positionsangabe der Rundachse B des Drehtischs 120 im Werkzeugmaschinenkoordinatensystem), wobei die Soll-Ist-Abweichungen als Funktion $\Delta(m,i,j,k)(\theta)$ des Winkelwerts θ simuliert werden können und die ermittelten Soll-Ist-Abweichungen die Funktionswerte $\Delta(m,i,j,k)(0)$ bei $\theta = 0$ darstellen.

Zur Bestimmung dieses Fit-Werts bzw. Best-Fit-Werts kann hierbei vorzugsweise ein Distanzwert $D(\theta)$ auf Grundlage der ermittelten Soll-Ist-Abweichungen errechnet werden, wobei der Distanzwert $D(\theta)$ vorzugsweise einen die Größe der Gesamtabweichung unter Berücksichtigung aller ermittelten Soll-Ist-Abweichungen beschreibenden Wert darstellt. In dem mathematischen Ausgleichsverfahren wird dann vorzugsweise durch Variation der rotatorischen

Nullpunktverschiebung θ automatisch dieser Distanzwert minimiert, und der Wert der rotatorischen Nullpunktverschiebung bei minimiertem Distanzwert ergibt dann im Rahmen dieser mathematischen Ausgleichsrechnung die ermittelte optimierte rotatorische Nullpunktverschiebung zur Verwendung bei der späteren Endbearbeitung des Zahnrads.

5

Da die Soll-Ist-Abweichungen wiederum als Funktionen in Abhängigkeit der Nullpunktverschiebung θ definiert werden können, kann dieser definierte Distanzwert $D(\theta)$ als Funktion der Nullpunktverschiebung θ angesehen werden und durch simulierte Variation der Nullpunktverschiebung θ minimiert werden, um die optimierte rotatorische
10 Nullpunktverschiebung zu ermitteln, die dann der Endbearbeitung des eingespannten Zahnrads auf Grundlage der numerischen Steuerdaten zur Endbearbeitung zu Grunde gelegt werden soll.

Hierbei ist zu beachten, dass die Werte der einzelnen Soll-Ist-Abweichungen sowohl positive als auch negative Werte annehmen können. Aus diesem Grunde sollte der Distanzwert
15 auf Grundlage der Soll-Ist-Abweichungen vorzugsweise derart gewählt werden, dass er als Funktion der Beträge der Soll-Ist-Abweichungen oder bevorzugt als Funktion der Quadrate der Soll-Ist-Abweichungen beschrieben werden kann.

Der Distanzwert kann z.B. auf Grundlage der Soll-Ist-Abweichungen vorzugsweise derart
20 gewählt werden, dass der Wert des Distanzwerts streng monoton steigt mit dem Betrag jeder einzelnen Soll-Ist-Abweichung oder bevorzugt mit dem Quadrat jeder einzelnen Soll-Ist-Abweichung. Zweckmäßigerweise könnte der Distanzwert als streng monoton steigende Funktion der Summe der Beträge aller Soll-Ist-Abweichungen (z.B. $D(\theta) = \sum |\Delta(m,i,j,k)(\theta)|$ für alle Tastpositionen, d.h. alle m , i , j , und k) oder bevorzugt als streng monoton steigende Funktion der
25 Summe der Quadrate aller Soll-Ist-Abweichungen definiert werden (z.B. $D(\theta) = \sum [\Delta(m,i,j,k)(\theta)]^2$ oder auch $D(\theta) = \sqrt{\sum [\Delta(m,i,j,k)(\theta)]^2}$, d.h. als Quadratwurzel der Summe aller Quadrate der einzelnen Soll-Ist-Abweichungen, für alle Tastpositionen, d.h. alle m , i , j , und k). Wie bereits erwähnt kann dann in einem mathematischen Ausgleichsverfahren eine optimierte Nullpunktverschiebung ermittelt werden durch Minimierung des Distanzwerts $D(\theta)$ bei simulierter
30 Variation der Nullpunktverschiebung θ .

In besonders bevorzugten Ausführungsbeispielen ist es zusätzlich oder alternativ zur gemeinsamen Auswertung auch möglich, die linken und rechten Zahnflanken jeweils getrennt
35 auszuwerten, und für die rechten und die linken eine jeweilige eigene optimierte Nullpunktverschiebung zu ermitteln. In diesem Falle würden dann zwei separate Distanzwerte $D1(\theta)$ und $D2(\theta)$ definiert, jeweils einer für die rechten und einer für die linken Zahnflanken, und diese Distanzwerte würden dann getrennt voneinander minimiert werden. Hierbei könnten die Distanzwerte analog zu der gemeinsamen Auswertung wie vorstehend beschrieben definiert

werden, jedoch immer nur jeweils für die linken oder rechten Zahnflanken ausgewertet werden (z.B. $D1(\theta) = \sum |\Delta(m,i,j,R)(\theta)|$, $D1(\theta) = \sum [\Delta(m,i,j,R)(\theta)]^2$ oder auch $D(\theta) = \sqrt{\sum [\Delta(m,i,j,R)(\theta)]^2}$ für alle rechten Tastpositionen, d.h. alle m, i, und j mit festgehaltenem $k = R$ und $D2(\theta) = \sum |\Delta(m,i,j,L)(\theta)|$, $D2(\theta) = \sum [\Delta(m,i,j,L)(\theta)]^2$ oder auch $D2(\theta) = \sqrt{\sum [\Delta(m,i,j,L)(\theta)]^2}$ für alle linken
5 Tastpositionen, d.h. alle m, i, und j mit festgehaltenem $k = L$). Die Distanzwerte D1 und D2 können dann getrennt voneinander minimiert werden, so dass zwei unabhängige optimierte Nullpunktverschiebungen für die rechten und linken Zahnflanken ermittelt werden können.

Dies hat den Vorteil, dass die Endbearbeitung des Zahnrads weiter verbessert werden
10 kann. Sollte nämlich die Bestimmung einer einzigen rotatorischen Nullpunktverschiebung bei gemeinsamer Auswertung der Soll-Ist-Abweichungen der linken und rechten Zahnflanken zu einem Ergebnis führen, bei dem noch nach Endverarbeitung aufgrund eines zu großen und zu unterschiedlichen Wärmeverzugs der Zahnflanken Stellen mit zu viel Materialabtrag und/oder Stellen mit zu wenig oder keinem Materialabtrag auftreten sollten, kann dies bei getrennter
15 Auswertung der linken und rechten Zahnflanken und Ermittlung der ersten Nullpunktverschiebung für die linken Zahnflanken und zweiten Nullpunktverschiebung für die rechten Zahnflanken verbessert vermieden werden.

