



(10) **DE 10 2019 004 687 A1** 2021.01.07

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2019 004 687.0**
 (22) Anmeldetag: **02.07.2019**
 (43) Offenlegungstag: **07.01.2021**

(51) Int Cl.: **B23F 5/04 (2006.01)**
B23F 5/20 (2006.01)
B24B 53/12 (2006.01)

(71) Anmelder:
**Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
 (RWTH) Aachen, 52062 Aachen, DE**

(74) Vertreter:
Jackisch-Kohl und Kohl, 70469 Stuttgart, DE

(72) Erfinder:
**Löpenhaus, Christoph, Dr., 52070 Aachen, DE;
 Brecher, Christian, Prof. Dr.-Ing., 52074 Aachen,
 DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

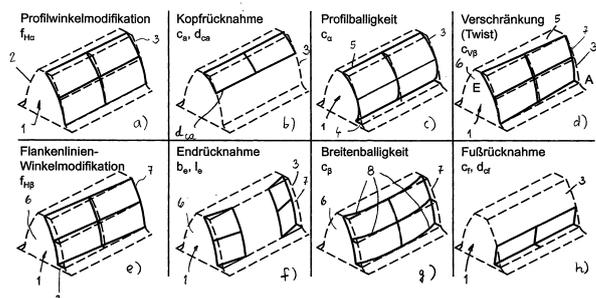
DE	197 06 867	A1
DE	10 2012 005 228	A1
DE	10 2015 008 963	A1
DE	10 2016 008 991	A1
DE	695 26 851	T2

Rechercheantrag gemäß § 43 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Herstellung von Zahnflankenmodifikationen an Verzahnungen von Werkstücken sowie Werkzeuge zur Durchführung des Verfahrens**

(57) Zusammenfassung: Das Verfahren dient zur Herstellung von Zahnflankenmodifikationen an Verzahnungen von Werkstücken, bei dem das Werkstück und ein Werkzeug relativ zueinander bewegt und hierbei Material von der Zahnflanke des Werkstückes abgetragen wird. An Zähnen des Werkstückes werden unterschiedliche Zahnflankenmodifikationen mittels eines kontinuierlich abwälzenden Fertigungsverfahrens erzeugt, indem das Werkzeug individuell unterschiedliche Werkzeugprofilgeometrien aufweist, die an den Zähnen des Werkstückes die unterschiedlichen Zahnflankenmodifikationen erzeugen. Das Werkzeug kann ein Abrichter mit veränderlichem Profil sein, um bei abrichtbaren Werkzeugen individuell unterschiedliche Werkzeugprofilgeometrien vorzusehen



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung von Zahnflankenmodifikationen an Verzahnungen von Werkstücken nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1 sowie mindestens ein Werkzeug zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 9.

[0002] Im Zuge der Elektromobilität kommt dem Geräuschverhalten von Zahnradgetrieben eine erhöhte Bedeutung zu. Besonders störend wird die tonale Charakteristik des Getriebegeräusches empfunden. Tonale Geräusche zeichnen sich dadurch aus, dass das Frequenzspektrum ausgeprägte Amplituden einzelner Frequenzen (Töne) aufweist, die über dem Amplitudenniveau des Grundrauschens liegen. Dies sind bei Getriebeverzahnungen insbesondere, aber nicht ausschließlich, die Frequenz des Zahneingriffes und deren Höherharmonische, die im Wesentlichen die Tonalität des Getriebegeräusches bestimmen. Mit zunehmender Drehzahl nimmt häufig die Tonalität zu. Um das Getriebegeräusch zu verringern, werden an den Verzahnungen der Getrieberäder Flankenmodifikationen vorgenommen, die für das Laufverhalten von großer Bedeutung sind. Üblicherweise werden die Modifikationen von Zahn zu Zahn identisch ausgeführt. Durch eine variable Flankenmodifikation von Zahn zu Zahn ergibt sich eine erhebliche Verbesserung des Lauf- und damit auch des Geräuschverhaltens, da insbesondere die Tonalität, entstehend durch eine identische Anregung von Zahneingriff zu Zahneingriff, gemindert wird.

