(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
01. Dezember 2022 (01.12.2022)

WIPO | PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2022/248211 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
*B23F 19/10* (2006.01) *B23F 1/00* (2006.01)
*B23F 21/12* (2006.01) *B23F 5/00* (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2022/062597

(22) Internationales Anmeldedatum:
10. Mai 2022 (10.05.2022)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2021 002 704.3
25. Mai 2021 (25.05.2021) DE

(71) Anmelder: **GLEASON-PFAUTER MASCHINENFABRIK GMBH** [DE/DE]; Daimlerstraße 14, 71636 Ludwigsburg (DE).

(72) Erfinder: **KRESCHEL, Jürgen**; Flauchhalde 7, 71282 Hemmingen (DE).

(74) Anwalt: **LEINWEBER & ZIMMERMANN PATENTANWALTS-PARTG MBB**; Viktualienmarkt 8, 80331 München (DE).

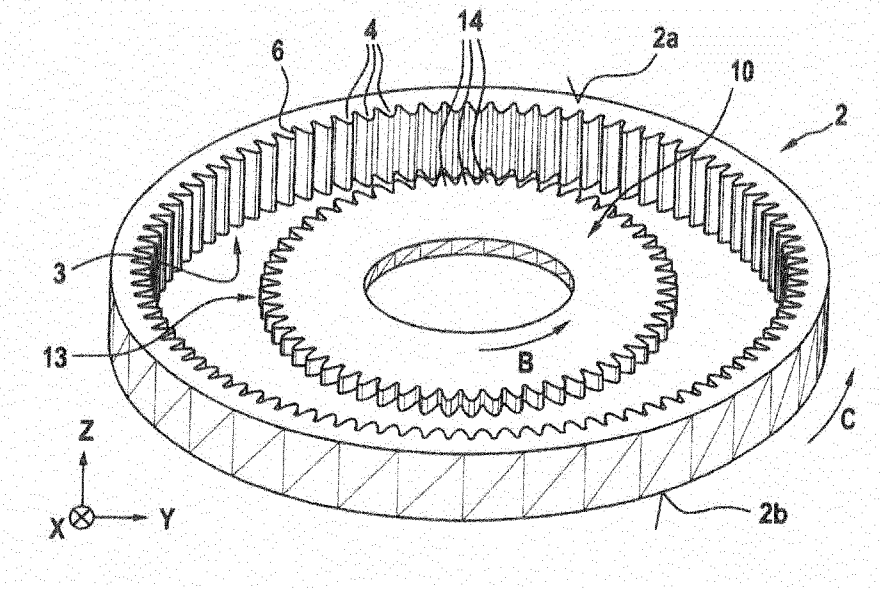
(81) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart)*: AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, 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, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH,

WO 2022/248211 A1

(54) **Title:** METHOD FOR MACHINING A TOOTH FLANK REGION OF A WORKPIECE TOOTH ARRANGEMENT, CHAMFERING TOOL, CONTROL PROGRAM HAVING CONTROL INSTRUCTIONS FOR CARRYING OUT THE METHOD, AND GEAR-CUTTING MACHINE

(54) **Bezeichnung:** VERFAHREN DER SPANENDEN BEARBEITUNG EINES ZAHNFLANKENBEREICHS EINER WERKSTÜCKVERZAHNUNG, ANFASWERKZEUG, STEUERPROGRAMM MIT STEUERANWEISUNGEN ZUR DURCHFÜHRUNG DES VERFAHRENS UND VERZAHNUNGSMASCHINE

Fig. 1




(57) **Abstract:** The invention relates to a method for machining a tooth edge which is formed between a tooth flank and a face side of a workpiece tooth arrangement using a tool tooth arrangement in which the tooth arrangements rotate in rolling-contact coupling with one another about their respective tooth arrangement axes of rotation. According to the invention, it is provided that the two tooth arrangement axes of rotation are substantially parallel to each other and the machining is undertaken over a plurality of workpiece rotations, wherein a first relative movement parallel to the workpiece axis of rotation is executed between the workpiece tooth arrangement and the tool tooth arrangement, and, by means of a second relative movement, which is varied in particular depending on the movement

*[Fortsetzung auf der nächsten Seite]*

TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, 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, ST, 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, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Erklärungen gemäß Regel 4.17:**

— *hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, ein Patent zu beantragen und zu erhalten (Regel 4.17 Ziffer ii)*

**Veröffentlicht:**

— *mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)*

— *in Schwarz-Weiss; die internationale Anmeldung enthielt in ihrer eingereichten Fassung Farbe oder Graustufen und kann von PATENTSCOPE heruntergeladen werden.*

status of the first relative movement, the position of the envelope of the tool tooth rolling-contact positions relative to their engagement position with the tooth flank of the workpiece tooth arrangement is displaced transversely with respect to the profile of the workpiece tooth arrangement in the plane orthogonal to the workpiece axis of rotation.

**(57) Zusammenfassung:** Die Erfindung betrifft ein Verfahren der spanenden Bearbeitung einer zwischen einer Zahnflanke und einer Stirnseite einer Werkstückverzahnung gebildeten Zahnkante mit einer Werkzeugverzahnung, bei der die Verzahnungen in Wälzkopplung miteinander um ihre jeweilige Verzahnungsdrehachse rotieren. Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass die beiden Verzahnungsdrehachsen im Wesentlichen parallel zueinander stehen und die Bearbeitung über eine Mehrzahl von Werkstückdrehungen hinweg erfolgt, wobei eine werkstückdrehachsparallele erste Relativbewegung zwischen Werkstückverzahnung und Werkzeugverzahnung ausgeführt wird sowie durch eine insbesondere in Abhängigkeit des Bewegungsstands der ersten Relativbewegung variierte zweite Relativbewegung die Lage der Hüllkurve der Werkzeugzahn-Wälzstellungen relativ zu ihrer Eingriffslage mit der Zahnflanke der Werkstückverzahnung in der Ebene orthogonal zur Werkstückdrehachse quer zum Profil der Werkstückverzahnung verschoben wird.

VERFAHREN DER SPANENDEN BEARBEITUNG EINES ZAHNFLANKENBEREICHS EINER WERKSTÜCKVERZAHNUNG, ANFASWERKZEUG, STEUERPROGRAMM MIT STEUERANWEISUNGEN ZUR DURCHFÜHRUNG DES VERFAHRENS UND VERZAHNUNGSMASCHINE

Die Erfindung betrifft das Gebiet der ergänzenden Zahnformung und dabei speziell ein Verfahren der spanenden Bearbeitung einer zwischen einer Zahnflanke und einer Stirnseite einer Werkstückverzahnung gebildeten Zahnkante mit einer Werkzeugverzahnung, bei der die Verzahnungen in Wälzkopplung miteinander um ihre jeweilige Verzahnungsdrehachse rotieren.

Verfahren zur ergänzenden Zahnformung sind bekannt, eine Übersicht findet sich in Thomas Bausch „Innovative Zahnradfertigung", 3. Auflage, auf S. 304. Ausgangspunkt der ergänzenden Zahnformung ist die Verzahnung nach ihrer Erzeugung beispielsweise durch

das Wälzfräsen, Wälzstoßen oder Wälzschälen. So entstehen bei derartigen spanenden Verfahren zur Erzeugung von Verzahnungen zunächst sogenannte Primärgrate entlang der Verzahnungsstirnkante, an der die Schneiden des Bearbeitungswerkzeugs austreten, wie sie z.B. in der Literaturstelle Bausch im Bild 8.1-1 oben Mitte auf Seite 304 abgebildet sind. Diese Grate sind scharfkantig und fest, zur Vermeidung von Verletzungen und zur Verbesserung der Verzahnungsgeometrie für den Folgeprozess sind sie zu entfernen. Dies geschieht üblicherweise durch feststehende Entgratstähle, über mitlaufende Entgratscheiben oder Feilscheiben, und zwar üblicherweise unmittelbar im Zusammenhang mit dem Prozess der Verzahnungserzeugung.

Eine solche bloße Entfernung des Primärgrats beispielsweise durch Abdrehen oder, wie in DE 10 2014 018 328 offenbart, durch ein Abscheren mit der Rückseite eines Schälrads wird den Anforderungen an die Qualität der Zahnkanten oftmals nicht gerecht. Deshalb wird an den Zahnkanten (Stirnkanten) üblicherweise eine Fase gebildet. In der Literaturstelle Bausch ist im Bild 8.1-1 links oben die Stirnkante mit B bezeichnet und im Bild rechts oben mit der daran erzeugten Fase für eine Geradverzahnung gezeigt. Die Erfindung betrifft derartige Verfahren, bei denen durch Materialabtrag die Zahnkante, in der Form wie nach der Verzahnungserzeugung gebildet, beseitigt wird, geht somit über das Abscheren von von der Zahnkante abstehenden Primärgraten hinaus, welches die Form der bestehenden Zahnkante als solche unverändert lässt.

Eine seit langem verbreitete und immer häufig noch genutzte Anfastechnik ist die des sogenannten Wälzdrückentgratens oder Wälzentgratens. Hier werden die Kanten durch Drücken mittels Wälzentgraträdern plastisch in die Fase umgeformt. Die dabei auftretenden Materialverschiebungen führen allerdings zu Materialanhäufungen (Sekundärgrate) auf den Zahnflanken sowie an den Stirnseiten, die dann wieder durch geeignete Maßnahmen beseitigt werden müssen. Derartige Systeme sind beispielsweise in EP 1 279 127 A1 beschrieben.

Während das Wälzdrückentgraten ein sehr einfaches Verfahren darstellt (üblicherweise müssen die zahnradförmig gebildeten Werkzeuge noch nicht einmal drehangetrieben werden, vielmehr können sie freilaufend mit Anpressdruck gegen die anzufasende Werkstückverzahnung gehalten werden und laufen dann in Wälzkopplung mit dem angetriebenen Werkstück mit), so stellen die dabei erzeugten Sekundärgrate einen Nachteil dieses Verfahren dar. Während die Sekundärgrate an den Stirnseiten noch vergleichswei-

se einfach beispielsweise durch einen Entgratstahl wieder abgeschert werden können, sind insbesondere die auf den Zahnflanken erzeugten Sekundärgrate ein Problem für eine ggf. nach dem Härten der Werkstücke noch erfolgende Hartfeinbearbeitung. Will man diese flankenseitigen Sekundärgrate vorab entfernen, ist ein erneuter Bearbeitungsdurchgang auf der die Verzahnung erzeugenden Maschine bei tiefster Zustellung möglich, oder der Einsatz von Spezialwerkzeugen, wie etwa in DE 10 2009 018 405 A1 beschrieben.

In WO 2009/017248 wird vorgeschlagen, das Gewicht an Sekundärgraterzeugung von der Zahnflanke weg hin zur Stirnseite zu verlagern. Weitere Ansätze in der Technik gehen jedoch in die Richtung, den Materialabtrag/die Bildung der Fase schneidend und nicht drückend zu bewirken, durch Abtragen mit geometrisch bestimmter oder geometrisch unbestimmter Schneide (DE 10 2016 004 112 A1).

Für das schneidende Anfasen mit geometrisch bestimmter Schneide sind Varianten bekannt geworden (EP 1 495 824 A2), bei dem ein zum Anfasen der Zahnkanten dienendes Bearbeitungswerkzeug auf der gleichen Welle wie ein zur Erzeugung der Werkstückverzahnung dienender Wälzfräser angeordnet ist, aber auch separate Anordnungen (DE 10 2009 019 433 A1), die es erlauben, dass durch Verschwenken des Anfaswerkzeugs bei sowohl der Bearbeitung der stirnseitigen Enden an einer Stirnseite als auch an der anderen Stirnseite der Schnitt von innen nach außen erfolgen kann.

In DE 10 2013 015 240 A1 sind die sogenannten „Chamfer-Cut-Fräser" offenbart, die ähnlich wie ein Wälzfräser aussehen, bei denen jedoch die Flugkreise gleicher Profilbereiche überlappen, wobei die Profile derart gestaltet sind, dass bei einem Durchtritt eines Anfasfräserzahns durch eine Zahnlücke der Werkstückverzahnung letztere vollständig an beiden Flanken der Zahnlücke angefast wird. Ein weiteres schneidendes Anfasen, das sich noch enger am Wälzfräsen orientiert, ist in DE 10 2018 001 477 A1 beschrieben. Hier erfolgt das Anfasen im Einflankenverfahren in mehreren Schnitten über den Durchgang mehrerer Werkzeugzähne durch die Werkstückzahnlücke. Zum Beispiel kann für die Bearbeitung einer Flanke der bei beispielsweise vertikaler Werkstückachse die Werkzeugdrehachse bezogen auf die Horizontale verschwenkende Schwenkwinkel sogar auf Null gestellt werden.

Nach einem ähnlichen Prinzip wie der in DE 10 2013 015 240 A1 offenbarte „Chamfer-Cut-Fräser" gibt es auch schlagmesserartigen Abtrag an der Zahnkante, eingesetzt zur

Erzeugung einer Abdachung z.B. für Getriebeverzahnungen, bei dem rotierende Schlagmesser, beispielsweise in der Form eines Endfräsers realisiert, mit ihrer Werkzeugdrehachse derart windschief zur Achse der Werkstückverzahnung angestellt werden, dass eine Zahnflanke der Werkstückverzahnung beim einmaligen Durchgang durch die Bearbeitungszone durch einen Schneidvorgang parallel zur zu erzeugenden Endgeometrie bearbeitet wird. Für die andere Werkstückzahnflanke kann ein zweites Schlagmesserwerkzeug angestellt werden. Dies ist beispielsweise in der Literaturstelle Bausch auf Seite 323 beschrieben.

Ein nochmals weiteres Verfahren zum schneidenden Anfasen ist in WO 2015/014448 offenbart. Hier geht man von dem Verzahnungseingriff des Wälzschälens mit Achskreuzwinkel aus und sorgt mit einem gegenüber der Normalstellung im Wälzschälverfahren zusätzlichen Kippung der Werkzeugachse für eine Veränderung der Schneidbewegung, über die dann die Fase erzeugt wird. Auf dem gleichen Prinzip basiert das in DE 10 2014 218 082 A1 offenbarte Verfahren, bei dem eine windschiefe Achskonfiguration bereits baulich in die Verzahnungsmaschine integriert ist. Bei diesen beiden, nach dem Prinzip des Wälzschälens funktionierenden Anfasbearbeitungen erfolgt der Schneidmechanismus über den Achskreuzwinkel, eben wie beim Wälzschälen.