In weiteren bevorzugten Ausführungsbeispielen wird die ermittelte Nullpunktverschiebung
20 bzw. die rotatorischen Nullpunktverschiebungen für die linken und rechten Zahnflanken noch einmal automatisch in der Maschinensteuerungseinrichtung 150 überprüft. Hierbei wird vorzugsweise für jede Tastposition in einem Simulationsvorgang auf Basis der Steuerdaten für die Endbearbeitung und/oder auf Basis eines virtuellen Modells des Zahnrads nach Endbearbeitung überprüft, ob und/oder wie viel Material an der Tastposition unter Berücksichtigung der
25 ermittelten Nullpunktverschiebung bzw. der rotatorischen Nullpunktverschiebungen für die linken und rechten Zahnflanken bei der Endbearbeitung abgetragen wird. In Abhängigkeit der folgend beschriebenen Kriterien kann hierbei überprüft werden, ob an den jeweiligen Tastpositionen Material abgetragen wird, und/oder ob an den jeweiligen Tastpositionen eine vorgegebene minimale Materialabtragstiefe eingehalten wird. Nach Maßgabe der folgenden Kriterien kann die
30 ermittelte Nullpunktverschiebung nochmals korrigiert werden (ggf. für die linken und rechten Zahnflanken getrennt) und erneut überprüft werden.

Vorzugsweise ist die Maschinensteuerungseinrichtung 150 dazu eingerichtet, die
35 zumindest eine rotatorische Nullpunktverschiebung des an dem Einspannmittel eingespannten Zahnrads unter der Maßgabe zu ermitteln, bei Endbearbeitung des Zahnrads an jeder Tastposition Material abzutragen. Dies kann dadurch auf einfache Weise ermöglicht werden, indem die bestimmte rotatorische Nullpunktverschiebung zum Beispiel für alle ermittelten Soll-Ist-Abweichungen überprüft wird, um herauszufinden, ob an einer oder mehreren der Tastpositionen

die ermittelte Nullpunktverschiebung nicht ausreichend ist, um an dieser Tastposition bei Endbearbeitung Material abzutragen. Auf Grundlage dieser Überprüfung kann dann die ermittelte Nullpunktverschiebung ggf. noch leicht korrigiert werden, um auch an diesen Tastpositionen Material abzutragen zu können, wobei bevorzugt noch erneut überprüft werden sollte, ob diese
5 Korrektur nicht dazu führen könnte, dass dann an anderen Tastpositionen kein Material abgetragen wird. Durch das Ermitteln einer Nullpunktverschiebung bzw. korrigierten Nullpunktverschiebung, bei der während der Endbearbeitung an allen Tastpositionen Material abgetragen wird, kann es insbesondere verbessert vermieden werden, dass überhaupt Stellen auf Zahnflanken auftreten, an denen kein Material abgetragen wird.

10

In ähnlicher Weise ist es wie folgend beschrieben auch möglich, Maßgaben einer minimalen Materialabtragungstiefe bei der Endbearbeitung für die Ermittlung der rotatorischen Nullpunktverschiebung vorzugeben. Diese kann ggf. durch einen Benutzer erneut über ein Eingabemittel oder in Datenform über eine Datenschnittstelle vorgegeben werden.

15

Vorzugsweise ist die Maschinensteuerungseinrichtung dazu eingerichtet, die zumindest eine rotatorische Nullpunktverschiebung des an dem Einspannmittel eingespannten Zahnrads unter Berücksichtigung einer vorgegebenen minimalen Materialabtragungstiefe zu ermitteln, mit der Maßgabe, bei Endbearbeitung des Zahnrads an jeder Tastposition mindestens Material bis zu der
20 vorgegebenen minimalen Materialabtragungstiefe abzutragen.

In den vorstehenden Ausführungsbeispielen wurde detailliert eine mathematische Ausgleichsmethode zur Bestimmung einer rotatorischen Nullpunktverschiebung bzw. zur Bestimmung zweier rotatorischer Nullpunktverschiebungen für die linken bzw. rechten
25 Zahnflanken getrennt voneinander beschrieben. In alternativen Ausführungsbeispielen ist es weiterhin möglich, ohne mathematische Ausgleichsmethode erfindungsgemäß eine oder zwei Nullpunktverschiebungen zu ermitteln.

Für die Bestimmung der rotatorischen Nullpunktverschiebung kann die rotatorische
30 Nullpunktverschiebung zum Beispiel gemäß einem besonders zweckmäßigen Beispiel auf einfache Weise derart ermittelt bzw. berechnet werden, dass in einer Simulation durch Variation der rotatorischen Nullpunktverschiebung überprüft wird, welche rotatorische Nullpunktverschiebung θ mindestens erforderlich ist, um alle Soll-Ist-Abweichungen $\Delta(m,i,j,k)(\theta)$ größer oder gleich Null werden zu lassen bzw. welche rotatorischen Nullpunktverschiebungen θ_1
35 und θ_2 erforderlich sind, um alle Soll-Ist-Abweichungen $\Delta(m,i,j,L)(\theta_1)$ und $\Delta(m,i,j,R)(\theta_2)$ größer oder gleich Null werden zu lassen (letzteres bei getrennter Auswertung der linken und rechten Zahnflanken).

Insbesondere ist es zum Beispiel möglich auf besonders einfache Weise zu ermitteln, welche Nullpunktverschiebung erforderlich ist, um die kleinste der ermittelten Soll-Ist-Abweichungen größer oder gleich Null werden zu lassen, und diesen Wert als die ermittelte rotatorische Nullpunktverschiebung zu erfassen.

5

Wahlweise zu den vorstehenden Aspekten ist es bevorzugt auch möglich, zusätzlich ein Mindestaufmaß vorzugeben, wobei die rotatorische Nullpunktverschiebung dann derart ermittelt werden kann, dass in einer Simulation durch Variation der rotatorischen Nullpunktverschiebung überprüft wird, welche rotatorische Nullpunktverschiebung mindestens erforderlich ist, um alle

10 Soll-Ist-Abweichungen größer oder gleich des vorgegebenen Mindestaufmaßes werden zu lassen. Insbesondere ist es zum Beispiel bevorzugt möglich auf besonders einfache Weise zu ermitteln, welche Nullpunktverschiebung erforderlich ist, um die kleinste der ermittelten Soll-Ist-Abweichungen größer oder gleich des vorgegebenen Aufmaßes werden zu lassen, und diesen Wert als die ermittelte rotatorische Nullpunktverschiebung zu erfassen.

15

Bei den vorstehend beschriebenen Ausführungsbeispielen zur Ermittlung der rotatorischen Nullpunktverschiebung ist es zu berücksichtigen, dass eine rotatorische Nullpunktverschiebung bei der vorstehend genannten Definition der Vorzeichen der Soll-Ist-Abweichungen die Soll-Ist-Abweichungen auf rechten Flanken verkleinert, während sie die Soll-Ist-Abweichungen auf linken Flanken vergrößert, bzw. die Soll-Ist-Abweichungen auf rechten Flanken vergrößert, während sie die Soll-Ist-Abweichungen auf linken Flanken verkleinert. Falls es nicht

20 möglich ist, rechte und linke Zahnflanken mittels der gleichen rotatorischen Nullpunktverschiebung einzustellen, ist es in weiteren Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung vorgesehen, rechte und linke Flanken getrennt voneinander auszuwerten und

25 getrennte rotatorische Nullpunktverschiebungen zu ermitteln.