[0003] Um solche Flankenmodifikationen an den Zähnen vorzusehen, wird üblicherweise das diskontinuierliche Profilschleifen eingesetzt. Dazu wird die Position des Werkzeuges von Lücke zu Lücke in den Eingriffsbedingungen zum Werkstück etwas verändert. Solche Verfahren sind allerdings sehr aufwändig und für eine hochproduktive Fertigung wenig geeignet.

[0004] Für hochproduktive Fertigungsverfahren werden kontinuierlich abwälzende Fertigungsverfahren eingesetzt. Mit ihnen kann allerdings an den Zähnen des Werkstückes stets nur eine gleiche Flankenmodifikation vorgesehen werden. Dadurch lässt sich aber die Tonalität und damit das Geräuschverhalten nur wenig verringern.

[0005] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, das gattungsgemäße Verfahren und die Werkzeuge so auszugestalten, dass in kostengünstiger und in hochproduktiver Weise die Geräuschentwicklung eines Zahnradgetriebes erheblich verringert werden kann.

[0006] Diese Aufgabe wird beim gattungsgemäßen Verfahren erfindungsgemäß mit den kennzeichnenden Merkmalen des Anspruchs 1 und bei den Werk-

zeugen erfindungsgemäß mit den Merkmalen des Anspruchs 9 gelöst.

[0007] Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren können unterschiedliche Zahnflankenmodifikationen am Werkstück von Zahn zu Zahn durch ein kontinuierlich abwälzendes Fertigungsverfahren erzeugt werden. Hierfür ist das eingesetzte Werkzeug mit individuell unterschiedlichen Werkzeugprofilgeometrien ausgestattet. Bei abrichtbaren Werkzeugen wird diese Geometrie durch einen entsprechenden Abrichter mit veränderlichem Profil eingebracht. Während des Abwälzvorganges werden mit diesen unterschiedlichen Werkzeugprofilgeometrien an den Zähnen des Werkstückes die unterschiedlichen Zahnflankenmodifikationen von Zahn zu Zahn erzeugt. Je nach Gestaltung des Getriebes werden die Werkzeugprofilgeometrien am Werkzeug so gestaltet, dass die dadurch am Werkstück gebildeten Zahnflankenmodifikationen zu einer nur geringen Geräuschentwicklung und insbesondere Tonalität des Getriebes führen. Aufgrund der kontinuierlich abwälzenden Fertigungsweise lassen sich die Werkstücke kostengünstig und mit hoher Produktivität vorsehen.

[0008] Für die kontinuierlich abwälzenden Fertigungsverfahren kommen die üblichen bekannte Verfahren in Betracht, wie beispielhaft ein kontinuierliches Wälzschleifen, kontinuierliches Profilschleifen, Wälzfräsen, Verzahnungshonen, Verzahnungsschaben, Wälzschälen, Wälzstoßen und dergleichen. Mit diesen Verfahren ist die Feinbearbeitung sowohl im weichen wie auch gehärteten Werkstückwerkstoffzustand möglich.

[0009] Vorteilhaft wird eine Teilergleichheit von Werkstückzähnezahl und Werkzeugzähnezahl realisiert.

[0010] Als Werkzeuge können schneckenförmig ausgebildete Werkzeuge eingesetzt werden. Sie werden beispielsweise für das kontinuierliche Wälzschleifen, kontinuierliche Profilschleifen, Wälzfräsen und dergleichen eingesetzt.

[0011] Das schneckenförmige Werkzeug kann mit wenigstens zwei Gängen versehen sein, die unterschiedlich profiliert sind. Dadurch wird erreicht, dass sich die individuellen Werkzeugprofilgeometrien von Gang zu Gang auf dem zu bearbeitenden Werkstück periodisch abbilden.