Eine nochmals weitere Anfastechnik ist aus DE 10 2018 108 632 bekannt geworden, bei dem ein Stiftfräser durch Maschinenachsbewegung entlang der Zahnkante bewegt wird. Diese Anfastechnik eignet sich besonders gut für aufgrund von Störkonturen am Werkstück nicht gut mittels „Chamfer-Cut-Fräser" oder wälzfräsartigen Werkzeugen erreichbaren Stirnkanten.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren der eingangs genannten Art abzielend auf eine gute Kombination aus vergleichsweiser Einfachheit und zufriedenstellender Flexibilität der Zahnkantenbearbeitung fortzubilden.

Diese Aufgabe wird in verfahrenstechnischer Hinsicht durch eine verfahrenstechnische Weiterbildung gelöst, die im Wesentlichen dadurch gekennzeichnet ist, dass die beiden Verzahnungsdrehachsen im Wesentlichen parallel zueinander stehen und die Bearbeitung über eine Mehrzahl von Werkstückdrehungen hinweg erfolgt, wobei eine werkstückdrehachsparallele erste Relativbewegung zwischen Werkstückverzahnung und Werkzeugverzahnung ausgeführt wird sowie durch eine insbesondere in Abhängigkeit des Bewe-

gungsstands der ersten Relativbewegung variierte zweite Relativbewegung die Lage der Hüllkurve der Werkzeugzahn-Wälzstellungen relativ zu ihren Eingriffslage mit der Zahnflanke der Werkstückverzahnung in der Ebene orthogonal zur Werkstückdrehachse quer zum Profil der Werkstückverzahnung verschoben wird.

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren wird somit nicht entlang oder parallel der Fläche der zu bildenden neuen Flächenform, insbesondere Fase geschnitten, sondern aufgrund der im Wesentlichen parallel zueinander stehenden Verzahnungsdrehachsen und aufgrund der Verschiebung der Hüllkurve scheibchenweise in im Wesentlichen orthogonal zur Werkstückdrehachse stehenden Ebenen. Die anstelle der ursprünglichen Zahnkante gebildete Fläche, z.B. eine Fase, setzt sich aus den Endbereichen der über die in Abhängigkeit des Bewegungszustands der ersten Relativbewegung variierte Hüllkurve erreichten scheibchenartigen Materialabträge zusammen. Je nach gewünschter geringerer Rauheit der beispielsweise Fasenfläche kann die Anzahl von Spanvorgängen oder während der axialen ersten Relativbewegung ausgeführten Werkstückdrehungen entsprechend höher gewählt werden und damit die Anzahl der „Scheiben" höher gewählt werden. Es erfolgt somit ein Materialabtrag von dem Material an den Werkstückzahnflanken. Dabei wirken die Zahnflanken der Werkzeugverzahnung als Spanflächen der spanenden Bearbeitung.

So kann die erste Relativbewegung in einer einfachen Gestaltung als axiale Zustellbewegung ausgeführt werden, mit einer entsprechend hohen Anzahl an Zustellschritten. In diesem Fall könnte die zweite Relativbewegung oszillierend verlaufen, indem vor jedem nächsten Zustellschritt wieder auf die Eingriffslage (Nulllage) zurückgestellt wird. Mit Blick auf schnellere Bearbeitungszeiten wird es jedoch bevorzugt, dass die erste Relativbewegung als kontinuierliche Vorschubbewegung ausgeführt wird, beispielsweise mit einem linearen Verlauf über die Zeit, z.B. über eine Maschinenachse Z parallel zur Werkstückdrehachse C. Mit zunehmendem Vorschub Z(t) gelangt die Werkzeugverzahnung bezüglich der Werkstückdrehachse gesehen in wachsende Überlappung mit der Zahnlücke im Bereich der bearbeiteten Stirnseite der Werkstückverzahnung. Beispielsweise taucht die Werkzeugverzahnung im Verlauf der Bearbeitung so weit in die Werkstückverzahnung ein, soweit die Bearbeitung der Zahnkante gewünscht ist, bei Erzeugung einer Fase bis zur Fasentiefe. Ohne die zusätzlich ausgeführte Verschiebung der Hüllkurve gegenüber der Eingriffslage der Hüllkurve mit der Werkstückverzahnung in Wälzkopplung könnten z.B. Werkstückverzahnung und Werkzeugverzahnung aufeinander abwälzen wie Rad und Gegenrad, jedenfalls bereichsweise oder auch vollständig entlang wenigstens einer Zahnflan-

ke, wenn gemäß einer bevorzugten Ausgestaltung das Profil der Werkzeugverzahnung als Gegenprofil zum Zahnprofil der Werkstückverzahnung ausgebildet ist. Aufgrund der Verschiebung der Hüllkurve in das Material der Werkstückzähne hinein kommt es jedoch zu dem oben erläuterten „scheibchenweisen" Materialabtrag, der zu Beginn an der Stirnseite bis hin zur gewünschten Ausdehnung des bearbeiteten Bereichs, beispielsweise der Fasenbreite reicht. Durch eine Verringerung der Verschiebung bei zunehmendem Vorschub kann dann die gewünschte Fasenfläche erzeugt werden. Wird die Verschiebungsbewegung ebenfalls als lineare Verschiebung über die Zeit ausgeführt, lassen sich in dem Beispiel der erzeugten Fasenfläche im Wesentlichen planare Flächenbereiche ausbilden (bzw. im Wesentlichen gerade Verläufe im Schnitt am Teilkreis gesehen), durch Abweichung bzw. nicht linear gewählte V(Z), worin V für die zweite Relativbewegung und Z für die erste Relativbewegung steht, lassen sich auch nahezu beliebige gewünschte Verläufe des Bearbeitungsbereichs und damit z.B. auch gekrümmte Fasen generieren.

In einer besonders bevorzugten Ausgestaltung trägt eine quer zur Achsabstandsachse der Drehachsen verlaufende Querbewegung von Werkstück- und/oder Werkzeugverzahnung zu der zweiten Relativbewegung bei. Denkbar ist grundsätzlich auch eine Verschiebung in Richtung der Achsabstandsachse (radial), jedoch gerade bei den typischen Eingriffswinkeln einer Großzahl von Werkstückverzahnungen eignen sich die genannten Querbewegungen besser, wobei die Radialbewegung, insbesondere wenn (wie später erläutert) auch eine Bearbeitung im Fußbereich mitgewünscht ist, miteinbezogen werden kann.

In einer in diesem Zusammenhang nochmals bevorzugten Ausführungsform umfasst die Querbewegung eine Zusatzdrehung $\Delta C$ der Werkstückverzahnung. Diese ist steuerungstechnisch einfach zu implementieren und erlaubt es, einfache Bearbeitungsmaschinen z.B. auch ohne tangentiale Maschinenachse zu realisieren. Diese Zusatzdrehung versteht sich als eine über eine etwaige bei Schrägverzahnungen auftretende Zusatzdrehung zur Aufrechterhaltung der Wälzkopplung hinausgehende Zusatzdrehung.

In einer alternativen oder zusätzlichen Variante kann die Querbewegung eine Bewegung einer linearen Maschinenachse umfassen, deren Richtungskomponente orthogonal zur Werkstückdrehachse und orthogonal zur Achsabstandsachse deren jeweilige Richtungskomponente entlang dieser Achsen überwiegt. In einer einfach gestalteten Maschinenachskonfiguration könnte diese Linearachse eine Tangentialachse Y sein, die sich

quer, insbesondere orthogonal zur Radialachse (X) und einer axialen (werkstückachsparellelen) Achse Z erstreckt. Da der Effekt der Zusatzdrehung ΔC werkzeugabhängig gegenüber beispielsweise einer solchen Y-Komponente noch eine Radialkomponente beinhaltet, lässt sich durch Kombination dieser beiden Querbewegungskomponenten aus Zusatzdrehung ΔC einerseits und Linearbewegung ΔY andererseits eine Variation der Bearbeitung über die Zahnhöhe der Werkstückverzahnung einstellen. Anstelle oder zusammen mit einer Zusatzdrehung der Werkstückverzahnung könnte auch eine Zusatzdrehung ΔB der Werkzeugverzahnung herangezogen werden.

Das Verfahren sieht auch vor, dass auch die Zahnkante im Zahnfuß der Werkstückverzahnung bearbeitet werden kann. Insbesondere hierzu wird bevorzugt vorgesehen, dass eine in Richtung der Achsabstandsachse der Drehachsen verlaufende Radialbewegung von Werkstück und/oder Werkzeugverzahnung zu der zweiten Relativbewegung beiträgt. In einer besonders einfachen Gestaltung könnte man auch lediglich mit der Radialbewegung als zweite Relativbewegung arbeiten, dies würde allerdings im Fall der Erzeugung einer Fase die Fase im Fußbereich mit der Fasenform im Flankenbereich koppeln. Es wird daher besonders bevorzugt vorgesehen, dass neben der Radialbewegung auch noch eine Querbewegung nach einem der oben beschriebenen Mechanismen ausgeführt wird. Die zweite Relativbewegung wird dann in einer Tangential- und Radialkomponenten aufweisenden Form geführt.

In diesem Zusammenhang kann auch vorgesehen werden, dass durch Einstellung der Radialbewegung in Abhängigkeit des Bewegungszustands der ersten Relativbewegung die Form der Fase im Zahnfuß bewirkt wird und durch Einstellung der Querbewegung in Abhängigkeit des Bewegungsstands der ersten Relativbewegung und des Bewegungsstands der Radialbewegung die Form des Materialabtrags an der Zahnkante im Zahnflankenbereich bestimmt wird. Dies erlaubt eine Entkopplung der Gestaltung der umgearbeiteten Zahnkante im Flankenbereich gegenüber der im Fußbereich. Wie üblich kann eine Fasenbreite für die Tangentialrichtung Y aus einer auf die Flankennormalenrichtungen bezogenen Angabe über den Eingriffswinkel umgerechnet werden.

In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung wird durch eine Überlagerung der Querbewegungsbeiträge von Zusatzdrehung und linearer Maschinenachsbewegung der Materialabtragsformverlauf in Zahnhöhenrichtung bestimmt. Wie oben bereits angedeutet,

wird dadurch eine größere Variabilität in der Gestaltung beispielsweise einer umgearbeiteten Zahnkante, etwa einer Fase erreicht.

Eine weitere zweckmäßige Ausgestaltung könnte mit einem weiteren Bearbeitungsdurchgang insbesondere ansonsten gleicher oder bevorzugt phasenverschobener (z.B. um 180°) Kopplung der Bewegungen, und bevorzugt mit umgekehrter Bewegungsrichtung der ersten Relativbewegung ausgeführter Bewegungssteuerung ausgeführt werden. Mit einem solchen weiteren Bearbeitungsdurchgang können etwaige nicht vollständig vom Material des verbleibenden Werkstückzahns gelöste Späne abgeschert werden. Die Austauch- bzw. Rückzugsbewegung wird somit bevorzugt zur Glättung der beim Eintauchen gebildeten Fläche herangezogen. Bei z.B. gleichem Rückhub wie Vorschub pro Werkstückumdrehung wird die Höhe der (siehe später Fig. 2) Stufen an der Fasenfläche durch z.B. Phasenverschiebung von 180° halbiert. Insoweit es alternativ oder zusätzlich noch einer Spanabtrennung bedürfte, könnten auch z.B. Bürsten zum Einsatz kommen.

In einer besonders bevorzugten Ausgestaltung beträgt die Umlaufgeschwindigkeit am Zahnkopf des Werkstücks wenigstens 10 m/min, weiter bevorzugt wenigstens 20 m/min, insbesondere wenigstens 40 m/min. Weiter bevorzugt sind diese Umlaufgeschwindigkeiten sogar noch höher als 60 m/min, weiter bevorzugt als 120 m/min, insbesondere als 180 m/min. Die Bearbeitung kann demnach annähernd auf Größenordnungen von Drehzahlen stattfinden, die etwa auch beim Wälzschälen typischer Verzahnungen auftreten. Auf diese Weise hält sich bei vernünftigen Schnittbedingungen die Gesamtdauer der Bearbeitung auch dann noch in vernünftigen Grenzen, wenn eine hohe Anzahl von Werkstückdrehungen ausgeführt wird, etwa 3 oder mehr, auch 6 oder mehr, sogar 10 oder mehr.

In einer bevorzugten Gestaltung beträgt der Vorschub pro Werkstückumdrehung für die erste Relativbewegung wenigstens 2 µm, bevorzugt wenigstens 4 µm, nochmals weiter bevorzugt wenigstens 10 µm, insbesondere wenigstens 20 µm, und/oder nicht mehr als 0,6 mm, bevorzugt nicht mehr als 0,4 mm, insbesondere nicht mehr als 0,2 mm.

Mit dem Verfahren könnten nicht nur Fasen, sondern auch beispielsweise abdachungsähnliche Strukturen an Verzahnungen erzeugt werden, etwa für Schaltverzahnungen. In einer besonders bevorzugten Verfahrensgestaltung wird mit der Bearbeitung eine Fase an der Zahnkante erzeugt, deren Fasenbreite bevorzugt geringer ist als 30%, insbesondere als 20% der Zahndicke am Teilkreis.

Es sind Varianten denkbar, in denen die Werkzeugverzahnung unterschiedlich gestaltete Bereiche aufweist und insbesondere als über einen gewissen Bereich an Profilen abdeckenden Bereich gebildete Verzahnung ausgelegt ist, und man ggf. die Bearbeitung in mehreren Bearbeitungsdurchgängen gestaltet, in denen unterschiedliche Verzahnungsbereiche die Bearbeitung an unterschiedlichen Bereichen in Zahnhöhenrichtung der Werkstückverzahnung ausführen. In einer besonders bevorzugten Ausgestaltung ist das Profil der Werkzeugverzahnung jedoch im Wesentlichen das der bezüglich der Wälzkopplung Gegenverzahnung der Werkstückverzahnung. In diesem Fall handelt es sich bei der Werkzeugverzahnung um eine werkstückgebundene Verzahnung, im Gegensatz zu Universalwerkzeugen. Dies bedeutet jedoch nicht, dass im Zweiflankenverfahren gearbeitet werden muss. Vielmehr wird es bevorzugt, dass die Bearbeitung im Einflankenverfahren ausgeführt wird, wobei dann z.B. im Anschluss an die Bearbeitung der einen Zahnflanke(n) an einer der jeweiligen Zahnlücke(n) des Werkstücks die andere(n) Zahnflanke(n) bearbeitet werden.