Fig. 5 zeigt ein beispielhaftes Ablaufdiagramm eines Ausrichtvorgangs zur Endbearbeitung eines Zahnrads gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. In einem Schritt S1 wird das zuvor weichbearbeitete und einer härtenden Wärmebehandlung unterzogene

30 Zahnrad 200 an dem Einspannmittel 130 der Werkzeugmaschine eingespannt. In einem weiteren Schritt S2 (der alternativ auch vor S1 ausgeführt werden kann), werden Tastdaten für einen Abtastvorgang des Zahnrads 200 vorgegeben. Diese können entweder über die Schnittstelle 170 oder auch manuell über die Bedieneinrichtung 160 vorgegeben werden bzw. es können über die Schnittstelle 170 oder auch manuell über die Bedieneinrichtung 160 Tastpositionen vorgegeben

35 werden, wobei die weiteren Tastdaten auf Grundlage der Tastpositionen und eines virtuellen Modells des Zahnrads 200 automatisch erzeugt werden. Nach Vorgeben der Tastdaten wird im nächsten Schritt S3 der Abtastvorgang durchgeführt, in dem alle Tastpositionen des Zahnrads 200 mittels des Messtasters 140 abgetastet werden, um an den jeweiligen Tastpositionen die

dazugehörigen Istpositionen zu ermitteln.

Nach dem Ermitteln der jeweiligen Istpositionen an allen vorgegebenen Tastpositionen werden im nächsten Schritt S4 auf Grundlage von vorgegebenen Sollpositionen und der
5 ermittelten Istpositionen für alle Tastpositionen jeweilige Soll-Ist-Abweichungen berechnet, und im darauf folgenden Schritt S5 mittels einer mathematischen Ausgleichsrechnung eine Nullpunktverschiebung oder zwei Nullpunktverschiebungen für die rechten und linken Zahnflanken getrennt ermittelt. Auf den Schritt S5 folgend wird automatisch die Endbearbeitung des Zahnrads 200 an der Werkzeugmaschine 100 auf Grundlage von numerischen Steuerdaten
10 für die Endbearbeitung durchgeführt, wobei die im Schritt S5 ermittelten rotatorischen Nullpunktverschiebungen berücksichtigt werden.

Zusammenfassend ermöglicht es die vorliegende Erfindung im Hinblick auf die vorstehend bereits beschriebenen, im Zusammenhang mit einem Ausrichtvorgang zur
15 Bestimmung einer rotatorischen Nullpunktverschiebung auftretenden Probleme der aus dem Stand der Technik bekannten Ausrichtverfahren, einen verbesserten Ausrichtvorgang für weichbearbeitete und einer Wärmebehandlung unterzogene Zahnräder an einer Werkzeugmaschine bereitzustellen, bei dem die vorstehend beschriebenen Nachteile vermieden werden können, und bei dem die rotatorische Nullpunktverschiebung insbesondere bei sehr
20 großen Zahnrädern mit Durchmessern von bis zu über einem Meter immer noch vorteilhafte Ergebnisse liefern kann, so dass bei der Endbearbeitung vermieden werden kann, dass an Zahnflanken Stellen auftreten, an denen zu viel und/oder zu wenig Material abgetragen wird.

Ansprüche

1. Numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine mit zumindest 5-Achsen zur
5 zerspanenden Bearbeitung eines an einem Einspannmittel (130) der Werkzeugmaschine (100)
eingespannten Werkstücks (200) mittels eines an einer Arbeitsspindel (111) der
Werkzeugmaschine (100) aufgenommenen Werkzeugs, umfassend:

eine numerische Maschinensteuerungseinrichtung (150), die dazu eingerichtet ist, das an
der Arbeitsspindel (111) der Werkzeugmaschine (100) aufgenommene Werkzeug relativ zu dem
10 an dem Einspannmittel (130) der Werkzeugmaschine (100) eingespannten Werkstück (200) auf
Grundlage numerischer Steuerdaten zu steuern,

wobei die Maschinensteuerungseinrichtung (150) weiterhin dazu eingerichtet ist, einen
automatischen rotatorischen Ausrichtvorgang zur Bestimmung einer rotatorischen
Nullpunktverschiebung für eine Endbearbeitung eines an dem Einspannmittel (130)
15 eingespannten Zahnrads (200) zu steuern, in welchem:

- ein von der Maschinensteuerungseinrichtung (150) gesteuertes Messtastmittel (140) bei
einer Mehrzahl von Zahnflanken (201a, 201b; 201b, 202a) des Zahnrads (200) an einer
Mehrzahl von vorgegebenen Tastpositionen auf jeder der Zahnflanken eine jeweilige Istposition
ermittelt,

20 - die Maschinensteuerungseinrichtung (150) für jede der vorgegebenen Tastpositionen die
ermittelte Istposition mit einer jeweiligen vorgegebenen Sollposition vergleicht und für jede
Tastposition eine Soll-Ist-Abweichung auf Grundlage des Vergleichs ermittelt, und

- die Maschinensteuerungseinrichtung (150) auf Grundlage der bestimmten Soll-Ist-
Abweichungen zumindest eine rotatorische Nullpunktverschiebung für die Endbearbeitung des an
25 dem Einspannmittel (130) eingespannten Zahnrads (200) ermittelt.

2. Werkzeugmaschine nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass
die Maschinensteuerungseinrichtung (150) dazu eingerichtet ist, nach dem
automatischen Ausrichtvorgang automatisch die Endbearbeitung des eingespannten Zahnrads
30 (200) auf Grundlage von für die Endbearbeitung vorgegebenen Steuerdaten zu steuern, wobei die
zumindest eine ermittelte rotatorische Nullpunktverschiebung automatisch beim Steuern der
Endbearbeitung des Zahnrads (200) berücksichtigt wird.

3. Werkzeugmaschine nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass
35 die Mehrzahl von Zahnflanken eine Gruppe von linken Zahnflanken (201a) und eine
Gruppe von rechten Zahnflanken (201b) umfassen,

wobei die Maschinensteuerungseinrichtung (150) dazu eingerichtet ist, die für die Gruppe
von linken Zahnflanken ermittelten Soll-Ist-Abweichungen und die für die Gruppe von rechten

Zahnflanken ermittelten Soll-Ist-Abweichungen getrennt auszuwerten.

4. Werkzeugmaschine nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Maschinensteuerungseinrichtung (150) dazu eingerichtet ist, eine erste Nullpunktverschiebung für die Gruppe von linken Zahnflanken und eine zweite Nullpunktverschiebung für die Gruppe von rechten Zahnflanken zu ermitteln.

5. Werkzeugmaschine nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Maschinensteuerungseinrichtung (150) dazu eingerichtet ist, nach dem automatischen Ausrichtvorgang automatisch die Endbearbeitung des eingespannten Zahnrads (200) auf Grundlage von für die Endbearbeitung vorgegebenen Steuerdaten zu steuern, wobei die erste ermittelte rotatorische Nullpunktverschiebung automatisch beim Steuern der Endbearbeitung der linken Zahnflanken (201a) berücksichtigt wird und die zweite ermittelte rotatorische Nullpunktverschiebung automatisch beim Steuern der Endbearbeitung der rechten Zahnflanken (201b) berücksichtigt wird.