[0012] Die Gangzahl des schneckenförmigen Werkzeuges kann je nach Getriebeausbildung und/oder dem zu bearbeitenden Werkstück gestaltet sein. Hat das schneckenförmige Werkzeug beispielhaft drei unterschiedlich profilierte Gänge, dann werden am Werkstück die Zähne periodisch mit den entsprechenden Zahnflankenmodifikationen ausgestattet. Bei drei Gängen mit unterschiedlicher Profilierung

wiederholt sich daher die Ausbildung der Zahnflankenmodifikationen am Werkstück nach jeweils drei Zähnen.

[0013] Bei einer anderen vorteilhaften Ausbildung ist das schneckenförmige Werkzeug so ausgebildet, dass es mindestens nur einen Gang aufweist, der über seine Länge unterschiedlich profilierte Gangbereiche aufweist. Diese Gangbereiche sind dann so vorgesehen, dass mit ihnen aufeinanderfolgende Zähne des Werkstückes bearbeitet werden. In diesem Fall und auch unter Einbeziehung einer gezielten Beeinflussung der Bearbeitungskinetik ist es nicht erforderlich, dass zwischen der Werkstückzähnezahl und der Werkzeuggangzahl ein ganzzahliger Teiler realisiert wird.

[0014] Der Gang weist wenigstens zwei unterschiedlich profilierte Gangbereiche auf, so dass am Werkstück zwei unterschiedliche Zahnflankenmodifikationen vorgesehen werden können. Die unterschiedlich profilierten Gangbereiche sind vorteilhaft so innerhalb des Ganges vorgesehen, dass aufeinanderfolgende Zähne des Werkstückes mit der jeweiligen Zahnflankenmodifikation versehen sind. Aufgrund des kontinuierlich abwälzenden Fertigungsverfahrens sind daher in dem einzigen Gang des schneckenförmigen Werkzeuges die entsprechenden Gangbereiche wiederholend mit Abstand hintereinander angeordnet. Zur Aufprägung unterschiedlicher Modifikationen ist möglicherweise eine Relativbewegung des Werkzeugs z.B. durch Shiften (Diagonalschleifen) oder eine Relativbewegung des Werkstücks z.B. durch Lösung der Wälzkopplung notwendig.

[0015] Das Verfahren ist so gestaltet, dass mit dem Werkzeug unmittelbar das Werkstück bearbeitet werden kann, das später in das Getriebe eingebaut wird. Als Werkzeug kann aber auch ein entsprechend geometrisch modifiziertes Abrichtwerkzeug, z.B. mehrrollige Profilrollen, eingesetzt werden, mit dem das eigentliche Bearbeitungswerkzeug hinsichtlich veränderlicher Geometrien bearbeitet wird. Mit dem Abrichtwerkzeug lassen sich die unterschiedlichen Zahnflankenmodifikationen am Bearbeitungswerkzeug einfach erzeugen.

[0016] Es ist auch möglich, als Bearbeitungswerkzeuge zahnradförmige Werkzeuge zu verwenden, deren Zähne unterschiedliche Zahngeometrien aufweisen. Sie werden beispielsweise für das Verzahnungshonen, Wälzstoßen, Wälzschälen und dergleichen eingesetzt. Diese unterschiedlichen Zahngeometrien bilden sich beim kontinuierlich abwälzenden Fertigungsverfahren an den Zahnflanken des Werkstückes periodisch ab. Das zahnradförmige Werkzeug hat wenigstens zwei unterschiedliche Zahngeometrien, die sich über den Umfang des zahnradförmigen

Werkzeuges vorteilhaft unregelmäßig wiederholen.

[0017] Das zur Durchführung des Verfahrens eingesetzte erfindungsgemäße Werkzeug zeichnet sich dadurch aus, dass es individuelle Werkzeugprofilgeometrien aufweist. Je nach Zahl dieser unterschiedlichen Werkzeugprofilgeometrien lassen sich am Werkstück entsprechende Zahnflankenmodifikationen vorsehen. Das Werkzeug hat zumindest zwei individuelle Werkzeugprofilgeometrien, so dass das zu bearbeitende Werkstück mit zwei unterschiedlichen Zahnflankenmodifikationen versehen sein kann.