Auch bei einem solchen Einflankenverfahren wird es bevorzugt, dass die Bearbeitung der anderen Zahnflanke(n) mit dem gleichen Werkzeug und/oder der gleichen Aufspannung erfolgt wie die der einen Zahnflanke(n). Dies erleichtert den Verfahrensablauf und verringert die Anzahl einzusetzender Werkzeuge.

In einer weiteren zweckmäßigen Ausgestaltung ist die Zahndicke der Werkzeugverzahnung gegenüber der für die bei der Wälzkopplung für eine Zweiflankenbearbeitung erforderlichen Zahndicke vermindert. Dies verringert die Kollisionsgefahr an der Gegenflanke.

Die Werkzeugverzahnung kann dabei im Sinne einer Vollverzahnung zu jeder Zahnlücke des Werkstücks auch einen passenden Werkzeugzahn aufweisen (Teilung ohne Sprungfaktor). Das Verfahren lässt sich jedoch auch mit weniger Zähnen als der Vollverzahnung durchführen, beispielsweise mit einem Sprungfaktor von 2 oder 3, bevorzugt jedoch mit wenigstens noch so vielen Zähnen, dass im Mittel ein Sprungfaktor 4 nicht überstiegen wird, insbesondere ein Sprungfaktor 3 nicht überstiegen wird.

In einer bevorzugten Ausgestaltung kann die Werkzeugverzahnung bezüglich der Abmessung in Richtung der Werkzeugdrehachse dünn ausgestaltet sein, beispielsweise

mit einer diesbezüglichen Abmessung von nicht höher als 1,5 cm. Da die Arbeitsleistung der Werkzeugverzahnung im Vergleich zu Arbeitsleistungen von Verzahnungen erstellenden Werkzeugen geringer ausfällt, können sogar nochmals deutlich dünnere Verzahnungen zum Einsatz kommen, auch bei denen die Abmessung geringer ist als 1 cm, weiter bevorzugt geringer ist als 0,7 cm, es sind jedoch auch Varianten mit geringeren Scheibendicken der Werkzeugverzahnung von 0,4 cm oder weniger denkbar, bis hin zu Scheibendicken nicht größer als 3 mm, sogar 2 mm sind denkbar. Wenn im Miniaturbereich gearbeitet werden soll, wird auch an Scheibendicken von nicht mehr als 1 mm, sogar nicht mehr als 0,5 mm, insbesondere nicht mehr als 0,3 mm gedacht, etwa durch Drahterodieren hergestellt. Mit derartigen Werkzeugen lassen sich auch Zahnkantenbearbeitungen ausführen, wenn durch Schultern oder andere Störkonturen, beispielsweise von Werkstücken mit mehreren Verzahnungen, nur wenig (axialer) Bearbeitungsraum vorhanden ist.

Das Werkzeug kann aus Vollmaterial gebildet sein, auch gesintert, insbesondere auch als Einwegwerkzeug. Ebenfalls könnte ein Grundkörper auch mit Schneidzähnen oder Schneidzahngruppen bestückt werden, etwa in Form von Schneidplatten, insbesondere Wendeschneidplatten. Durch Vertiefungen in den Zahnstirnflächen können konstruktive Freiwinkel gebildet sein. Keilwinkel von kleiner als 90° können alternativ oder zusätzlich durch konisch gestaltete Werkzeugzahnflanken erreicht werden.

Für eine Überlagerung von Beiträgen unterschiedlicher Maschinenachsen zur Realisierung der Verschiebungsbewegung der Hüllkurve ist es günstig, in der Vorstellung von einer diskreten Zustellung in Axialrichtung auszugehen und sich zu einer vorgegebenen axialen Eindringtiefe die zu erreichende (gewünschte) Verschiebung anzusehen. Beispielsweise könnte man zunächst über die gewünschte radiale Eindringtiefe am Zahnfuß, an welchem weder Tangential- noch Zusatzdrehungen einen merklichen Formabänderungsbeitrag liefern, die Radialbewegung X(Z) festlegen. Die Festlegung von z.B. Y(Z) erfolgt dann unter Berücksichtigung, dass abhängig vom Eingriffswinkel die Radialverschiebung X(Z) einen zusätzlichen Beitrag auch in Richtung Y bewirkt. Wird die Werkstückdrehachse eingebunden, kann je nach Genauigkeitsanforderungen berücksichtigt werden, dass auch die Verschiebung über $\Delta C$ eine miteinzubeziehende Komponente in Radialrichtung aufweist, die geringfügig über die Zahnhöhe der Werkstückverzahnung variiert. Setzt man sowohl $\Delta C$ als auch $\Delta Y$ ein, ergibt sich somit ein zusätzlicher Freiheitsgrad, mit dem die Gestaltung der Fase auch über die Zahnhöhe noch variiert werden kann, beispielsweise

zur Erzeugung kommaförmiger Fasen. Für letztere, den Zahnfuß ohnehin aussparende Bearbeitungen steht zudem die Radialachse X als weiterer Freiheitsgrad zur Verfügung.

Wie oben bereits erläutert, kann sich eine mit dem Verfahren gebildete Fläche aus den Endbereichen der über die in Abhängigkeit des Bewegungszustands der ersten Relativbewegung variierende Hüllkurve erreichten Materialabträgen zusammensetzen. Diese Art der Erzeugung von neuen Verzahnungsoberflächen (Bereichen) wird von der Erfindung auch unabhängig von der genauen Funktion der neuen Verzahnungsoberfläche sowie der konkreten Orientierung der Verzahnungsdrehachsen zueinander als eigenständig schutzwürdig offenbart. Hierzu wird von der Erfindung in einem weitergehenden Aspekt bereitgestellt ein

Verfahren der spanenden Bearbeitung eines Zahnflankenbereichs einer Werkstückverzahnung, insbesondere einer zwischen einer Zahnflanke und einer Stirnseite einer Werkstückverzahnung gebildete Zahnkante, mit einer Werkzeugverzahnung, bei der die Verzahnungen in Wälzkopplung um ihre jeweilige Verzahnungsachse rotieren, und bei dem durch die Bearbeitung an dem Zahnflankenbereich eine neue Verzahnungsoberfläche gebildet wird, das im Wesentlichen dadurch gekennzeichnet ist, dass die Bearbeitung über eine Mehrzahl von Werkstückdrehungen hinweg erfolgt, wobei eine erste Relativbewegung mit einer werkstückdrehachsparallelen Richtungskomponente zwischen Werkstückverzahnung und Werkzeugverzahnung ausgeführt wird sowie durch eine insbesondere in Abhängigkeit des Bewegungszustands der ersten Relativbewegung variierte zweite Relativbewegung die Lage der Hüllkurve der Werkzeugzahn-Wälzstellungen relativ zu ihrer Eingriffslage mit der Zahnflanke der Werkstückverzahnung in Projektion auf die Ebene orthogonal zur Werkstückdrehachse C gesehen quer zum Profil der Werkstückverzahnung und insbesondere orthogonal zur Werkzeugdrehachse verschoben und dadurch bei einem Durchgang einer jeweiligen Werkstückdrehung Material entlang einer Schnittfläche abgenommen wird, wobei sich die Form der neuen Verzahnungsfläche aus den Endbereichen der Schnittflächen von der Mehrzahl von Werkstückdrehungen zusammensetzt. Es wird somit bevorzugt in einer Ebene geschnitten, die im Wesentlichen orthogonal zur Werkzeugdrehachse liegt.

Es versteht sich, dass die oben erläuterten Aspekte zu bevorzugten Gestaltungen insbesondere zur Bildung einer Phase als neue Verzahnungsoberfläche auch für das soeben definierte Verfahren herangezogen werden können.

In einer bevorzugten Gestaltung könnten die Verzahnungsachsen von Werkzeug und Werkstück beide in der gleichen Ebene liegen, eine jedoch unter einem Winkel zu der anderen geneigt sein. Diese Achsstellung kann sich insbesondere für Fälle eignen, in denen ein stirnkantennaher Bereich bearbeitet wird, und die betreffende Stirnebene der Verzahnung nicht orthogonal zur Werkstückachse verläuft, sondern ebenfalls gegenüber diesem geneigt ist. Die Neigung der Relativachsen könnte dann auf diesen Neigungswert der Stirnfläche gegenüber der Orthogonalebene zur Werkstückdrehachse eingestellt werden.

Bereits angesprochen wurden neben der Erzeugung von Phasen als neue Verzahnungsoberflächenbereiche die Erzeugung von Abdachungen. In diesem Zusammenhang könnte ebenfalls eine Einführungsfläche (lead-in surface) eines Starterritzels erzeugt werden.

Hinsichtlich des oben angesprochenen Neigungswinkels wird auch daran gedacht, neue Verzahnungsoberflächen an Kegel- oder Beveloid-Verzahnungen zu schaffen, wobei das Werkzeug in einem derartigen Winkel angesetzt wird, dass das Schneidprofil des Werkzeugs parallel zu dem Profil der Phase an einer konischen Außenseite der Kegelverzahnung angeordnet wird, im Wege der Achsorientierung von Werkzeug und Kegelrad.

In diesem Zusammenhang ist ebenfalls vorgesehen, dass für die Erzeugung der neuen Verzahnungsoberfläche, insbesondere einer Phase, nicht nur mit zylindrisch verzahnten Werkstücken gearbeitet wird, sondern auch balligen Verzahnungen oder eben insbesondere Kegelradverzahnungen. In diesem Zusammenhang wird es bevorzugt, dass mit Kegelradverzahnungen (Beveloiden und Hypoiden) gearbeitet wird, die für Achswinkel von weniger als 60°, weiter bevorzugt weniger als 40°, insbesondere weniger als 30° ausgelegt sind (für das einzelne Werkstück entsprechend mit einer Konizität von etwa der Hälfte dieser Werte). Entsprechend könnte dann der Neigungswinkel des Werkzeugs auf den Wälzkegelwinkel des Kegelrads eingestellt werden.

In einer weiteren bevorzugten Gestaltung könnte das Verzahnungswerkzeug bereits in eine Werkzeuganordnung mit einem Hauptwerkzeug oder in das Hauptwerkzeug integriert werden, welches in der Werkstückverzahnung, an der mit den Verfahren eine neue Verzahnungsoberfläche, insbesondere eine Fase, erzeugt wird, integriert ist. Insbesondere könnte die Verzahnung mit der Rückseite eines Stoßrads (beim Wälzstoßen) oder Schäl-

rads (beim Wälzschälen) erzeugt werden. Insbesondere für eine Hauptbearbeitung zur Erzeugung durch Wälzschälen könnte daran gedacht werden, das Werkzeug auch als Kombiwerkzeug mit dem Anfaswerkzeug zu gestalten, insbesondere in Form von zwei scheibenartigen Werkzeugen, die insbesondere unmittelbar in Axialrichtung übereinander angeordnet sind, so dass ihre Drehachsen zusammenfallen. Ein solches Verzahnungswerkzeug könnte auch an einer ersten Stirnseite mit den Schneidkanten zum Wälzschälen mit einem für das Wälzschälen ausgelegten Profil gebildet sein, und an der Rückseite mit einem für das Wälzstoßen der identischen Verzahnung ausgelegtem Profil, welches dann unter parallelen (wie beim Wälzstoßen) oder ggf. unter zwar bevorzugt in einer Ebene liegenden, jedoch unter einem Neigungswinkel zueinander stehenden Achsen ausgeführt werden, während für das die Verzahnung erzeugende Wälzschälverfahren ein Achskreuzwinkel eingestellt wird, auf den der Wälzschälprozess ausgelegt ist.

Gemäß einem weiteren Aspekt müsste die neue Verzahnungsoberfläche auch nicht zwingend an eine Stirnseite der bearbeiteten Verzahnung angrenzen. Beispielsweise wird auch an die Erzeugung von Hinterlegungen unter insbesondere zueinander geneigter oder insbesondere mit parallelen Drehachsen gedacht. Hierzu könnte das Verzahnungswerkzeug auch als sehr dünne Scheibe gefertigt werden und zunächst in einem ersten Schritt ein entsprechend dünner Einschnitt noch nicht über die volle Hinterlegungsbreite geschaffen werden, ggf. unter oszillierend ausgeführter zweiter Relativbewegung bis hin zur gewünschten Hinterlegungstiefe aber noch auf gleicher Höhe in Werkstückachsrichtung, und anschließend die Verfahrensschritte wie bei der Erzeugung einer Phase entsprechend der obigen Beschreibung herangezogen werden, jedoch mit gleicher Ausdehnung der Querbewegung zur Ausbildung gleichmäßig tiefer Einschnitte bis zum Erreichen der axial vollen Hinterlegungsbreite.

Insoweit ist erkennbar und offenbart, dass das Verfahren durchaus und bevorzugt unter parallel zueinander stehenden Verzahnungsdrehachsen ausgeführt werden kann, um durch die Bearbeitung mit der ersten und zweiten Relativbewegung eine Zahnkante zu bearbeiten, insbesondere eine Fase zu erzeugen, zum anderen jedoch das Verfahren mit der Zusammensetzung der neuen Verzahnungsoberfläche aus den Endbereichen der Schnittflächen von der Mehrzahl von Werkstückdrehungen auch für neue Verzahnungsoberflächen anwendbar ist, bei dem mit nicht-parallelen Verzahnungsdrehachsen gearbeitet wird oder bei dem keine Bearbeitung der Zahnkante, insbesondere keine Bildung einer Fasenfläche als neue Verzahnungsoberfläche erfolgt.

In einer weiteren möglichen Ausgestaltung ist eine Modifikationsfunktion vorgesehen, bei welcher modifizierte Maschinenachsansteuerungen einer virtuellen Geometrie für die neue Verzahnungsoberfläche zugeordnet sind, und die virtuelle Geometrie in einem ersten Übergangsbereich von einem Mittenbereich zur Stirnseite und/oder in einem zweiten Übergangsbereich von dem Mittenbereich zur Zahnflanke von einer Zielgeometrie am Werkstück (etwa definiert über die (typische) Kombination der Parameter Fasenbreite und Fasenwinkel) in einer mehr Material abtragenden Weise abweichen, wobei der Bearbeitung, insbesondere nach Auswahl der Modifikationsfunktion oder automatisch, die modifizierten Maschinenachsansteuerungen zugrunde gelegt werden. Auf diese Weise kann einer etwaigen Bildung von durch Druckkräfte zwischen Bearbeitungswerkzeug und Werkstückverzahnung verursachten Materialaufwürfen am bearbeiteten Zahnflankenbereich entgegengewirkt werden.