6. Werkzeugmaschine nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass

die Mehrzahl von Tastpositionen einer Zahnflanke in Zeilen (L1-L4), die in Zahnbreitenrichtung (ZB) verlaufen, und Spalten (S1-S6), die in Zahnhöhenrichtung (ZH) verlaufen, auf der Zahnflanke angeordnet sind,

wobei das von der Maschinensteuerungseinrichtung (150) gesteuerte Messtastmittel (140) die Tastpositionen einer Zahnflanke spaltenweise abtastet, indem Tastpositionen einer Spalte hintereinander abgetastet werden und nach Abtasten der Tastpositionen der Spalte die Tastpositionen einer benachbarten Spalte abgetastet werden.

7. Werkzeugmaschine nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass das Messtastmittel (140) die Tastpositionen einer Spalte in Richtung zum Zahngrund hin abtastet, indem für jede Spalte zuerst die dem Zahnkopf am Nächsten liegende Tastposition abgetastet wird und die die dem Zahngrund am Nächsten liegende Tastposition zuletzt abgetastet wird,

wobei die Maschinensteuerungseinrichtung (150) das Tastmittel nach Abtasten der dem Zahngrund am Nächsten liegende Tastposition einer Spalte im Eilgang zu der dem Zahnkopf am Nächsten liegenden Tastposition der benachbarten Spalte steuert.

8. Werkzeugmaschine nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass

die Mehrzahl von Zahnflanken eine erste Zahnflanke und eine zweite Zahnflanke umfasst,

wobei die erste und zweiten Zahnflanken entweder beide linke Zahnflanken oder beide rechte Zahnflanken sind, und

wobei die erste Zahnflanke auf einer ersten Seite des Zahnrads angeordnet ist, die einer zweiten Seite des Zahnrads, auf der die zweite Zahnflanke angeordnet ist, in Bezug auf die

5 Zahnradachse im Wesentlichen radial gegenüberliegt; oder

die Mehrzahl von Zahnflanken eine Gruppe von N Zahnflanken umfasst, wobei die N Zahnflanken der Gruppe entweder alle linke Zahnflanken sind oder alle rechte Zahnflanken sind, und

10 wobei die N Zahnflanken der Gruppe umfänglich des Zahnrads mit im Wesentlichen jeweils gleichbleibendem Winkelabstand zwischen einander angeordnet sind.

9. Werkzeugmaschine nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass

15 die Maschinensteuerungseinrichtung (150) dazu eingerichtet ist, das Messtastmittel zum Abtasten der Tastpositionen auf Grundlage von Tastdaten zu steuern,

wobei die Tastdaten für jede Tastposition eine vorgegebene Zielposition, eine vorgegebene Tastrichtung und eine vorgegebene Orientierungsrichtung für das Messtastmittel angeben.

20 10. Werkzeugmaschine nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass

25 die Tastdaten für alle Tastpositionen einer Zahnflanke die gleiche vorgegebene Orientierungsrichtung für das Messtastmittel (140) angeben, so dass die Maschinensteuerungseinrichtung (150) das Messtastmittel (140) derart steuert, dass die Orientierungsrichtung des Messtastmittels (140) beim Abtastvorgang der Tastpositionen einer Zahnflanke unverändert bleibt.

11. Werkzeugmaschine nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, dass

30 die zumindest 5-Achsen der Werkzeugmaschine (100) zumindest zwei Rundachsen umfassen, wobei die vorgegebene Orientierungsrichtung der Tastdaten für eine Tastposition eine Stellungsvorgabe für die zumindest zwei Rundachsen der Werkzeugmaschine beim Abtasten der Zahnflanke an der Tastposition angibt.

12. Werkzeugmaschine nach einem der Ansprüche 9 bis 11, weiter gekennzeichnet durch

35 ein Eingabemittel (160, 162a, 162b), über das ein Benutzer für eine oder mehrere Zahnflanken eine jeweilige Mehrzahl von Tastpositionen vorgeben kann, und/oder

ein Schnittstellenmittel (170), über das Tastpositionsdaten eingegeben werden können, die für eine oder mehrere Zahnflanken eine jeweilige Mehrzahl von Tastpositionen vorgeben,

wobei die Maschinensteuereinrichtung (150) dazu eingerichtet ist, auf Grundlage der vorgegebenen Tastpositionen die Tastdaten automatisch zu erzeugen.

13. Werkzeugmaschine nach einem der Ansprüche 9 bis 12, dadurch gekennzeichnet,
5 dass

die jeweilige vorgegebene Tastrichtung für jede Tastposition auf einer Zahnflanke jeweils parallel zu einem Normalenvektor ausgerichtet ist, der an der jeweiligen Tastposition auf der Zahnflanke senkrecht steht.

14. Werkzeugmaschine nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass

10 die Maschinensteuerungseinrichtung (150) dazu eingerichtet ist, die zumindest eine rotatorische Nullpunktverschiebung des an dem Einspannmittel (130) eingespannten Zahnrads (200) unter der Maßgabe zu ermitteln, bei Endbearbeitung des Zahnrads (200) an jeder
15 Tastposition Material abzutragen.

15. Werkzeugmaschine nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass

20 die Maschinensteuerungseinrichtung (150) dazu eingerichtet ist, die zumindest eine rotatorische Nullpunktverschiebung des an dem Einspannmittel (130) eingespannten Zahnrads (200) unter Berücksichtigung einer vorgegebenen minimalen Materialabtragstiefe zu ermitteln, mit der Maßgabe, bei Endbearbeitung des Zahnrads (200) an jeder Tastposition mindestens Material bis zu der vorgegebenen minimalen Materialabtragstiefe abzutragen.

25 16. Verfahren zum Steuern eines automatischen rotatorischen Ausrichtvorgangs zur Bestimmung einer rotatorischen Nullpunktverschiebung für eine Endbearbeitung eines Zahnrads (200) an einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine (100) nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, umfassend:

30 - Ermitteln (S3) einer jeweiligen Istposition an einer Mehrzahl von vorgegebenen Tastpositionen auf jeder Zahnflanke einer Mehrzahl von Zahnflanken des Zahnrads (200) mittels eines Messtastmittels (140),

- Vergleichen der ermittelten Istposition für jede der vorgegebenen Tastpositionen mit einer jeweiligen vorgegebenen Sollposition,

35 - Ermitteln (S4) einer Soll-Ist-Abweichung auf Grundlage des Vergleichs für jede Tastposition, und

- Ermitteln (S5) zumindest einer rotatorischen Nullpunktverschiebung für die Endbearbeitung des an dem Einspannmittel (130) eingespannten Zahnrads (200) auf Grundlage der bestimmten Soll-Ist-Abweichungen.

17. Computerprogrammprodukt, das ein computerlesbares Medium und ein darin gespeichertes Computerprogramm umfasst, wobei das Computerprogramm in der Form einer Abfolge von Zuständen gespeichert ist, die Befehlen entspricht, die eingerichtet sind von einer
5 Maschinensteuerungseinrichtung (150) einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine (100) verarbeitet zu werden, so dass die Maschinensteuerungseinrichtung (150) auf Grundlage der Befehle ein Verfahren nach Anspruch 16 an der Werkzeugmaschine (100) steuert.