[0018] Bei einer vorteilhaften Ausbildung ist das Werkzeug schneckenförmig ausgebildet. Es kann hierbei wenigstens zwei Gänge aufweisen, die unterschiedlich profiliert sind. Mit einem solchen Werkzeug können die gewünschten Zahnflankenmodifikationen periodisch am Werkstück erzeugt werden.

[0019] Bei einer anderen vorteilhaften Ausführung ist das Werkzeug ebenfalls schneckenförmig ausgebildet, jedoch mit nur einem Gang versehen. In diesem Falle weist der Gang über seine Länge unterschiedlich profilierte Gangbereiche auf. Sie sind in einem solchen Abstand längs des Ganges hintereinander vorgesehen, dass mit diesen Gangbereichen die Zahnflanken aufeinanderfolgender Zähne des Werkstückes modifiziert werden können.

[0020] Ebenfalls ist es möglich, das Werkzeug zahnradförmig auszubilden. In diesem Falle sind die Zähne mit einer individuellen Zahngeometrie versehen. Dieses Werkzeug weist dann wenigstens zwei individuelle unterschiedliche Zahngeometrien auf, so dass an den Zähnen des Werkstückes wenigstens zwei unterschiedliche Zahnflankenmodifikationen vorgesehen werden können. Hierbei wird ein ganzzahliges Teilverhältnis der Zähnezahlen von Werkzeug und Werkstück eingesetzt.

[0021] Das zahnradförmige Werkzeug kann eine Außen- oder eine Innenverzahnung aufweisen.

[0022] Das Werkzeug kann auch ein Abrichter mit veränderlichem Profil sein, um bei abrichtbaren Werkzeugen individuell unterschiedliche Werkzeugprofilgeometrien vorzusehen.

[0023] Der Anmeldungsgegenstand ergibt sich nicht nur aus dem Gegenstand der einzelnen Patentansprüche, sondern auch durch alle in den Zeichnungen und der Beschreibung offenbarten Angaben und Merkmale. Sie werden, auch wenn sie nicht Gegenstand der Ansprüche sind, als erfindungswesentlich beansprucht, soweit sie einzeln oder in Kombination gegenüber dem Stand der Technik neu sind.

[0024] Weitere Merkmale der Erfindung ergeben sich aus den weiteren Ansprüchen, der Beschreibung und den Zeichnungen.

[0025] Die Erfindung wird anhand einiger in den Zeichnungen dargestellter Ausführungsformen näher erläutert. Es zeigen

Fig. 1 verschiedene typische Zahnflankenmodifikationen von Zahnrädern,

Fig. 2 die Ausbildung von Zähnen eines Zahnrades nach dem Stand der Technik,

Fig. 3 in einer Darstellung entsprechend **Fig. 2** die Zähne eines nach dem erfindungsgemäßen Verfahren hergestellten Zahnrades,

Fig. 4 eine Aufstellung der üblichen Verzahnverfahren,

Fig. 5 die Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens, erläutert anhand eines schneckenförmigen Werkzeuges mit ganzzahliger Übersetzung,

Fig. 6 in einer Darstellung entsprechend **Fig. 5** die Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens mittels eines zahnradförmigen Werkzeuges mit ganzzahliger Übersetzung,

Fig. 7 die geometrisch-kinematische Realisierung des erfindungsgemäßen Verfahrens bei einem schneckenförmigen Werkzeug mit einer ganzzahligen oder einer unganzzahligen Übersetzung.

[0026] Mit den im Folgenden beschriebenen Verfahren werden einzelne Zähne oder Gänge eines Werkzeuges individuell unterschiedlich gestaltet. Bei Teilergleichheit zum zu bearbeitenden Werkstück werden diese individuellen Zahn- bzw. Ganggeometrien auf das Werkstück in einem kontinuierlichen Verfahren aufgebracht.