Das Vorsehen einer derartigen Modifikationsfunktion kann auch unabhängig von einer spezifischen Bearbeitungskinematik und/oder Form von Bearbeitungswerkzeugen vorteilhaft sein, insbesondere bei Verfahren, in denen derartige Druckkräfte auftreten können und/oder das Werkstoffmaterial der Werkstückverzahnung etwaig auftretenden Druckkräften keinen ausreichenden Fließwiederstand entgegensetzen kann. Insoweit offenbart die Erfindung unabhängig und eigenständig schutzfähig auch ein Verfahren der spanenden Bearbeitung eines Zahnflankenbereichs einer Werkstückverzahnung, insbesondere einer zwischen einer Zahnflanke und einer Stirnseite einer Werkstückverzahnung gebildete Zahnkante, mit einem Bearbeitungswerkzeug, bei dem durch die Bearbeitung an dem Zahnflankenbereich eine neue Verzahnungsoberfläche, insbesondere in Form einer Fase gebildet wird, mit einer Modifikationsfunktion, bei welcher modifizierte Maschinenachsansteuerungen einer virtuellen Geometrie für die neue Verzahnungsoberfläche zugeordnet sind, und die virtuelle Geometrie in einem ersten Übergangsbereich von einem Mittenbereich zur Stirnseite und/oder in einem zweiten Übergangsbereich von dem Mittenbereich zur Zahnflanke von einer Zielgeometrie am Werkstück in einer mehr Material abtragenden Weise abweichen, wobei der Bearbeitung, insbesondere nach Auswahl der Modifikationsfunktion oder automatisch, die modifizierten Maschinenachsansteuerungen zugrunde gelegt werden, um einer etwaigen Bildung von durch Druckkräfte zwischen Bearbeitungswerkzeug und Werkstückverzahnung verursachten Materialaufwürfen am bearbeiteten Zahnflankenbereich entgegenzuwirken.

Die Modifikationsfunktion könnte in Form einer von der Steuerung automatisch ausgeführten Weise implementiert sein und ggf. für einen Bediener der Maschine nicht erkennbar im Hintergrund ablaufen. Es ist jedoch ebenfalls vorgesehen, dass die Modifikationsfunktion eine bei Bedienung der das Verfahren ausführenden Maschine auswählbare Option ist. Beispielsweise könnte der Bediener nach Feststellung einer Abweichung der ohne Modifikationsfunktion erzeugten neuen Verzahnungsoberfläche die Modifikationsfunktion aktivieren.

In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung können Parameter der Modifikationsfunktion variabel und durch insbesondere Bedienereingaben bestimmbar sein. In diesem Zusammenhang kann beispielsweise eine Form und/oder Größe der Abweichung eingebbar und/oder (aus Vorgaben) auswählbar sein.

Beispielsweise könnte die Form der Abweichung in einer Rundung oder einer Abschrägung implementiert sein. Ist beispielsweise z.B. an einer Geradverzahnung eine (z.B. 45°-) Fase gewünscht und entspricht einer gewünschten Zielgeometrie am Werkstück, kann beispielsweise die virtuelle Fasengeometrie vor Erreichen der Stirnseite in eine Abschrägung mit höherem Winkel übergehen, und/oder vor Erreichen der Zahnflanke in eine Abschrägung mit einem geringeren Winkel (bei Bezug jeweils zur Zahnflanke).

Bezeichnet etwa δ den Fasenwinkel (des Mittenbereichs) der Fase, so sollte dieser geringere Winkel (ε) bevorzugt wenigstens 15° geringer als δ sein und/oder nicht mehr als 30°, bevorzugt nicht mehr als 20° betragen. Ähnliches gilt für den höheren Winkel (η), der dann bevorzugt nicht weniger als 15° größer ist als δ und/oder größer ist als 60°, insbesondere als 70°.

Des Weiteren ist bevorzugt, dass die Fasenbreite (bs) der virtuellen Geometrie mit einem vorgegebenen Fasenwinkel δ (im Mittenbereich) und wenigstens 2%, bevorzugt wenigstens 5%, insbesondere wenigstens 10% größer ist als die sich unter Fortführung der Fase bei gleichem Winkel α ergebenden Fasenbreite. Gleiches gilt bevorzugt auch für die Fasenerstreckung (bf) in Flankenrichtung.

In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung ist vorgesehen, dass alternativ oder zusätzlich zur Implementierung einer derartigen Modifikationsfunktion eine Eingabemöglichkeit für eine (erweiterte) Fasenzielgeometrie vorgesehen ist, welche im Rahmen der

obigen Erläuterungen die der Definition der virtuellen Geometrie entsprechenden erweiterten Eingabemöglichkeiten liefert, insbesondere auch in Form von von der Zielgeometrie am Werkstück abweichenden Gestaltungsangeboten nach Eingabe von Fasengrunddaten wie Fasenbreite und Fasenwinkel. Erfolgt demnach eine Eingabe von von der Zielgeometrie am Werkstück abweichenden Fasengeometriedaten bereits auf eine den ersten oder zweiten Übergangsbereich wie vorstehend erläutert definierenden Weise, können diese (erweiterten) Fasendaten der Maschinenachsansteuerung zugrunde gelegt werden, entsprechend dem Zugrundelegen der virtuellen Geometrie der Modifikationsfunktion.

Die erweiterten Fasendaten definieren dabei bevorzugt wenigstens stirnseitig und/oder flankenseitig Übergangsbereiche zum Mittenbereich der Fase, deren Formgebung, insbesondere in Form einer Rundung oder Abschrägung, von der des Mittenbereichs abweicht. Im Falle einer Rundung gelten die obigen Winkelwerte bevorzugt ebenfalls, in Form der über die Rundung gemittelten Tangentensteigung.

Es versteht sich, dass die erläuterte Modifikationsfunktion und/oder die Eingabemöglichkeit mit erweiterten Fasendaten bevorzugt für Bearbeitungsverfahren nach einem oder mehreren Aspekten der eingangs erläuterten Bearbeitungsverfahren herangezogen wird.

In vorrichtungstechnischer Hinsicht wird bereitgestellt ein Anfaswerkzeug zur spanenden Bearbeitung einer zwischen einer Zahnflanke und Stirnseite einer Werkstückverzahnung gebildeten Zahnkante unter im Wesentlichen mit zueinander parallelen Verzahnungsdrehachsen in Wälzkopplung miteinander ausgeführten Bearbeitung in Form einer Werkzeugverzahnung mit durch die Zahnflanken der Werkzeugverzahnung gebildeten Spanflächen, insbesondere ausgelegt für eine Bearbeitung gemäß einem Verfahren nach einem der oben erläuterten Aspekte und/oder mit den oben angegebenen Gestaltungseigenschaften.

Die Erfindung wird auch durch ein Steuerprogramm geschützt, das Steueranweisungen enthält, die die Maschine zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der vorgenannten Verfahrensaspekte steuern, wenn auf einer Steuereinrichtung der Verzahnungsmaschine ausgeführt.

Des Weiteren stellt die Erfindung bereit eine Verzahnungsmaschine mit wenigstens einer Werkstückspindel zum drehenden Antrieb einer Werkstückverzahnung um ihre Werkstückdrehachse, und wenigstens einer Werkzeugspindel zum drehenden Antrieb einer Werkzeugverzahnung um ihre Drehachse, wenigstens einer ersten Maschinenachse, die eine werkstückdrehachsparallele erste Relativbewegung zwischen Werkstückverzahnung und Werkzeugverzahnung erlaubt, gekennzeichnet durch eine Steuereinrichtung, welche Steueranweisungen zur Ausführung eines Verfahrens nach einem der vorgenannten Verfahrensaspekte aufweist.

Die Verzahnungsmaschine kann dabei ein größerer Maschinenkomplex sein, der auch eine Werkzeughauptspindel zur Erzeugung der Verzahnung beinhaltet. Die Verzahnungsmaschine kann jedoch auch als eigenständige Anfasstation ausgebildet sein. In einer einfachen Gestaltung wird eine Maschinenachse mit Hauptkomponente in Richtung der Werkstückdrehachse vorgesehen, für die erste Bewegung bevorzugt in Richtung der Werkstückdrehachse. Bei Vertikalmaschinen wäre dies die Vertikalachse.

Bevorzugt ist weiterhin eine Radialachse vorgesehen, um die Station für Werkstücke und Werkzeuge unterschiedlicher Durchmesser einsetzbar zu halten, und gegebenenfalls als zusätzliche Vorschubachse. In einer weiteren Ausführungsform kann auch noch eine Tangentialachse als lineare Maschinenachse realisiert sein, bevorzugt orthogonal zur Radial- und orthogonal zur Werkstückdrehachse. In einer besonders bevorzugten Ausgestaltung verfügt die Anfasstation über keine Schwenkachse oder Kippachse, welche die Parallelanordnung von Werkzeugdrehachse und Werkstückdrehachse ändern könnte. Ebenfalls bevorzugt kann auf die lineare Tangentialachse verzichtet werden, um die Station einfach zu gestalten.

Die Werkzeugdrehachse ist bevorzugt über einen Direktantrieb oder auch über einen Indirektantrieb eine angetriebene Achse. Es versteht sich, dass eine Steuerung der als NC-Achsen ausgeführten Maschinenachsen vorhanden ist, welche in der Lage ist, eine synchrone Wälzkopplung einzuhalten und durch Zusatzdrehungen gezielt und kontrolliert außer Phase zu bringen. In diesem Zusammenhang ist bevorzugt eine Einmitteinrichtung vorgesehen, die beispielsweise über einen berührungslosen Einmittsensor verfügt.

Die erfindungsgemäß auch sehr dünn ausgestalteten Anfasräder erlauben auch eine Zahnkantenbearbeitung unter ungünstigen Platzbedingungen wie etwa durch Störkontu-

ren bedingt und können z.B. auch als Tandemwerkzeug ausgeführt sein. Denkbar ist auch eine drehfest verbundene Kombination eines Schälrads zum Erzeugen der Werkstückverzahnung und dem erfindungsgemäßen Anfasrad. Die Maschinenachsen der Hauptbearbeitungseinheit stehen dann für das Anfasen zur Verfügung, allerdings auf Kosten längerer Nebenzeiten. Ebenfalls ist es möglich, zwei für unterschiedliche Werkstückverzahnungen ausgelegte erfindungsgemäße Anfasräder drehfest zu einem Tandemwerkzeug zu koppeln, beispielsweise für ein werkzeugwechselfreies Anfasen unterschiedlicher Werkstückchargen oder die Bearbeitung von Werkstücken mit zwei oder mehr unterschiedlichen Verzahnungen.

Weitere Merkmale, Einzelheiten und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung mit Bezug auf die beigefügten Figuren, von denen

| | |
|---|---|
| Fig. 1 | ein zahnradförmiges Werkzeug und eine von dem Werkzeug bearbeitete Verzahnung zeigt, |
| Fig. 2 | einen Ausschnitt des Werkstücks mit einer erzeugten Fase zeigt, |
| Fig. 3a | eine erläuternde Ansicht zur Erzeugung der Fase ist, |
| Fig. 3b | einen vergrößerten Ausschnitt aus Fig. 3a zeigt, |
| Fig. 4 | eine Momentstellung bei einer Rückzugsbewegung zeigt, |
| Fig. 5 | eine bezüglich eines Werkstückzahnprofils verschobene Hüllkurve zeigt, |
| Fig. 6a, 6b | erläuternde Ansichten einer Einflankenbearbeitung sind, |
| Fig. 7 | eine Darstellung einer vergleichsweise dünnen Werkzeugverzahnung ist, |
| Fig. 8a, b | schematische Darstellungen zur Bearbeitung von schwer zugänglichen Zahnkanten sind |
| Fig. 9 | schematisch eine Anfaseinheit zeigt, und |
| Fig.10 | eine Modifikationsfunktion erläutert. |

In Fig. 1 ist in einer Perspektivansicht ein Werkstück 2 mit einer bereits hergestellten Innenverzahnung 3 gezeigt. Die Innenverzahnung 3 ist in diesem Ausführungsbeispiel geradverzahnt, es können jedoch ebenfalls schräg verzahnte Verzahnungen bearbeitet werden, wie auch Außenverzahnungen.

Der in Fig. 1 gezeigte Bearbeitungseingriff erfolgt an der unteren Stirnseite 2b des Werkstücks 2, in diesem Ausführungsbeispiel sollen die Zahnkanten der im Wesentlichen evolventischen Zähne 4 der Innenverzahnung 3 an der Stirnkante 2b mit einer Fase versehen werden. Es versteht sich, dass eine weitere Anfasbearbeitung dann auch an der anderen Stirnseite 2a vorgenommen werden kann. Das Verfahren eignet sich jedoch auch für wälzbare nichtevolventische Werkstückverzahnungen.

Die Bearbeitung erfolgt mit einer Werkzeugverzahnung 13. Hierzu ist in diesem Ausführungsbeispiel ein scheibenförmiges Werkzeug 10 vorgesehen, das mit der Werkzeugverzahnung 13 außenverzahnt ist. In diesem Ausführungsbeispiel ist die Werkzeugverzahnung 13 die Gegenverzahnung der Innenverzahnung 3. Das heißt, wenn Werkstück 2 und Werkzeug 10 in synchroner Wälzkopplung miteinander kämmen, tauchen die Zähne 14 der Werkzeugverzahnung 13 in die zwischen den Zähnen 4 der Innenverzahnung 3 gebildeten Zahnlücken ein und wälzen auf den Werkstückzahnflanken ab. Die Hüllkurve der Wälzstellungen der Werkzeugzähne 14 gibt den im Wesentlichen evolventischen Profilverlauf an der Zahnflanke des Werkstückzahns 4 wieder. Wenn wie in bevorzugten Verfahrensgestaltungen die Bearbeitung im Einflankenverfahren erfolgt, können die Zahndicken der Werkzeugzähne 14 auch dünner gestaltet werden als für einen kontaktierenden Zweiflankenwälzeingriff erforderlich. Wie ebenfalls aus Fig. 1 erkennbar ist, ist kein Achskreuzwinkel zwischen den Drehachsen C der Werkstückverzahnung 3 und B der Werkzeugverzahnung 13 vorgesehen, die Drehachsen B und C verlaufen parallel. Die weiteren Achsen X, Y und Z, die als Koordinatensystem in Fig. 1 dargestellt sind, können zum Teil oder ganz als lineare Maschinenachsen einer nicht dargestellten Bearbeitungsmaschine realisiert werden, etwa Z (Vorschub, parallel zu C), X Radialachse (Achsabstandsrichtung), Y Tangentialrichtung.