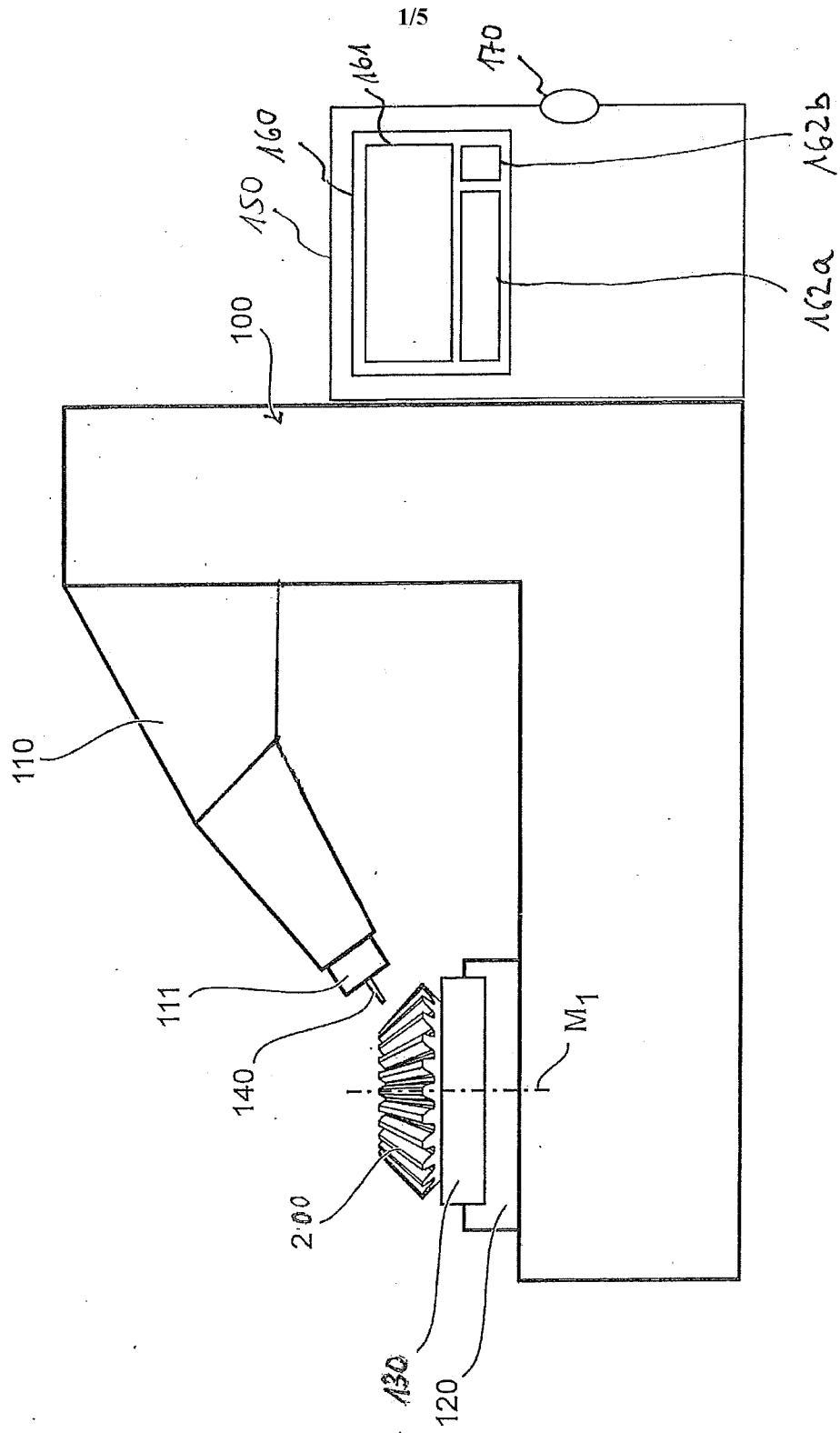
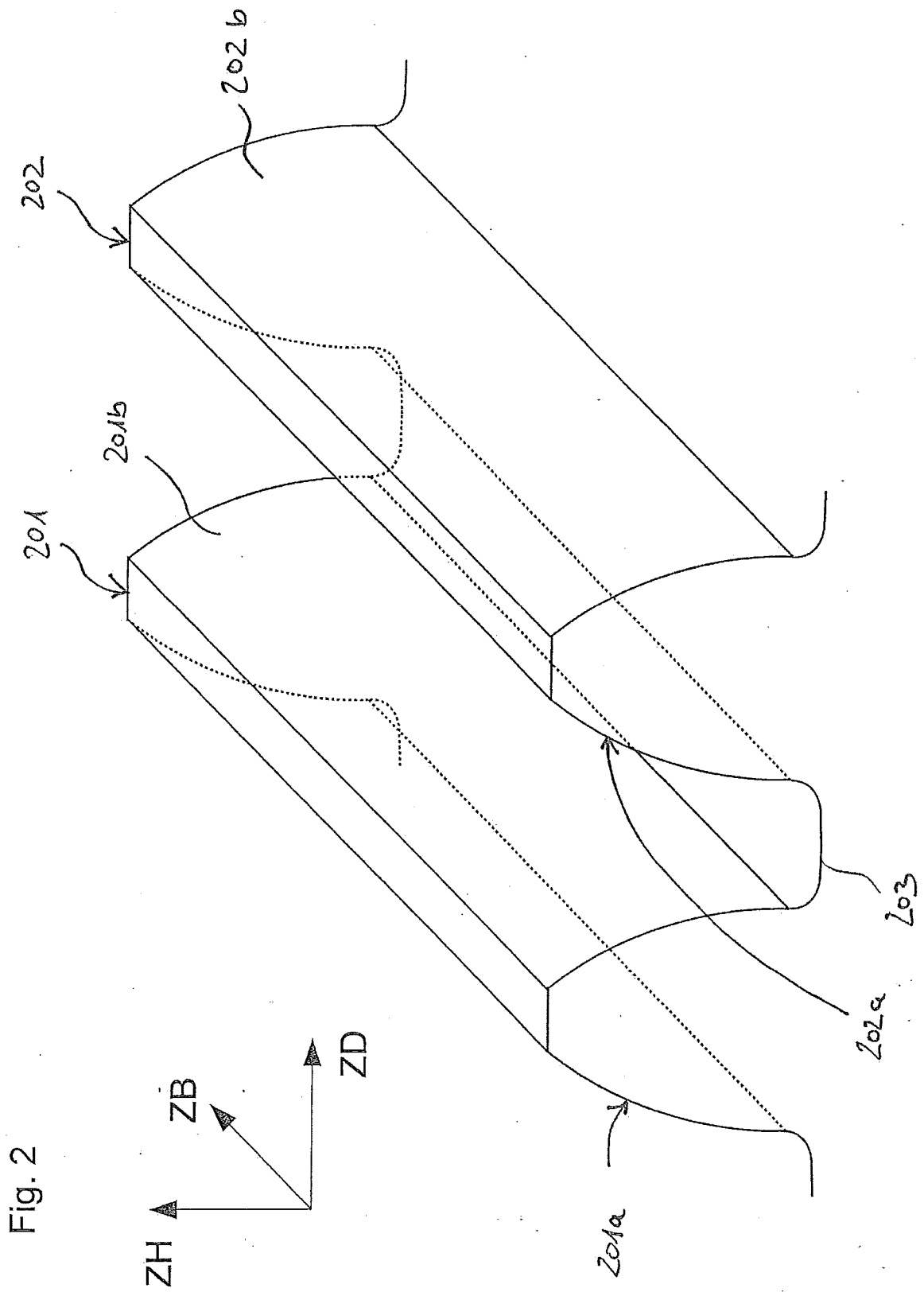