[0027] Bei fehlender Teilergleichheit, insbesondere bei schneckenbasierten Werkzeugen, erfolgt eine veränderliche Werkzeuggeometrieerzeugung nicht nur pro Gang, sondern auch entlang des Ganges. Durch die Koppelung von veränderlicher Geometrie von Gang zu Gang sowie entlang eines Ganges mit einer entsprechenden Verfahrenkinematik prägt sich eine flankenindividuelle Geometrie auf den Zähnen des Werkstückes auf.

[0028] In **Fig. 1** sind typische Zahnflankenmodifikationen dargestellt. Das Verfahren kann selbstverständlich auch für nicht typische Modifikationen genutzt werden.

[0029] **Fig. 1a** zeigt eine Profilwinkelmodifikation f_{Ha} an einem Zahn. Die Profilwinkelmodifikation ist durch die dick ausgezogenen Linien veranschaulicht. Der dargestellte Zahn **1** hat die beiden Zahnflanken **2**,

3. Mit gestrichelten Linien sind die nicht bearbeiteten Zahnflanken dargestellt. Im Ausführungsbeispiel ist die Zahnflanke **3** mit einem entsprechenden Werkzeug so bearbeitet worden, dass diese Zahnflanke die durch dicke Linien gekennzeichnete Profilwinkelmodifikation aufweist.

[0030] **Fig. 1b** zeigt als Zahnflankenmodifikation eine Kopfrücknahme c_a der Zahnflanke **3**. Die Kopfrücknahme ist wiederum durch dicke ausgezogene Linien veranschaulicht. Die Kopfrücknahme c_a beginnt bei d_{ca} und erstreckt sich bis zum Kopfkreis. Der Materialabtrag zur Erzielung der Kopfrücknahme nimmt somit, im Stirnschnitt gesehen, beginnend bei d_{ca} bis zum Kopfkreis zu.

[0031] In **Fig. 1c** ist eine an der Zahnflanke **3** vorgesehene Profilballigkeit c_a dargestellt. Die Profilballigkeit ist über die Höhe vom Fuß **4** zum Kopf **5** sowie über die gesamte Breite des Zahnes **1** vorgesehen.

[0032] Bei der Zahnflankenmodifikation gemäß **Fig. 1d** handelt es sich um eine Verschränkung $c_{V\beta}$. Sie ist wiederum durch fett ausgezogene Linien dargestellt und im Ausführungsbeispiel an der Zahnflanke **3** des Zahnes **1** vorgesehen. Die Verschränkung $c_{V\beta}$ erstreckt sich über die Höhe und die Breite der Zahnflanke **3**. Die Verschränkung ist so ausgebildet, dass die Breite des Kopfes **5** an der einen Stirnseite **6** des Zahnes **1** kleiner ist als an der gegenüberliegenden Stirnseite **7**. Die Fußbreite des Zahnes **1** ist im Bereich der Stirnseite **6** größer als im Bereich der gegenüberliegenden Stirnseite **7**. Die Ausprägung der Verschränkung kann ebenfalls genau gegenläufig zu den Stirnseiten erfolgen.

[0033] Eine weitere typische Zahnflankenmodifikation zeigt **Fig. 1e**. Hier handelt es sich um eine Flankenlinien-Winkelmodifikation $f_{H\beta}$. Sie ist an der Zahnflanke **3** des Zahnes **1** vorgesehen und erstreckt sich über die Höhe des Zahnes **1** sowie über dessen Breite. Die ausgezogenen Linien zeigen die Flankenlinien-Winkelmodifikation $f_{H\beta}$. Eine solche Modifikation entsteht durch eine lineare Rücknahme des Materials des Zahnes **1** über dessen Breite. Dementsprechend ist die Stirnseite **7** des Zahnes **1** über dessen Höhe breiter als die gegenüberliegende Stirnseite **6**.