Die in Fig. 1 dargestellte Relativlage zwischen Werkzeugverzahnung 13 und Werkstückverzahnung 3 ist im Wesentlichen die Situation zu Bearbeitungsbeginn. Vor Bearbeitungsbeginn sind die zwischen der Stirnseite 2b des Werkstücks 2 und den daran angren-

zenden Zahnflanken der Zähne 4 angestellten Kanten 6 noch scharfkantig ausgebildet, beispielsweise in einer Form wie durch ein vorangehendes Verfahren zur Erzeugung der Innenverzahnung 3 hervorgegangen, etwa durch Wälzschälen, Wälzfräsen oder Wälzstoßen oder andere formgebende Verfahren, wobei bei der spanenden Verzahnungserzeugung gebildete Primärgrate gegebenenfalls bereits entfernt sind.

Das Ziel der Zahnkantenbearbeitung dieses Ausführungsbeispiels und zahlreicher bevorzugter Verfahrensgestaltungen ist die Bildung einer Fase 8 an der Stelle der vormaligen Zahnkante 6, wie sie z.B. in der Darstellung von Fig. 2 abgebildet ist. Zu Zwecken einer vergrößerten Darstellung zeigt Fig. 2 nur den fußnahen Bereich einer Zahnlücke 5 und den kopfnahen Bereich eines Werkzeugzahns 14.

Anhand von Fig. 3a wird nun ein bevorzugtes Beispiel für das Erzeugen der Fase 8 beschrieben. Durch eine axiale Relativbewegung wird die Werkstückverzahnung 13 um $\Delta z$ über das axial gesehene Höhenniveau der unteren Stirnseite 2b der Werkstückverzahnung 3 bewegt. Zudem ist, beispielsweise durch eine Zusatzdrehung $\Delta C$ des Werkstücks gegenüber der Phasenlage der synchronisierten Wälzkopplung, die Hüllkurve der Werkzeugzahn-Wälzstellungen um einen Betrag in Tangentialrichtung Y verschoben, der einer Fasenbreite w entspricht, welche in diesem Ausführungsbeispiel beispielsweise 0,3 mm beträgt. Dadurch schneidet eine scharfe Kante 19, die zwischen der Stirnseite 12 des Werkzeugs 10 und der durch die Zahnflankenfläche der Werkzeugverzahnung 13 gebildeten Spanfläche 18 am Werkzeug 10 vorgesehen ist, unter Ausführung der Wälzbewegung des Wälzeingriffs Material an der Stirnseite 2b des Werkstücks 2 ab. Die Schneidbewegung ist hier im Wesentlichen in der Ebene orthogonal zu der Drehachse C. Sie endet bei einem Abstand von der vormaligen Zahnkante 6 in Größe der Fasenbreite w. Durch Wiederholung dieses Vorgangs bei axial tiefer eingetauchtem Werkzeug 10, jedoch mit einer verringerten Verschiebung um $\Delta Y$, reicht der nächste Schnitt beim nächsten Umlauf nur noch bis w- $\Delta$ Y, und so weiter, wie in Fig. 3a erkennbar. Man erhält somit einen scheibchenweisen Abtrag unterschiedlicher Schneidtiefe in Tangentialrichtung und damit auch unterschiedlicher Ausdehnung in Flankennormalenrichtung. Zum Ende der Axialbewegung bei Erreichen der axialen Eindringtiefe in Höhe der gewünschten Fasentiefe d ist die Verschiebung wieder bei Null und in diesem Ausführungsbeispiel einer Realisierung der Querbewegung über eine Zusatzdrehung $\Delta C$ die Phasenlage der synchronen Wälzkopplung wieder erreicht.

Würde man die Verschiebungsbewegung nur über lineare Maschinenachsen bewerkstelligen, bliebe die Phasenlage der synchronen Wälzkopplung während der Bearbeitung erhalten, und die Wirkung des scheibchenweisen Abtragens wird durch eine entsprechende Verschiebung der Hüllkurve über Maschinenachseinstellungen erreicht, etwa über die Tangentialachse Y. Denkbar ist auch ein Wirken oder Mitwirken der Radialachse X. Zudem können Kombinationen aus Achsbewegungen X,Y; X, ΔC; Y, ΔC; X, Y, ΔC herangezogen werden. Eine Beteiligung der Radialachse wird bevorzugt, wenn auch eine Fußfase erzeugt werden soll, wie in Fig. 2 dargestellt.

Bevorzugt und wie in diesem Beispiel wird die Axialbewegung im Wege einer kontinuierlichen Vorschubbewegung mit einem einstellbaren Vorschub pro Werkstückumdrehung erfolgen. In dem gezeigten Ausführungsbeispiel ist zum Beispiel eine Werkstückdrehzahl von 1000 U/min eingestellt und ein Vorschub pro Werkstückdrehung von 0,02 mm. Zur Erzeugung der in Fig. 3 gezeigten Fase mit beispielsweise einer Fasenbreite von ca. 0,3 mm und einer Fasentiefe d von ebenfalls ca. 0,3 mm entsprechend einem Fasenwinkel von ca. 45° werden 15 Werkstückumdrehungen durchgeführt (in Fig. 3 und deren vergrößertem Ausschnitt in Fig. 3a ist zu Zwecken der einfachen Darstellung nur eine geringere Anzahl von Stufen des stufen- und scheibchenweisen Abtrags dargestellt).

Zur Glättung der Fläche der Fase 8 wird in diesem Ausführungsbeispiel die Kante 19 der Werkzeugverzahnung 13 nochmals entlang der Fase 8 entlanggeführt. Hierzu wird die Bewegungsrichtung in Axialrichtung umgekehrt und die Beziehung zwischen der Verschiebung der Hüllkurve und der gegenwärtigen axialen Eintauchtiefe beibehalten, jedoch bevorzugt eine Phasenverschiebung um α bevorzugt im Bereich [90°-270°] vorgesehen. Es könnte auch mit geringerem Vorschub bei der Austauchbewegung als bei der Eintauchbewegung gearbeitet werden. Eine Momentsituation dieser glättenden Rückzugsbewegung ist in Fig. 4 dargestellt.

In Fig. 5 ist nochmals dargestellt, wie die Hüllkurve 28 aus den einzelnen Wälzstellungen 29i gegenüber ihrer dem Profil der Werkstückzahnflanke entsprechenden Nulllage aufgrund der Verschiebungsbewegung versetzt ist.

Aus den Figuren 6a und 6b sind nochmals Verschiebungsbewegungen erkennbar, sowie das in bevorzugten Verfahrensgestaltungen gewählte Einflankenverfahren (Rechts-

und Linksflanke werden nicht gleichzeitig, sondern nacheinander angefast, jedoch in diesem Beispiel mit demselben Werkzeug).

Fig. 7 zeigt ein Anfaswerkzeug in Draufsicht und in einer Seitenansicht. Aus letzterer ist ersichtlich, dass die Scheibendicke h der Werkzeugverzahnung in diesem Ausführungsbeispiel nur 3 mm beträgt. Das in Fig. 7 dargestellte Anfasrad weist bei einem Modul von 2 und einem Eingriffswinkel von 20° 40 Zähne auf. Es versteht sich, dass die Verzahnungsdaten wie Zähnezahl oder Scheibendicke auch andere Werte annehmen können.

Vergleichsweise dünn gestaltete Anfasräder eignen sich aufgrund der zur Verzahnungsachse der Werkstückverzahnung parallel ausgerichteten Verzahnungsachse der Werkzeugverzahnung auch gut zur Bearbeitung von schwer zugänglichen Zahnkanten, wie beispielsweise in der in Fig. 8a schematisch dargestellten Situation, in der ein Werkstück 2' zwei verschiedene Außenverzahnungen 3' aufweist und die untere Stirnseite der oberen Verzahnung 3'a axial nur einen geringen Abstand von der oberen Stirnseite der unteren Verzahnung 3'b aufweist. In Fig. 8b ist das Werkzeug in Form eines Tandemwerkzeugs gebildet, das zwei Werkzeugverzahnungen trägt. Die eine Werkzeugverzahnung 13'a dient zum Anfasen der Werkstückverzahnung 3'a und die zweite Werkzeugverzahnung 13'b dem Anfasen der anderen Werkstückverzahnung 3'b.

Aus den Figuren 8a, b ist ebenfalls ersichtlich, dass sich durch das vorgestellte Verfahren Außenverzahnungen ebenso anfasen lassen wie die anhand von Fig. 1 beschriebene angefaste Innenverzahnung 3.

Ebenfalls versteht sich, dass, obwohl in Fig. 1 das Anfasverfahren für eine Geradverzahnung dargestellt ist, das Verfahren ebenso zum Anfasen von Schrägverzahnungen herangezogen werden kann. In diesem Fall könnte man die Werkzeugverzahnung passend zum Wälzeingriff mit parallelen Achsen ebenfalls als Schrägverzahnungen passend zum Schrägungswinkel der Werkstückverzahnung gestalten. Alternativ kommen schmale, insbesondere konisch gebildete, aber noch geradverzahnte Werkzeugverzahnungen in Betracht.

Eine in Fig. 9 dargestellte Anfaseinheit 100 ist in der Lage, die Werkzeugdrehachse B über drei Linearachsen X, Y, Z, realisiert über entsprechende Schlittenanordnungen 110, 130, 120, gegenüber der Werkstückdrehachse C (C parallel B) zu positionieren. Die Achs-

bewegungen X, Y, Z, B, C erfolgen NC-gesteuert über Steuerung 99. Für eine alternative einfachere Bauweise könnte der Schlitten 130 auch weggelassen werden.

Die in Fig. 9 schematisch dargestellte Anfaseinheit 100 könnte in eine Verzahnungsmaschine integriert werden, deren werkzeugseitige Hauptspindel ein die Werkstückverzahnung erzeugendes Werkzeug trägt, etwa ein Schälrad, einen Wälzfräser oder ein Wälzstoßrad. Dann könnte das Anfasen noch in der gleichen Werkstückaufspannung erfolgen wie die Hauptbearbeitung, oder auch an einem anderen Ort, durch eine entsprechende Automation wie etwa einen Ringlader, Greifer oder eine Doppelspindelanordnung vom Ort der Hauptbearbeitung zum Ort des Anfasens verbracht. Genauso kann die Anfaseinheit als eigenständige Anfasmaschine ausgebildet sein und können die Werkstücke durch eine Werkstückautomation erhalten werden, auch von mehreren Verzahnungsmaschinen, welche die bereits erzeugten Verzahnungen zur ergänzenden Zahnbearbeitung liefern.

Insbesondere wenn die Hauptbearbeitung und die ergänzende Bearbeitung nicht in der gleichen Aufspannung des Werkstücks erfolgen, ist vorgesehen, dass die (Anfas-)Bearbeitungseinheit noch Mittel zum Einmitten aufweist, etwa berührungslose Einmittsensoren, um die phasenrichtige relative Drehlage für die synchrone Wälzkopplung zu bestimmen.

Nun wird noch anhand von Fig.10 eine Modifikationsfunktion erläutert. Dargestellt ist für eine Geradverzahnung eine Zielgeometrie einer Fase F definiert durch Fasenwinkel δ von in diesem Fall und nicht einschränkend $45^0$ und Fasenbreite bs. Mittels der oben bereits erläuterten Modifikationsfunktion werden der Maschinenachssteuerung jedoch nicht diese Fasengrunddaten zugrundegelegt, sondern Daten einer virtuellen Fase entsprechend der Darstellung in Fig. 10 mit zusätzlichen Abschrägungsbereichen Fs an der Stirnseite mit Winkel η von hier beispielhaft etwa $80^0$ und Ff an der Zahnflanke von hier beispielhaft etwa ebenfalls $10^0$. Die Positionierung der Abschrägungen ist derart, dass die virtuelle Fasenbreite bs+Δbs die Zielfasenbreite (nur zu Darstellungszwecken) wie abgebildet stark übersteigt, die tatsächlich eingestellte Verbreiterung mag nur wenige % betragen. Gleiches gilt für den alternativ und/oder zusätzlich modifizierten Übergang zur Flanke mit modifizierter Erstreckung bf+Δbf gegenüber bf. Indem mehr Material abgenommen wird statt die Maschinenachse für die Zielgeometrie anzusteuern, werden selbst im Falle von auftretenden Materialverschiebungen aufgrund von Druckkräften während der Bearbeitung bezüglich der

virtuellen Geometrie erscheinende Materialaufwürfe keine Materialaufwürfe bezüglich der Zielgeometrie.

Im Übrigen ist die Erfindung nicht auf die in den vorherigen Beispielen dargestellten Ausführungsformen eingeschränkt. Vielmehr können die einzelnen Merkmale der vorstehenden Beschreibung wie auch der nachstehenden Ansprüche einzeln und in Kombination für die Verwirklichung der Erfindung in ihren verschiedenen Ausführungsformen wesentlich sein.

# Ansprüche

1. Verfahren der spanenden Bearbeitung einer zwischen einer Zahnflanke und einer Stirnseite (2b) einer Werkstückverzahnung (3) gebildeten Zahnkante mit einer Werkzeugverzahnung (13), bei der die Verzahnungen (3, 13) in Wälzkopplung miteinander um ihre jeweilige Verzahnungsdrehachse (C, B) rotieren,

dadurch gekennzeichnet, dass

die beiden Verzahnungsdrehachsen (C, B) im Wesentlichen parallel zueinander stehen und die Bearbeitung über eine Mehrzahl von Werkstückdrehungen hinweg erfolgt, wobei eine werkstückdrehachsparallele erste Relativbewegung (Z) zwischen Werkstückverzahnung (3) und Werkzeugverzahnung (13) ausgeführt wird sowie durch eine insbesondere in Abhängigkeit des Bewegungsstands der ersten Relativbewegung variierte zweite Relativbewegung (V) die Lage der Hüllkurve (28) der Werkzeugzahn-Wälzstellungen (29i) relativ zu ihrer Eingriffslage mit der Zahnflanke der Werkstückverzahnung in der Ebene (X-Y) orthogonal zur Werkstückdrehachse (C) quer zum Profil der Werkstückverzahnung verschoben wird.