FIG. 1



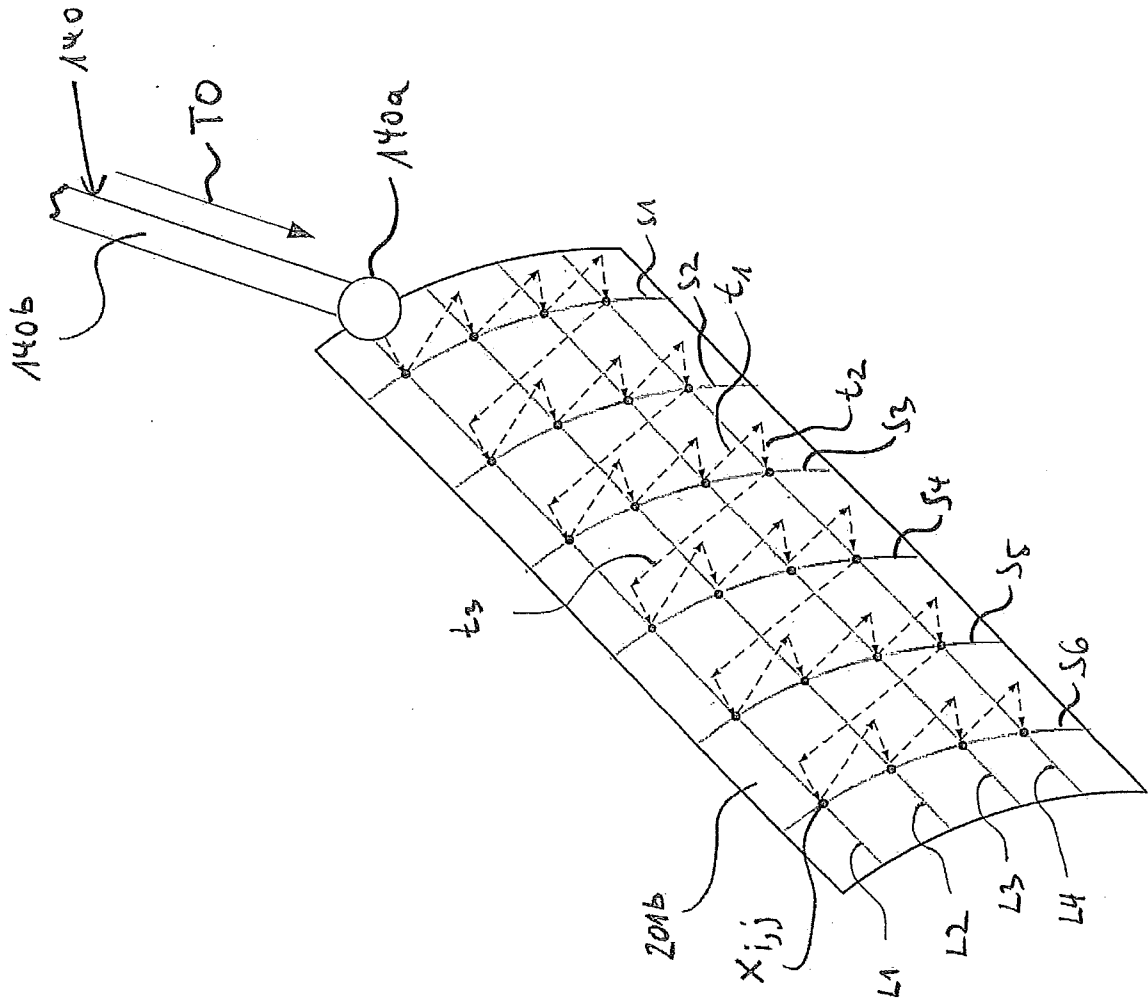


Fig. 3

$$j = 6 (S6)$$

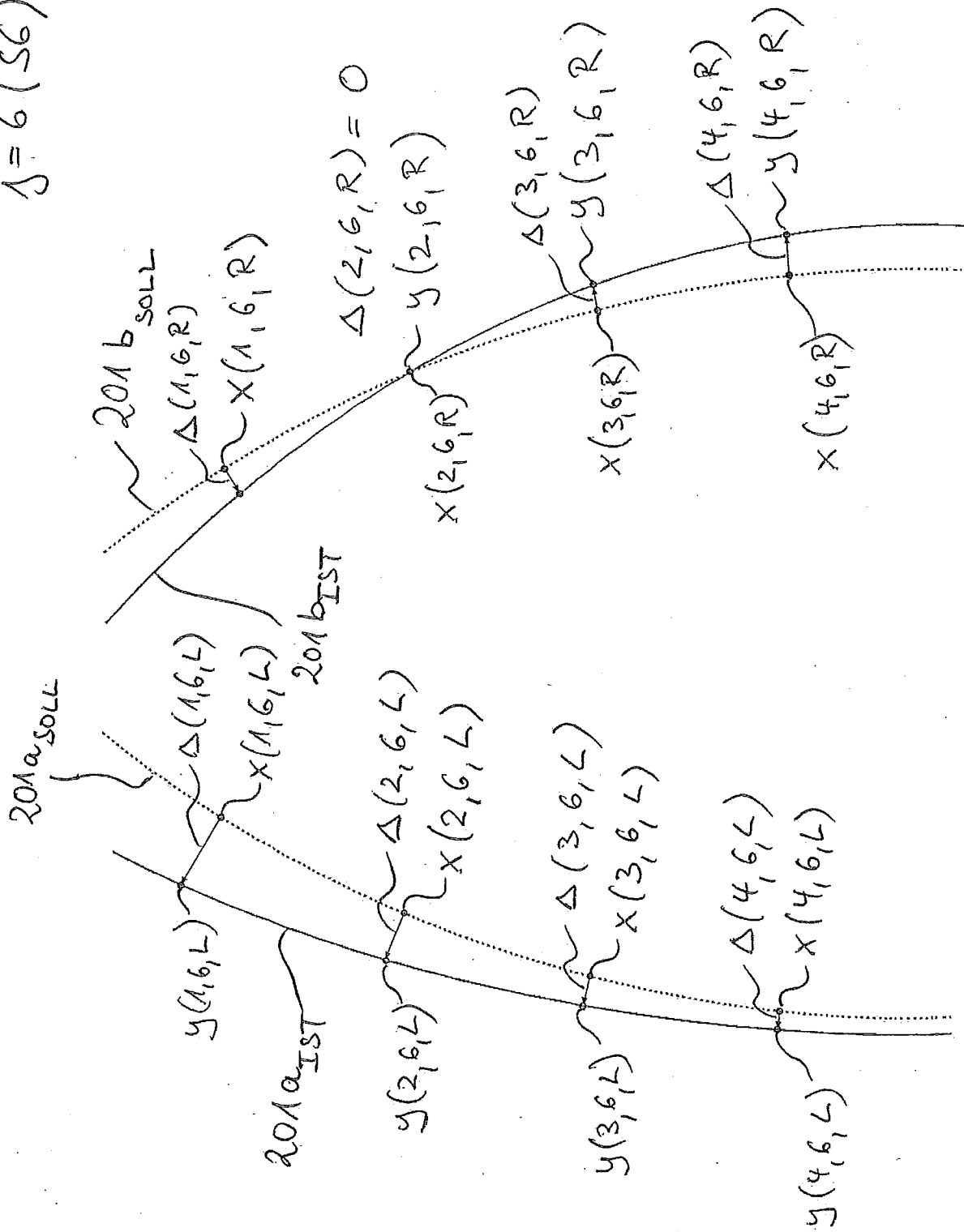
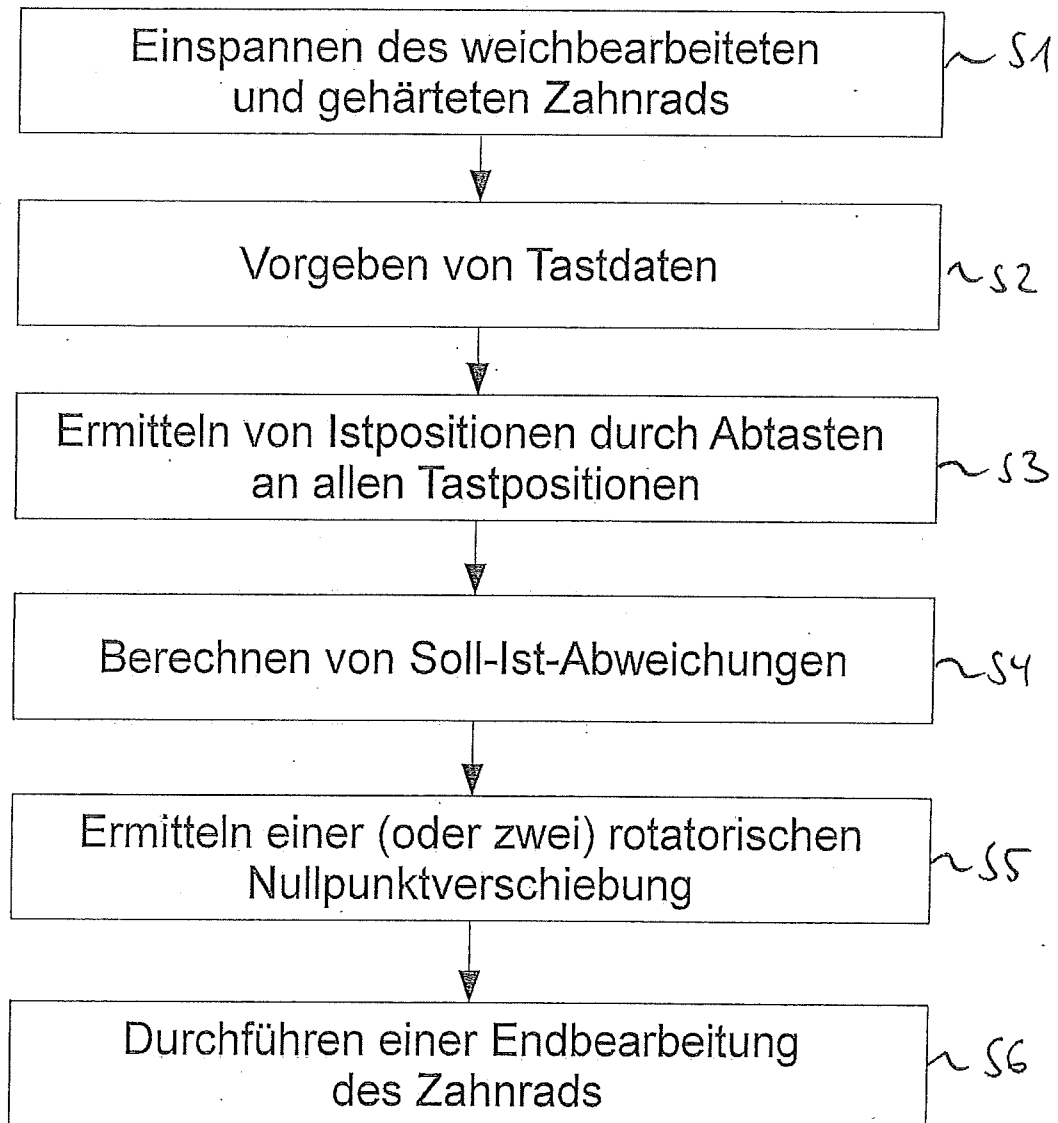


Fig. 4

Fig. 5



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2013/052263

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G05B19/401
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G05B G01B B23F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	DE 43 05 408 A1 (SUMITOMO HEAVY INDUSTRIES [JP]) 25 August 1994 (1994-08-25) column 1, lines 3-11 column 1, line 61 - column 2, line 24 column 2, line 52 - column 6, line 47 figures 5-7 ----- -/--	1-5, 8-12,16 6,7,9, 10,13,14

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

<p>"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>"&" document member of the same patent family</p>
---	---

Date of the actual completion of the international search 16 April 2013	Date of mailing of the international search report 23/04/2013
Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer Hristov, Stefan

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2013/052263