[0034] Die Endrücknahme b_e , l_e in **Fig. 1f** ist eine weitere typische Zahnflankenmodifikation. Die Endrücknahme ist beispielhaft an der Zahnflanke **3** des Zahnes **1** vorgesehen. Die Endrücknahme b_e , l_e ergibt sich dadurch, dass vom Zahn **1** im Bereich seiner beiden Stirnseiten **6**, **7** über die Zahnhöhe Material über eine bestimmte Zahnbreite abgenommen wird. Die beiden Endrücknahmen an der Zahnflanke **3** sind durch ausgezogene Linien veranschaulicht.

[0035] Bei der Herstellung der Breitenballigkeit c_β (**Fig. 1g**) wird symmetrisch Material in Richtung auf

die beiden Stirnseiten **6, 7** des Zahnes **1** abgetragen. Die Breitenballigkeit c_β ist daher so ausgebildet, dass die über die Breite sich erstreckenden Flankenlinien kreisbogenförmig verlaufen.

[0036] Schließlich wird in **Fig. 1h** als weitere typische Zahnflankenmodifikation die Fußrücknahme c_f dargestellt. Sie ist über die Breite der Zahnflanke **3** im Fußbereich vorgesehen und erstreckt sich nur über einen Teil der Höhe der Zahnflanke **3**.

[0037] Die anhand der **Fig. 1a** bis **Fig. 1h** dargestellten Zahnflankenmodifikationen können symmetrisch oder unsymmetrisch und in verschiedenen Überlagerungen und Größen an beiden Zahnflanken **2,3**, vorgesehen werden.

[0038] **Fig. 2** zeigt beispielhaft drei Zähne **1** eines geradzahnten Zahnrades. Alle Zähne **1** dieses Zahnrades sind an ihrer Zahnflanke **3** beispielhaft mit einer Breitenballigkeit c_β versehen. Alle Zähne **1** dieses Zahnrades sind gleich ausgebildet, d.h. sie haben jeweils die gleiche Zahnflankenmodifikation.

[0039] **Fig. 3** zeigt einen Teil eines Zahnrades, das nach dem erfindungsgemäßen Verfahren hergestellt worden ist. Mit diesem Verfahren ist es möglich, die Zahnflanken **3** der Zähne **1** mit unterschiedlichen Zahnflankenmodifikationen zu versehen. So ist beispielhaft dargestellt, dass der Zahn **1** an seiner Zahnflanke **3** mit einer Breitenballigkeit c_β , der Zahn **1'** an der Zahnflanke **3** mit einer Profilwinkelmodifikation $f_{H\alpha}$ und der Zahn **1''** an der Zahnflanke **3** mit einer Profilballigkeit c_α versehen ist.

[0040] Die in **Fig. 3** dargestellten Zahnflankenmodifikationen an den Zähnen des Zahnrades sind nur beispielhaft zu verstehen. Mit dem Verfahren ist es möglich, an einem Zahnrad die Zähne hinsichtlich ihrer Zahnflankenmodifikationen gezielt zu variieren.

[0041] Mit diesem Verfahren ist es möglich, den steigenden Anforderungen an das Geräuschverhalten von Zahnradern insbesondere im Bereich der Elektromobilität zu genügen. Da im Bereich der Elektromobilität keine geräuschemittierenden Verbrennungsmotoren mehr vorhanden sind, spielt das Geräuschverhalten der Zahnradern bzw. des Zahnradgetriebes eine wesentliche Rolle. Die Tonalität der Zahneingriffe im Getriebe tritt bei der Elektromobilität in den Vordergrund. Aufgrund der variablen Geometrien von Zahn zu Zahn wird die Tonalität gebrochen. Diese variablen Geometrien können mittels eines kontinuierlich arbeitenden Verfahrens hergestellt werden, so dass eine hohe Produktivität erreicht wird.