2. Verfahren, insbesondere nach Anspruch 1, der spanenden Bearbeitung eines Zahnflankenbereichs einer Werkstückverzahnung (3), insbesondere einer zwischen einer Zahnflanke und einer Stirnseite (2b) einer Werkstückverzahnung (3) gebildete Zahnkante, mit einer Werkzeugverzahnung (13), bei der die Verzahnungen (3, 13) in Wälzkopplung um ihre jeweilige Verzahnungsachse (C, B) rotieren, und bei dem durch die Bearbeitung an dem Zahnflankenbereich eine neue Verzahnungsoberfläche gebildet wird, bei dem die Bearbeitung über eine Mehrzahl von Werkstückdrehungen hinweg erfolgt, wobei eine erste Relativbewegung (Z) mit einer werkstückdrehachsparallelen Richtungskomponente zwischen Werkstückverzahnung (3) und Werkzeugverzahnung (13) ausgeführt wird sowie durch eine insbesondere in Abhängigkeit des Bewegungszustands der ersten Relativbewegung variierte zweite Relativbewegung (V) die Lage der Hüllkurve (28) der Werkzeugzahn-Wälzstellungen (29i) relativ zu ihrer Eingriffslage mit der Zahnflanke der Werkstückverzahnung in Projektion auf die Ebene (X-Y) orthogonal zur Werkstückdrehachse (C) gesehen quer zum Profil der Werkstückverzahnung verschoben und dadurch bei einem Durchgang einer jeweiligen Werkstückdrehung Material entlang einer Schnittfläche abge-

nommen wird, wobei sich die Form der neuen Verzahnungsfläche aus den Endbereichen der Schnittflächen von der Mehrzahl von Werkstückdrehungen zusammensetzt.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem eine quer zur Achsabstandsachse der Drehachsen verlaufende Querbewegung (Q) von Werkstück- und/oder Werkzeugverzahnung zu der zweiten Relativbewegung beiträgt.

4. Verfahren nach Anspruch 3, bei der die Querbewegung (Q) eine Zusatzdrehung (ΔC) der Werkstückverzahnung umfasst.

5. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, bei der die Querbewegung eine Bewegung einer linearen Maschinenachse (Y) umfasst, deren Richtungskomponente orthogonal zur Werkstückdrehachse und orthogonal zur Achsabstandsachse (X) deren jeweilige Richtungskomponente entlang dieser Achsen überwiegt.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem auch die Zahnkante im Zahnfuß der Werkstückverzahnung bearbeitet wird.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem eine in Richtung der Achsabstandsachse der Drehachsen verlaufende Radialbewegung (ΔX) von Werkstück und/oder Werkzeugverzahnung zu der zweiten Relativbewegung beiträgt.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 3, 6 und 7, bei dem durch Einstellung der Radialbewegung in Abhängigkeit des Bewegungszustands der ersten Relativbewegung die Form der Fase (8) im Zahnfuß bewirkt wird und durch Einstellung der Querbewegung in Abhängigkeit des Bewegungsstands der ersten Relativbewegung und des Bewegungsstands der Radialbewegung die Form des Materialabtrags an der Zahnkante im Zahnflankenbereich bestimmt wird.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 und 5, bei dem durch eine Überlagerung der Querbewegungsbeiträge von Zusatzdrehung (ΔC) und linearer Maschinenachsbewegung (ΔX, ΔY) der Materialabtragsformverlauf in Zahnhöhenrichtung bestimmt wird.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, mit einem weiteren Bearbeitungsdurchgang insbesondere ansonsten gleicher oder bevorzugt phasenverschobener

Kopplung von erster und zweiter Relativbewegung, jedoch mit insbesondere umgekehrter Bewegungsrichtung der ersten Relativbewegung ausgeführter Bewegungssteuerung.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Umlaufgeschwindigkeit am Zahnkopf des Werkstücks wenigstens 10 m/min, bevorzugt wenigstens 20 m/min, insbesondere wenigstens 40 m/min beträgt.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem bei der Bearbeitung eine Fase (8) an der Zahnkante erzeugt wird.

13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Profil der Werkzeugverzahnung im Wesentlichen das der bezüglich der Wälzkopplung Gegenverzahnung der Werkstückverzahnung ist.

14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, das im Einflankenverfahren ausgeführt wird, wobei im Anschluss an die Bearbeitung der einen Zahnflanke(n) an einer der jeweiligen Zahnlücke(n) des Werkstücks die andere(n) Zahnflanke(n) bearbeitet werden.

15. Verfahren nach Anspruch 13, bei dem die Bearbeitung der anderen Zahnflanke(n) mit dem gleichen Werkzeug und/oder in der gleichen Aufspannung erfolgt wie die der einen Zahnflanke(n).

16. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der die Zahndicke der Werkzeugverzahnung gegenüber der für die bei der Wälzkopplung für eine Zweiflankenbearbeitung erforderlichen Zahndicke vermindert ist.

17. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Abmessung (h) der Werkzeugverzahnung entlang der Werkzeugdrehachse geringer ist als 1,5 cm, bevorzugt geringer als 1 cm, weiter bevorzugt geringer als 0,7 cm, insbesondere als 0,4 cm.

18. Verfahren, insbesondere nach einem der vorhergehenden Ansprüche, der spanenden Bearbeitung eines Zahnflankenbereichs einer Werkstückverzahnung (3), insbesondere einer zwischen einer Zahnflanke und einer Stirnseite (2b) einer Werkstückverzahnung (3) gebildete Zahnkante, mit einem Bearbeitungswerkzeug (13), bei dem durch die Bearbei-

tung an dem Zahnflankenbereich eine neue Verzahnungsoberfläche, insbesondere in Form einer Fase gebildet wird, mit einer Modifikationsfunktion, bei welcher modifizierte Maschinenachsansteuerungen einer virtuellen Geometrie für die neue Verzahnungsoberfläche zugeordnet sind, und die virtuelle Geometrie in einem ersten Übergangsbereich von einem Mittenbereich zur Stirnseite (2b) und/oder in einem zweiten Übergangsbereich von dem Mittenbereich zur Zahnflanke von einer Zielgeometrie am Werkstück in einer mehr Material abtragenden Weise abweichen, wobei der Bearbeitung, insbesondere nach Auswahl der Modifikationsfunktion oder automatisch, die modifizierten Maschinenachsansteuerungen zugrunde gelegt werden, um einer etwaigen Bildung von durch Druckkräfte zwischen Bearbeitungswerkzeug und Werkstückverzahnung verursachten Materialaufwürfen am bearbeiteten Zahnflankenbereich entgegenzuwirken.

19. Anfaswerkzeug (10) zur spanenden Bearbeitung einer zwischen einer Zahnflanke und Stirnseite einer Werkstückverzahnung gebildeten Zahnkante unter im Wesentlichen mit zueinander parallelen Verzahnungsdrehachsen in Wälzkopplung miteinander ausgeführten Bearbeitung in Form einer Werkzeugverzahnung mit durch die Zahnflanken der Werkzeugverzahnung gebildeten Spanflächen, insbesondere ausgelegt für eine Bearbeitung gemäß einem Verfahren gemäß den kennzeichnenden Merkmalen eines oder mehrerer der Ansprüche 2 bis 18.

20. Steuerprogramm mit Steueranweisungen, das, wenn auf einer Verzahnungsmaschine ausgeführt, die Maschine zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 18 steuert.

21. Verzahnungsmaschine (100) mit wenigstens einer Werkstückspindel zum drehenden Antrieb einer Werkstückverzahnung um ihre Werkstückdrehachse (C), und wenigstens einer Werkzeugspindel zum drehenden Antrieb einer Werkzeugverzahnung um ihre Drehachse (B), wenigstens einer ersten Maschinenachse (Z), die eine werkstückdrehachsparallele erste Relativbewegung zwischen Werkstückverzahnung und Werkzeugverzahnung erlaubt, gekennzeichnet durch eine Steuereinrichtung (99), welche Steueranweisungen zur Ausführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 18 aufweist.