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	<p>EP 2 216 698 A2 (DECKEL MAHO PFRONTEN GMBH [DE]) 11 August 2010 (2010-08-11)</p> <p>paragraph [0001] paragraph [0007] paragraph [0021] - paragraph [0024] paragraph [0027] - paragraph [0032] paragraph [0037] - paragraph [0044] paragraph [0052] paragraph [0058] paragraph [0065] paragraph [0072] - paragraph [0078] paragraph [0080] - paragraph [0086] paragraph [0094] - paragraph [0096]</p> <p>-----</p>	1,2,9, 11,12, 16,17
X	<p>DE 10 2007 016056 A1 (SAUER GMBH LASERTEC [DE]) 9 October 2008 (2008-10-09)</p> <p>paragraph [0001] paragraph [0004] - paragraph [0017] paragraph [0025] - paragraph [0039]</p> <p>-----</p>	1,2,12, 16
X	<p>EP 2 325 711 A1 (RENISHAW PLC [GB]) 25 May 2011 (2011-05-25)</p> <p>paragraph [0001] paragraph [0005] paragraph [0007] - paragraph [0025] paragraph [0031] - paragraph [0035] paragraph [0039] - paragraph [0044] paragraph [0048] - paragraph [0055]</p> <p>-----</p>	1,2,12, 16
Y	<p>WO 2011/077792 A1 (MITSUBISHI HEAVY IND LTD [JP]; HIRONO YOKO [JP]; TOKAWA TAKAHIDE [JP];) 30 June 2011 (2011-06-30) figures 1-3 & US 2012/247199 A1 (HIRONO YOKO [JP] ET AL) 4 October 2012 (2012-10-04) paragraph [0010] - paragraph [0011] paragraph [0054] - paragraph [0060]; figures 1-3</p> <p>-----</p>	6,7,9, 10,13
Y	<p>DE 199 28 500 A1 (REISHAUER AG [CH]) 28 December 2000 (2000-12-28) column 1, lines 30-38 column 1, line 53 - column 2, line 22 column 3, line 56 - column 4, line 39 claims 1-8</p> <p>-----</p>	14