[0042] Bei dem Verfahren kann es sich um ein Bearbeitungs- oder um ein Abrichtverfahren handeln.

[0043] Die Zähne können Bestandteil von Getrieberrädern, aber auch von Abricht- und Bearbeitungswerkzeugen zur Herstellung solcher Getrieberräder sein.

[0044] Anhand von **Fig. 4** wird erläutert, wo das Verfahren eingesetzt wird. Die Verzahnverfahren lassen sich unterteilen in diskontinuierlich sowie in kontinuierlich teilende Verzahnverfahren. Relevant sind die kontinuierlich teilenden Verzahnverfahren. Hierfür können schneckenförmige Werkzeuge eingesetzt werden, beispielsweise zum Wälzschleifen, zum Profilschleifen oder zum (Fertig- / Schäl-) Wälzfräsen eingesetzt.

[0045] Alternativ können zahnradförmige Werkzeuge eingesetzt werden. Sie kommen beispielsweise zum Einsatz beim Verzahnungshonen, Verzahnungsschaben, (Hart-) Wälzschälern oder (Hart-) Wälzstoßen.

[0046] Anhand von **Fig. 5** wird die Bearbeitung eines Werkstückes **9** durch ein schneckenförmiges Werkzeug **10** bzw. **11** erläutert. Die Übersetzung zwischen dem Werkzeug **10/11** und dem Werkstück **9** ist ganzzahlig.

[0047] Das Werkstück **9** hat die Zähnezah z_2 , die im Ausführungsbeispiel **12** beträgt.

[0048] Das Werkzeug **10/11** hat die Gangzahl z_0 , wobei im Ausführungsbeispiel drei Gänge individuell profiliert sind. Diese unterschiedlich profilierten Gänge sind in **Fig. 5** mit $z_{0,1}$, $z_{0,2}$ und $z_{0,3}$ bezeichnet. Die weiteren Gänge des Werkzeuges **10/11** sind dann wiederholt entsprechend den Gängen $z_{0,1}$ bis $z_{0,3}$ ausgebildet.

[0049] Die Zähnezah z_2 des Werkstückes **9** ergibt sich somit aus der Beziehung

$$z_2 = n \cdot z_0$$

hierbei bedeutet $n = 1, 2, 3, \dots$

[0050] Im dargestellten Ausführungsbeispiel gilt somit die Beziehung

$$z_2 = 12 = 4 \cdot z_0$$

[0051] Das Werkzeug **10** ist ein Schleifwerkzeug, das schneckenförmig ausgebildet und vorteilhaft abrichtbar ist.

[0052] Das Werkzeug **10** ist bei der Bearbeitung mit dem Werkstück **9** in Eingriff. Das Werkstück **9** in Form eines Stirnrades dreht mit der Drehzahl n_2 um seine Achse **13**, die in üblicher Weise winklig zur Drehachse **12** des Werkstückes **9** liegt.

[0053] Die Drehung von Werkstück **9** und Werkzeug **10** ist in bekannter Weise kinematisch gekoppelt, wobei zusätzlich das Werkzeug **10** unter einem Zustellungsbetrag a_e sowohl axial (Axialvorschub f_a) als auch vorteilhaft tangential bezüglich des Werkstückes **9** in Vorschubrichtung bewegt wird. Mit Hilfe der drei individuell profilierten Gänge $z_{0,1}$ bis $z_{0,3}$ des Werkzeuges **10** werden die entsprechenden Zahnflanken des Werkstückes **9** profiliert. Da das Werkzeug **10** drei unterschiedlich profilierte Gänge aufweist, können an den Zähnen **Z1** bis **Z12** entsprechend unterschiedlich modifizierte Zahnflanken im Wälzschleifverfahren erzeugt werden.