Fig. 1

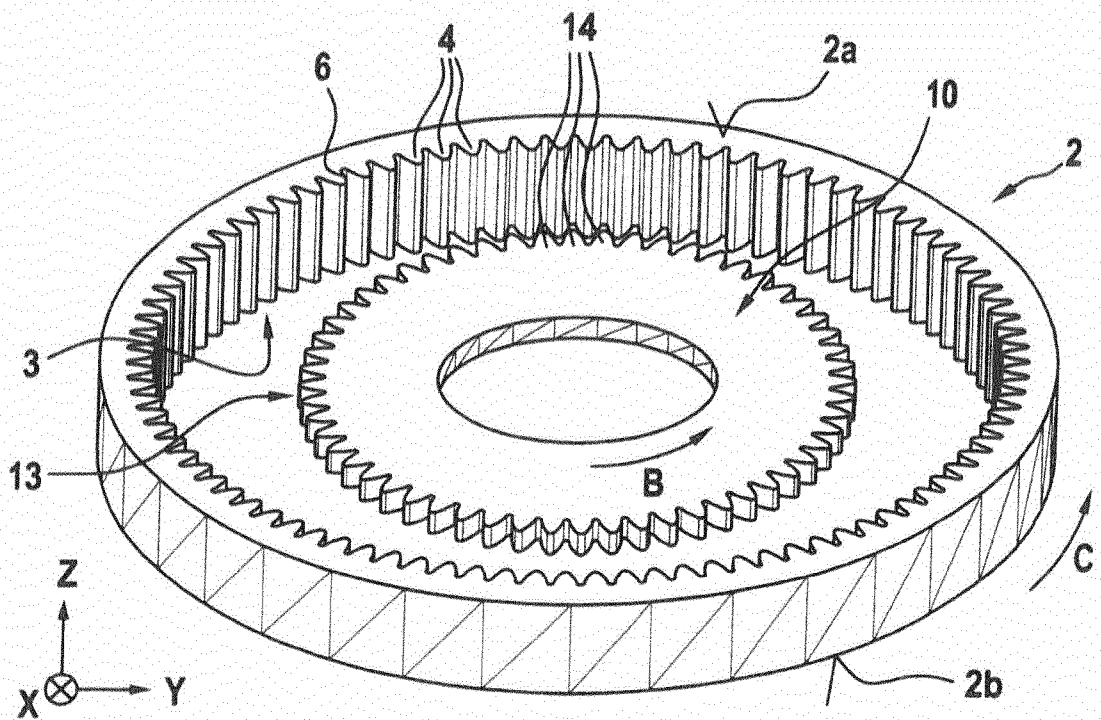



Fig. 2

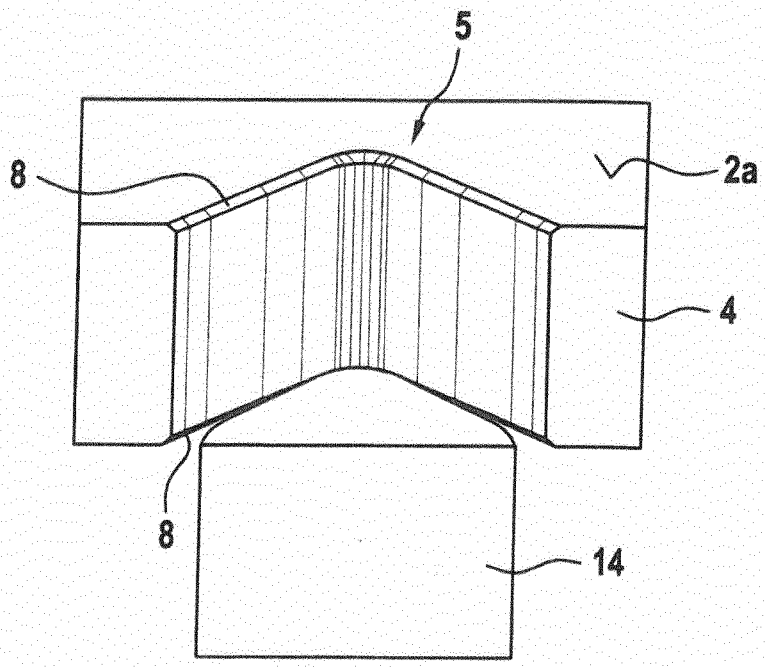


Fig. 3a

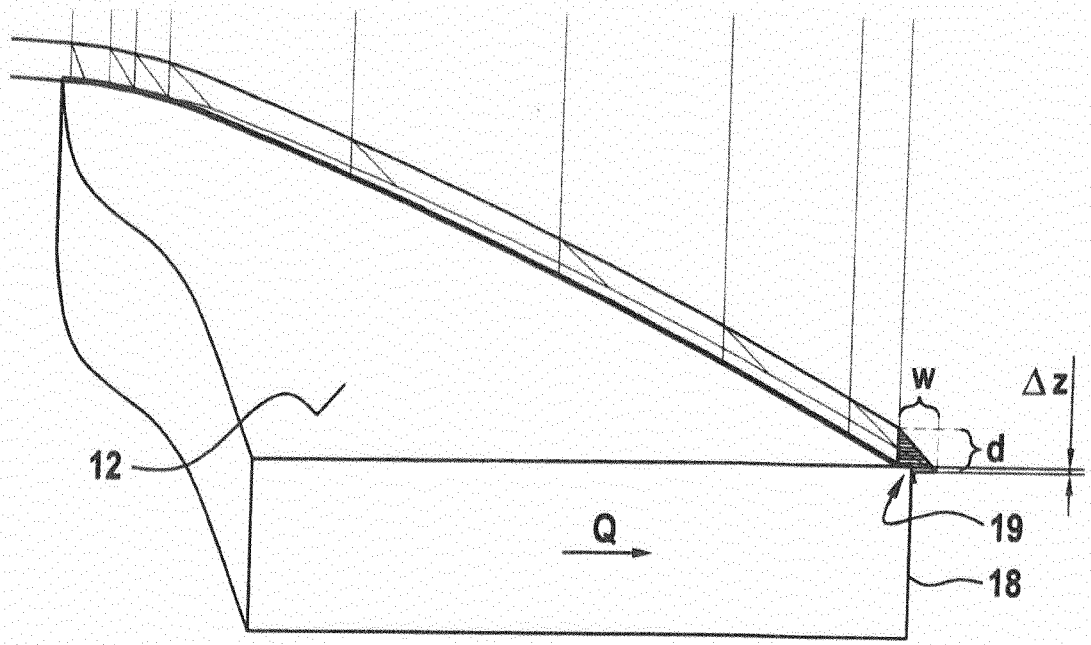



Fig. 3b

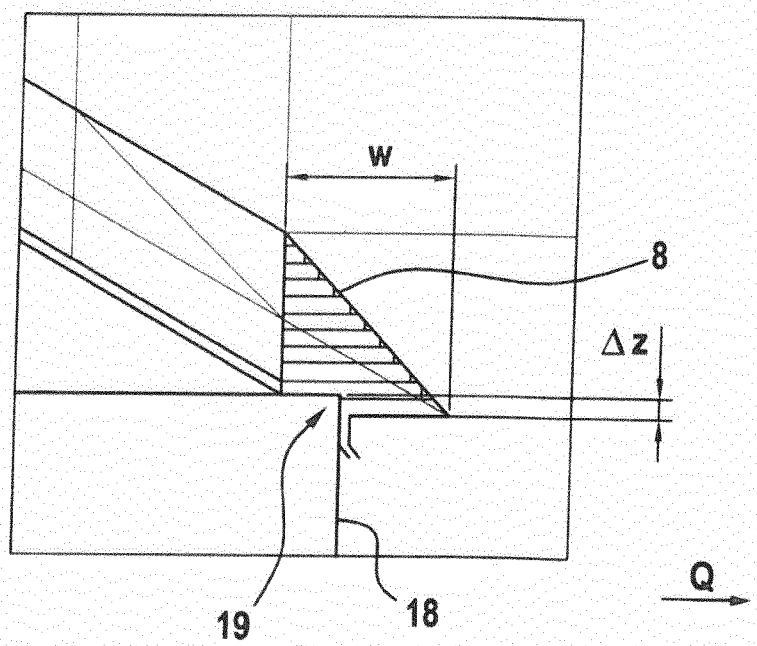


Fig. 4

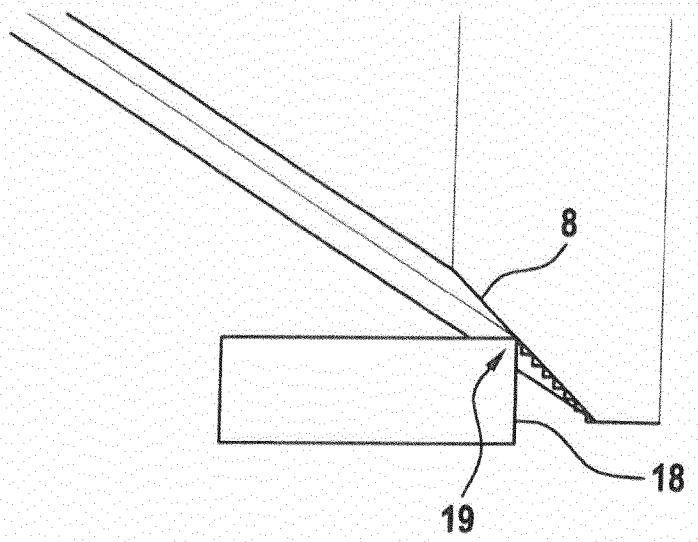



Fig. 5

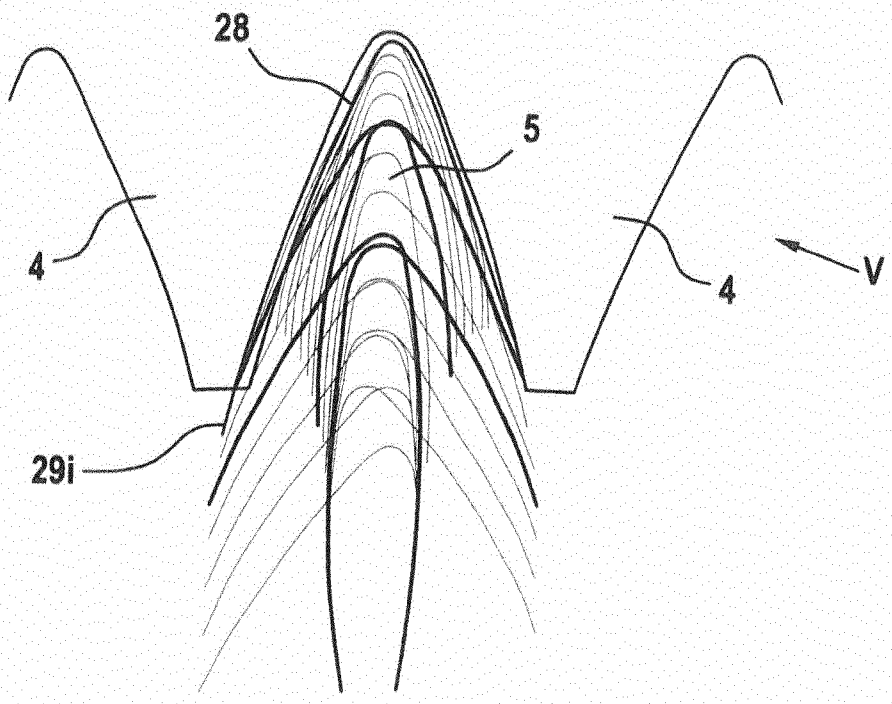


Fig. 6a

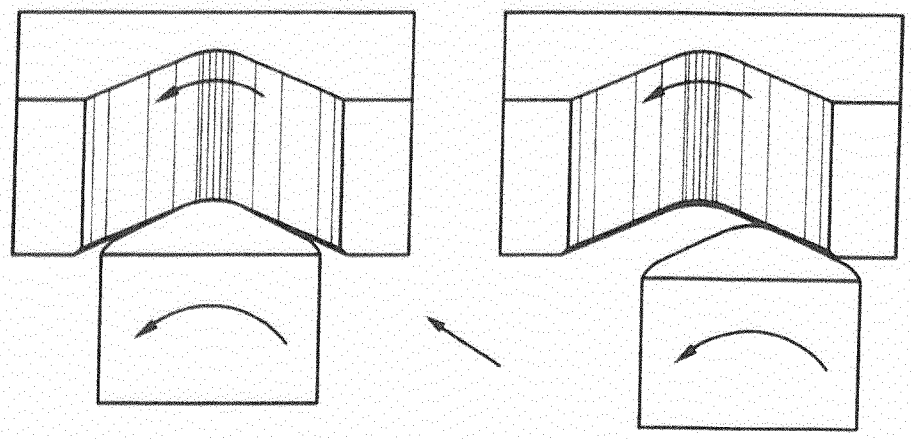


Fig. 6b

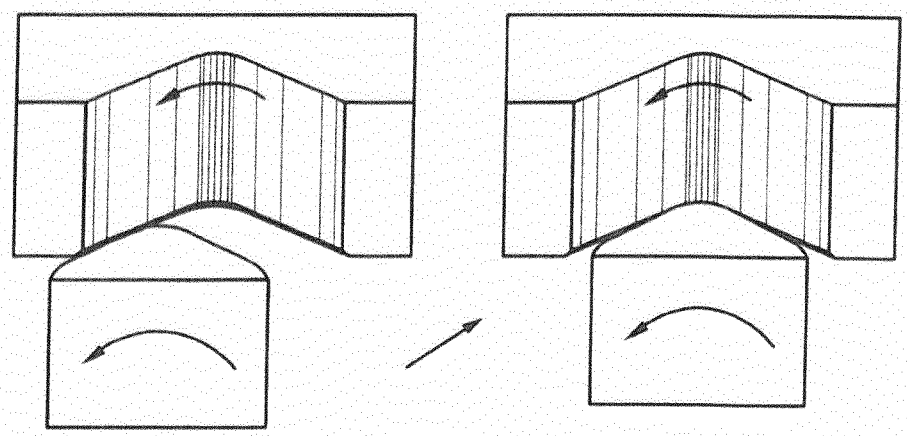


Fig. 7

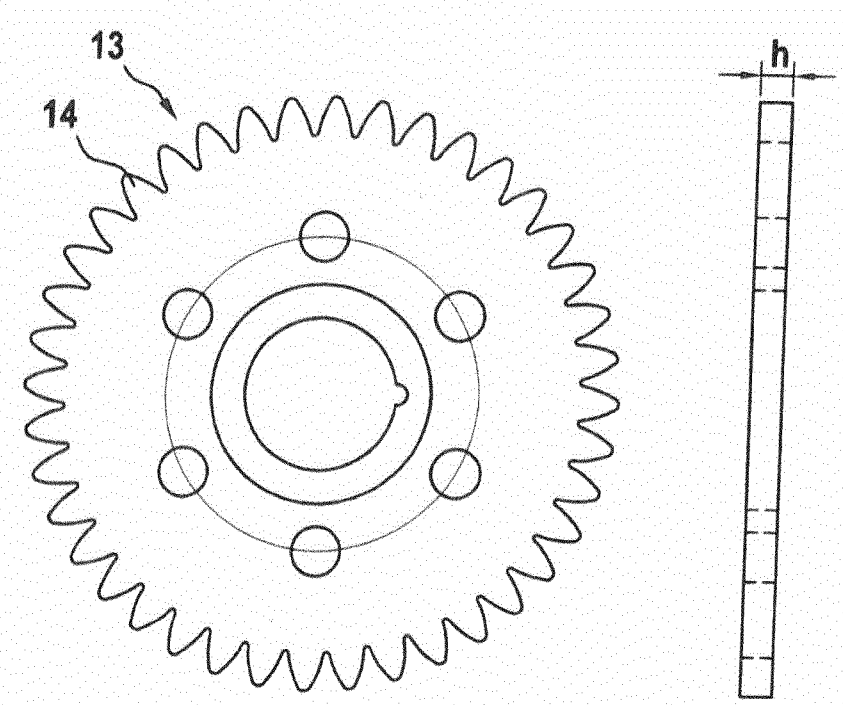



Fig. 8a

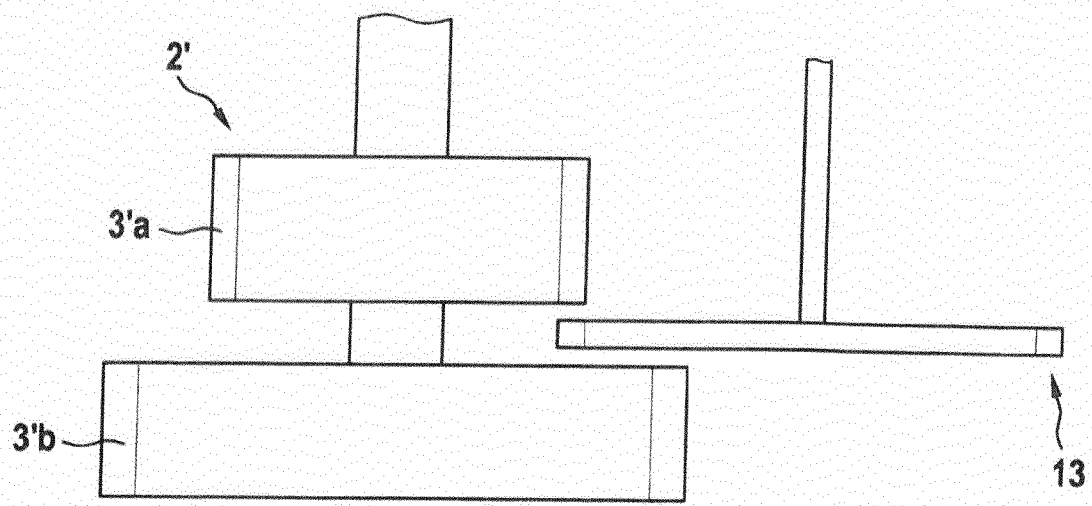


Fig. 8b

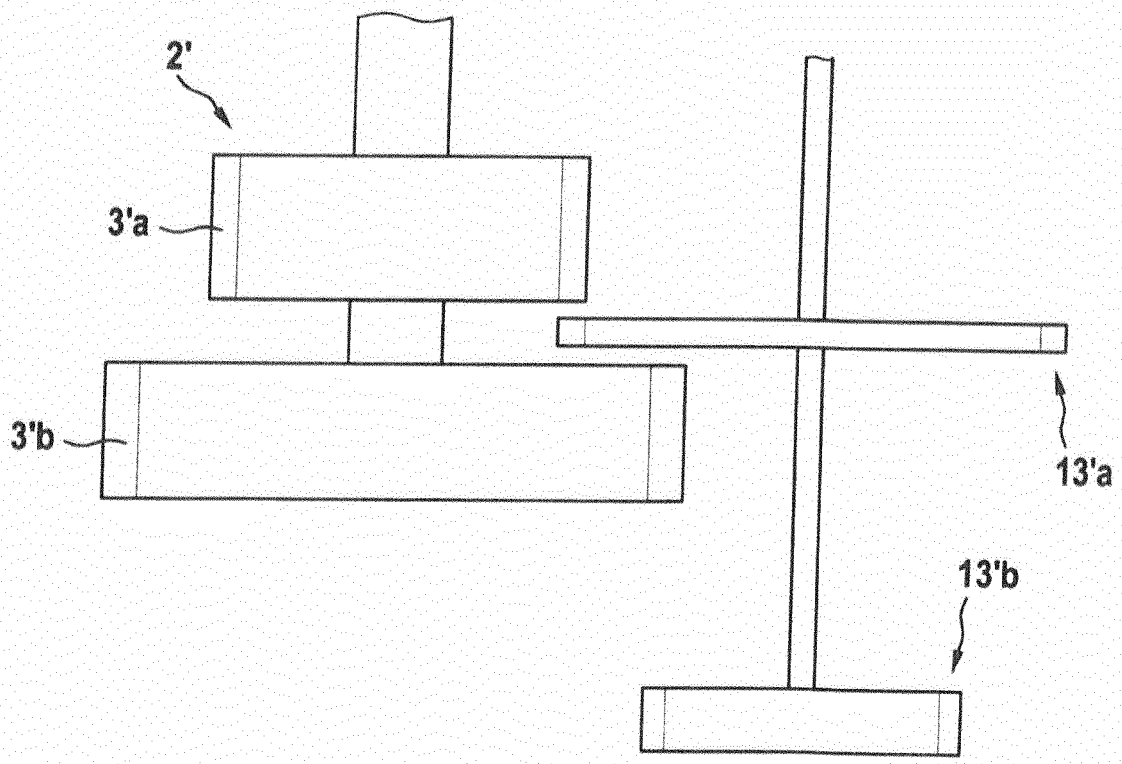
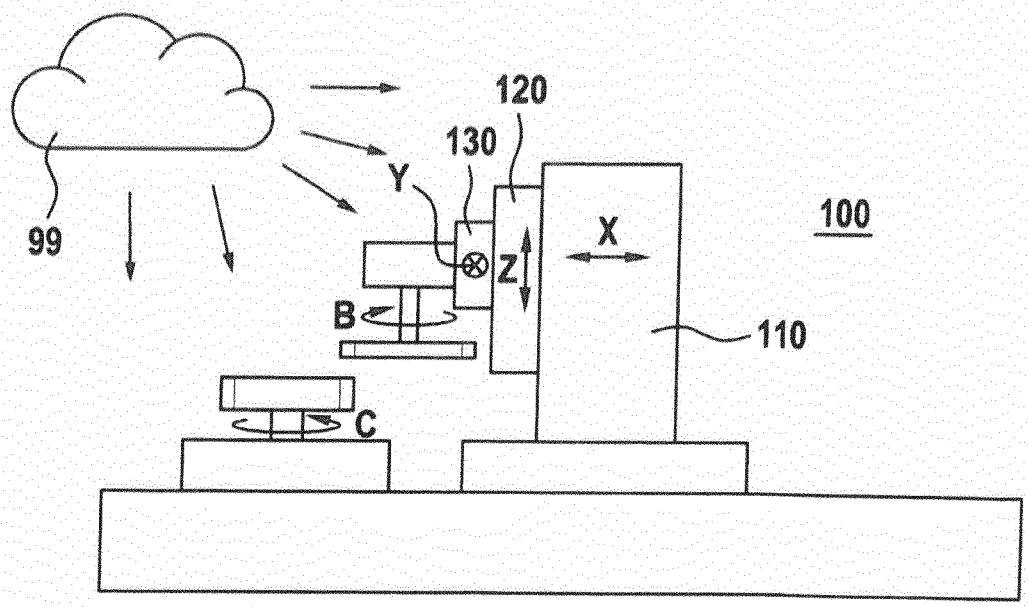