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2013/052263

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
DE 4305408	A1	25-08-1994	NONE
EP 2216698	A2	11-08-2010	CN 101813931 A 25-08-2010 DE 102009008121 A1 19-08-2010 EP 2216698 A2 11-08-2010 JP 2010225141 A 07-10-2010 US 2010228384 A1 09-09-2010
DE 102007016056	A1	09-10-2008	AT 495853 T 15-02-2011 DE 102007016056 A1 09-10-2008 EP 2142338 A1 13-01-2010 JP 2010523947 A 15-07-2010 US 2010176099 A1 15-07-2010 WO 2008119549 A1 09-10-2008
EP 2325711	A1	25-05-2011	AT 552541 T 15-04-2012 CN 101027616 A 29-08-2007 EP 1787176 A2 23-05-2007 EP 2325711 A1 25-05-2011 JP 2008511454 A 17-04-2008 US 2009112357 A1 30-04-2009 WO 2006024844 A2 09-03-2006
WO 2011077792	A1	30-06-2011	CN 102639957 A 15-08-2012 EP 2518435 A1 31-10-2012 JP 2011133237 A 07-07-2011 US 2012247199 A1 04-10-2012 WO 2011077792 A1 30-06-2011
DE 19928500	A1	28-12-2000	DE 19928500 A1 28-12-2000 IT T020000588 A1 17-12-2001 JP 2001030112 A 06-02-2001 US 6577917 B1 10-06-2003

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2013/052263

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES

INV. G05B19/401

ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)

G05B G01B B23F

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X Y	DE 43 05 408 A1 (SUMITOMO HEAVY INDUSTRIES [JP]) 25. August 1994 (1994-08-25) Spalte 1, Zeilen 3-11 Spalte 1, Zeile 61 - Spalte 2, Zeile 24 Spalte 2, Zeile 52 - Spalte 6, Zeile 47 Abbildungen 5-7 <p style="text-align: center;">----- -/--</p>	1-5, 8-12,16 6,7,9, 10,13,14

Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen Siehe Anhang Patentfamilie

- | | |
|--|---|
| <p>* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :</p> <p>"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist</p> <p>"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist</p> <p>"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)</p> <p>"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht</p> <p>"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist</p> | <p>"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist</p> <p>"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden</p> <p>"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist</p> <p>"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist</p> |
|--|---|

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absenddatum des internationalen Recherchenberichts
16. April 2013	23/04/2013

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Bevollmächtigter Bediensteter <p style="text-align: center;">Hristov, Stefan</p>
--	---

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	<p>EP 2 216 698 A2 (DECKEL MAHO PFRONTEN GMBH [DE]) 11. August 2010 (2010-08-11)</p> <p>Absatz [0001] Absatz [0007] Absatz [0021] - Absatz [0024] Absatz [0027] - Absatz [0032] Absatz [0037] - Absatz [0044] Absatz [0052] Absatz [0058] Absatz [0065] Absatz [0072] - Absatz [0078] Absatz [0080] - Absatz [0086] Absatz [0094] - Absatz [0096]</p> <p>-----</p>	1,2,9, 11,12, 16,17
X	<p>DE 10 2007 016056 A1 (SAUER GMBH LASERTEC [DE]) 9. Oktober 2008 (2008-10-09)</p> <p>Absatz [0001] Absatz [0004] - Absatz [0017] Absatz [0025] - Absatz [0039]</p> <p>-----</p>	1,2,12, 16
X	<p>EP 2 325 711 A1 (RENISHAW PLC [GB]) 25. Mai 2011 (2011-05-25)</p> <p>Absatz [0001] Absatz [0005] Absatz [0007] - Absatz [0025] Absatz [0031] - Absatz [0035] Absatz [0039] - Absatz [0044] Absatz [0048] - Absatz [0055]</p> <p>-----</p>	1,2,12, 16
Y	<p>WO 2011/077792 A1 (MITSUBISHI HEAVY IND LTD [JP]; HIRONO YOKO [JP]; TOKAWA TAKAHIDE [JP];) 30. Juni 2011 (2011-06-30) Abbildungen 1-3 & US 2012/247199 A1 (HIRONO YOKO [JP] ET AL) 4. Oktober 2012 (2012-10-04) Absatz [0010] - Absatz [0011] Absatz [0054] - Absatz [0060]; Abbildungen 1-3</p> <p>-----</p>	6,7,9, 10,13
Y	<p>DE 199 28 500 A1 (REISHAUER AG [CH]) 28. Dezember 2000 (2000-12-28) Spalte 1, Zeilen 30-38 Spalte 1, Zeile 53 - Spalte 2, Zeile 22 Spalte 3, Zeile 56 - Spalte 4, Zeile 39 Ansprüche 1-8</p> <p>-----</p>	14

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2013/052263

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 4305408	A1	25-08-1994	KEINE
EP 2216698	A2	11-08-2010	CN 101813931 A 25-08-2010 DE 102009008121 A1 19-08-2010 EP 2216698 A2 11-08-2010 JP 2010225141 A 07-10-2010 US 2010228384 A1 09-09-2010
DE 102007016056	A1	09-10-2008	AT 495853 T 15-02-2011 DE 102007016056 A1 09-10-2008 EP 2142338 A1 13-01-2010 JP 2010523947 A 15-07-2010 US 2010176099 A1 15-07-2010 WO 2008119549 A1 09-10-2008
EP 2325711	A1	25-05-2011	AT 552541 T 15-04-2012 CN 101027616 A 29-08-2007 EP 1787176 A2 23-05-2007 EP 2325711 A1 25-05-2011 JP 2008511454 A 17-04-2008 US 2009112357 A1 30-04-2009 WO 2006024844 A2 09-03-2006
WO 2011077792	A1	30-06-2011	CN 102639957 A 15-08-2012 EP 2518435 A1 31-10-2012 JP 2011133237 A 07-07-2011 US 2012247199 A1 04-10-2012 WO 2011077792 A1 30-06-2011
DE 19928500	A1	28-12-2000	DE 19928500 A1 28-12-2000 IT T020000588 A1 17-12-2001 JP 2001030112 A 06-02-2001 US 6577917 B1 10-06-2003