Fig. 9



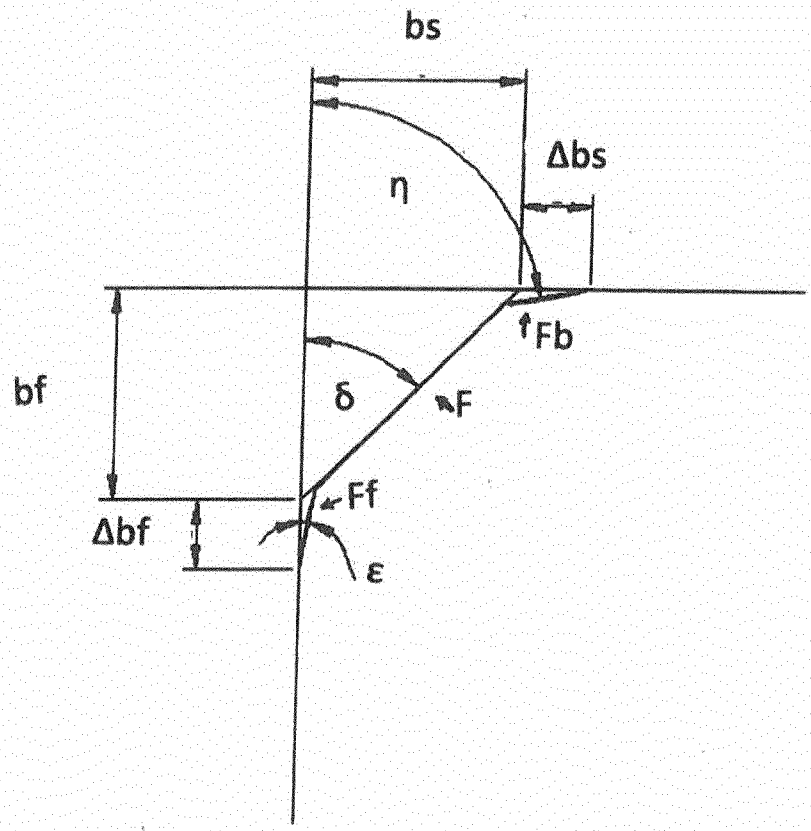



Fig.10

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
**PCT/EP2022/062597**

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

***B23F 19/10***(2006.01)i; ***B23F 21/12***(2006.01)i; ***B23F 1/00***(2006.01)i; ***B23F 5/00***(2006.01)i

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)

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, WPI Data

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|---|---|---|
| X | EP 0890406 A2 (MITSUBISHI HEAVY IND LTD [JP]) 13 January 1999 (1999-01-13) | 2-7,11,13,20,21 |
| A | column 4, line 38 - line 51; figure 1 | 1 |
| X | DE 10309116 A1 (WERNER HERMANN WERA WERKE [DE]) 09 September 2004 (2004-09-09) | 2,20,21 |
| A | paragraph [0033]; figures 2,5 | 1 |
| X | US 2111045 A (DRUMMOND ROBERT S) 15 March 1938 (1938-03-15) | 2 |
| | page 2, right-hand column, line 68 - page 3, left-hand column, line 49; figures 8-10 | |
| X | US 2343567 A (MILLER EDWARD W) 07 March 1944 (1944-03-07) | 2,18 |
| | page 2, left-hand column, line 1 - right-hand column, line 14; figures 1-20 | |
| X | EP 2694239 A1 (MAG IAS GMBH [DE]) 12 February 2014 (2014-02-12) | 19 |
| A | paragraph [0030]; figures 7,9 | 1-18,20,21 |
| X | DE 9418253 U1 (HURTH MASCHINEN WERKZEUGE [DE]) 26 January 1995 (1995-01-26) | 19 |
| A | paragraph [0019]; figures 1,2 | 1 |

☑ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"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)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"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
"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
"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
"&" document member of the same patent family

| Date of the actual completion of the international search | Date of mailing of the international search report |
|---|---|
| **01 September 2022** | **12 September 2022** |

| Name and mailing address of the ISA/EP | Authorized officer |
|---|---|
| **European Patent Office**<br>**p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk**<br>**Netherlands** | **Carmichael, Guy** |
| Telephone No. **(+31-70)340-2040**<br>Facsimile No. **(+31-70)340-3016** | Telephone No. |

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|---|---|---|
| A | BAUSCH ET AL. Die ergänzende Zahnformung, INNOVATIVE ZAHNRADFERTIGUNG, EXPERT VERLAG, PAGE(S) 304 - 327 , 01 January 2006 (2006-01-01), ISBN: 978-3-8169-1871-4. XP009187196<br>cited in the application<br>the whole document | 1-21 |
| A | DE 4316765 A1 (LORENZ GMBH MASCHF [DE]) 24 November 1994 (1994-11-24)<br>column 3, line 12 - line 27; figure 1 | 2,20,21 |
| A | DE 10116259 A1 (WERNER HERMANN WERA WERKE [DE]) 13 June 2002 (2002-06-13)<br>paragraph [0001]; figure 1 | 9 |
| A | DE 102018108632 A1 (LIEBHERR VERZAHNTECH GMBH [DE]) 17 October 2019 (2019-10-17)<br>cited in the application<br>abstract | 20,21 |
| X,P | WO 2021176084 A1 (GLEASON PFAUTER MASCHF GMBH [DE]) 10 September 2021 (2021-09-10)<br>the whole document | 1-17,19-21 |

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**
**Information on patent family members**

International application No.
**PCT/EP2022/062597**

| Patent document cited in search report | Publication date (day/month/year) | Patent family member(s) | Publication date (day/month/year) |
|---|---|---|---|
| EP 0890406 A2 | 13 January 1999 | BR 9802399 A | 24 August 1999 |
| | | DE 69826772 T2 | 10 March 2005 |
| | | EP 0890406 A2 | 13 January 1999 |
| | | KR 19990013627 A | 25 February 1999 |
| | | TW 542761 B | 21 July 2003 |
| | | TW 582317 U | 01 April 2004 |
| | | US 6065910 A | 23 May 2000 |
| DE 10309116 A1 | 09 September 2004 | NONE | |
| US 2111045 A | 15 March 1938 | NONE | |
| US 2343567 A | 07 March 1944 | NONE | |
| EP 2694239 A1 | 12 February 2014 | CN 103608144 A | 26 February 2014 |
| | | DE 102011006993 A1 | 11 October 2012 |
| | | DK 2694239 T3 | 07 May 2018 |
| | | EP 2694239 A1 | 12 February 2014 |
| | | ES 2662568 T3 | 09 April 2018 |
| | | JP 6012705 B2 | 25 October 2016 |
| | | JP 2014514172 A | 19 June 2014 |
| | | PL 2694239 T3 | 31 July 2018 |
| | | PT 2694239 T | 15 March 2018 |
| | | RU 2013143546 A | 20 May 2015 |
| | | US 2014053405 A1 | 27 February 2014 |
| | | WO 2012136774 A1 | 11 October 2012 |
| DE 9418253 U1 | 26 January 1995 | NONE | |
| DE 4316765 A1 | 24 November 1994 | NONE | |
| DE 10116259 A1 | 13 June 2002 | NONE | |
| DE 102018108632 A1 | 17 October 2019 | CN 110355426 A | 22 October 2019 |
| | | DE 102018108632 A1 | 17 October 2019 |
| | | EP 3552744 A1 | 16 October 2019 |
| | | JP 7058240 B2 | 21 April 2022 |
| | | JP 2019206071 A | 05 December 2019 |
| | | US 2019314911 A1 | 17 October 2019 |
| WO 2021176084 A1 | 10 September 2021 | DE 102020001428 A1 | 09 September 2021 |
| | | WO 2021176084 A1 | 10 September 2021 |

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2022/062597

**A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES**
INV. B23F19/10 B23F21/12 B23F1/00 B23F5/00
ADD.

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

**B. RECHERCHIERTE GEBIETE**

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole )
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, WPI Data

**C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN**

| Kategorie* | Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile | Betr. Anspruch Nr. |
|---|---|---|
| X | EP 0 890 406 A2 (MITSUBISHI HEAVY IND LTD [JP]) 13. Januar 1999 (1999-01-13) | 2-7,11, 13,20,21 |
| A | Spalte 4, Zeile 38 - Zeile 51; Abbildung 1 | 1 |
| X | DE 103 09 116 A1 (WERNER HERMANN WERA WERKE [DE]) 9. September 2004 (2004-09-09) | 2,20,21 |
| A | Absatz [0033]; Abbildungen 2,5 | 1 |
| X | US 2 111 045 A (DRUMMOND ROBERT S) 15. März 1938 (1938-03-15) Seite 2, rechte Spalte, Zeile 68 - Seite 3, linke Spalte, Zeile 49; Abbildungen 8-10 | 2 |
| X | US 2 343 567 A (MILLER EDWARD W) 7. März 1944 (1944-03-07) Seite 2, linke Spalte, Zeile 1 - rechte Spalte, Zeile 14; Abbildungen 1-20 | 2,18 |

-/--

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

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :
"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
"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)
"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist
"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
"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung;; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
"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
"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

| Datum des Abschlusses der internationalen Recherche | Absendedatum des internationalen Recherchenberichts |
|---|---|
| 1. September 2022 | 12/09/2022 |

| Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde | Bevollmächtigter Bediensteter |
|---|---|
| Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2<br>NL - 2280 HV Rijswijk<br>Tel. (+31-70) 340-2040,<br>Fax: (+31-70) 340-3016 | Carmichael, Guy |

1

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2022/062597

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

| Kategorie* | Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile | Betr. Anspruch Nr. |
|---|---|---|
| X | EP 2 694 239 A1 (MAG IAS GMBH [DE]) 12. Februar 2014 (2014-02-12) | 19 |
| A | Absatz [0030]; Abbildungen 7,9 | 1-18,20, 21 |
| X | DE 94 18 253 U1 (HURTH MASCHINEN WERKZEUGE [DE]) 26. Januar 1995 (1995-01-26) | 19 |
| A | Absatz [0019]; Abbildungen 1,2 | 1 |
| A | BAUSCH ET AL: "Die ergänzende Zahnformung", 1. Januar 2006 (2006-01-01), INNOVATIVE ZAHNRADFERTIGUNG, EXPERT VERLAG, PAGE(S) 304 - 327, XP009187196, ISBN: 978-3-8169-1871-4 in der Anmeldung erwähnt das ganze Dokument | 1-21 |
| A | DE 43 16 765 A1 (LORENZ GMBH MASCHF [DE]) 24. November 1994 (1994-11-24) Spalte 3, Zeile 12 - Zeile 27; Abbildung 1 | 2,20,21 |
| A | DE 101 16 259 A1 (WERNER HERMANN WERA WERKE [DE]) 13. Juni 2002 (2002-06-13) Absatz [0001]; Abbildung 1 | 9 |
| A | DE 10 2018 108632 A1 (LIEBHERR VERZAHNTECH GMBH [DE]) 17. Oktober 2019 (2019-10-17) in der Anmeldung erwähnt Zusammenfassung | 20,21 |
| X,P | WO 2021/176084 A1 (GLEASON PFAUTER MASCHF GMBH [DE]) 10. September 2021 (2021-09-10) das ganze Dokument | 1-17, 19-21 |

1

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2022/062597

| Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument | Datum der Veröffentlichung | Mitglied(er) der Patentfamilie | Datum der Veröffentlichung |
|---|---|---|---|
| EP 0890406 A2 | 13-01-1999 | BR 9802399 A | 24-08-1999 |
| | | DE 69826772 T2 | 10-03-2005 |
| | | EP 0890406 A2 | 13-01-1999 |
| | | KR 19990013627 A | 25-02-1999 |
| | | TW 542761 B | 21-07-2003 |
| | | TW 582317 U | 01-04-2004 |
| | | US 6065910 A | 23-05-2000 |
| DE 10309116 A1 | 09-09-2004 | KEINE | |
| US 2111045 A | 15-03-1938 | KEINE | |
| US 2343567 A | 07-03-1944 | KEINE | |
| EP 2694239 A1 | 12-02-2014 | CN 103608144 A | 26-02-2014 |
| | | DE 102011006993 A1 | 11-10-2012 |
| | | DK 2694239 T3 | 07-05-2018 |
| | | EP 2694239 A1 | 12-02-2014 |
| | | ES 2662568 T3 | 09-04-2018 |
| | | JP 6012705 B2 | 25-10-2016 |
| | | JP 2014514172 A | 19-06-2014 |
| | | PL 2694239 T3 | 31-07-2018 |
| | | PT 2694239 T | 15-03-2018 |
| | | RU 2013143546 A | 20-05-2015 |
| | | US 2014053405 A1 | 27-02-2014 |
| | | WO 2012136774 A1 | 11-10-2012 |
| DE 9418253 U1 | 26-01-1995 | KEINE | |
| DE 4316765 A1 | 24-11-1994 | KEINE | |
| DE 10116259 A1 | 13-06-2002 | KEINE | |
| DE 102018108632 A1 | 17-10-2019 | CN 110355426 A | 22-10-2019 |
| | | DE 102018108632 A1 | 17-10-2019 |
| | | EP 3552744 A1 | 16-10-2019 |
| | | JP 7058240 B2 | 21-04-2022 |
| | | JP 2019206071 A | 05-12-2019 |
| | | US 2019314911 A1 | 17-10-2019 |
| WO 2021176084 A1 | 10-09-2021 | DE 102020001428 A1 | 09-09-2021 |
| | | WO 2021176084 A1 | 10-09-2021 |