[0054] Wie aus **Fig. 5** hervorgeht, hat beispielhaft der Zahn **Z1** die durch den Gang $z_{0,1}$ des Werkzeuges **10** bestimmte Zahnflankenmodifikation. Die Zähne **Z2** und **Z3** haben die durch die Gänge $z_{0,2}$ und $z_{0,3}$ des Werkzeuges **10** bestimmten Zahnflankenmodifikationen. Anschließend wiederholen sich die Zahnflankenmodifikationen an den Zähnen **Z4** bis **Z6**, **Z7** bis **Z9** und **Z10** bis **Z12**.

[0055] Wird als Werkzeug **11** ein Wälzfräser eingesetzt, der schneckenförmig gestaltet ist, ergeben sich grundsätzlich die gleichen Abläufe wie bei Einsatz des Wälzschleifzylinders **10**. Das Werkstück **9** und das Werkzeug **11** werden um ihre jeweiligen Achsen **12**, **13** mit den Drehzahlen n_2 und n_0 gedreht. Die beiden Drehachsen **12**, **13** liegen in bekannter Weise winklig zueinander. Die Drehung von Werkstück **9** und Werkzeug **11** ist wiederum kinematisch gekoppelt, so dass mit dem Werkzeug **11** das gewünschte Profil am Werkstück **9** erzeugt werden kann.

[0056] Das Werkzeug **11** in Form des Wälzfräasers hat beispielhaft drei individuell profilierte Gänge $z_{0,1}$ bis $z_{0,3}$. Dementsprechend werden bei der Bearbeitung am Werkstück **9** jeweils Zähne erzeugt, die individuell profilierte Zahnflanken aufweisen, wie anhand des Wälzschleifverfahrens erläutert worden ist.

[0057] Die beiden beispielhaft beschriebenen Verfahren mittels schneckenförmigem Werkzeug **10**, **11** ermöglichen bei einem kontinuierlich arbeitenden Verfahren die Herstellung variabler Topographien von Zahn zu Zahn am Werkstück **9**. Abweichend vom Ausführungsbeispiel kann das Werkzeug **10**, **11** auch nur zwei individuell profilierte Gänge, jedoch auch mehr als drei individuell profilierte Gänge aufweisen, so dass am Werkstück **9** eine entsprechende Zahl von Zähnen mit individuell gestalteter Zahnflankenmodifikation erzeugt werden kann.

[0058] **Fig. 6** zeigt zwei Ausführungsbeispiele, bei denen die Zahnflankenmodifikationen am Werkstück **9** mit einem zahnradförmigen Werkzeug **14**, **15** hergestellt werden.

[0059] Die Werkzeuge **14**, **15** haben die Zähnezahzahl z_0 mit einer individuellen Zahngeometrie. Die Zuordnung des jeweiligen Werkzeuges **14**, **15** zum Werkstück **9** erfolgt in gleicher Weise wie bei den Ausführungsbeispielen gemäß **Fig. 5**. Zwischen dem Werkzeug **14**, **15** und dem Werkstück **9** ist eine ganzzahlige Übersetzung gegeben.

[0060] Das Werkzeug **14** ist ein innenverzahnter zylindrischer Honstein. Bei der Werkstückbearbeitung wird das Werkzeug **14** um die Achse **13** und das Werkstück **9** um die Achse **12** mit den Drehzahlen n_0 und n_2 gedreht. Die beiden Drehachsen **12**, **13** liegen unter dem Achskreuzwinkel Σ zueinander. Die Drehzahlen n_0 und n_2 sind in bekannter Weise aufeinander abgestimmt.

[0061] Das Werkstück **9** wird während der Bearbeitung mit einer Oszillationsgeschwindigkeit v_{osc} in Richtung seiner Achse **12** sowie senkrecht entsprechend der Zustellung a_e hierzu in Richtung auf das Werkzeug **14** verschoben. Das Verzahnungshonen ist allgemein bekannt und wird darum auch nicht näher erläutert. Das Vorgehen gilt gleichermaßen auch für innenverzahnte Werkstücke und außenverzahnte Werkzeuge.

[0062] Das Werkstück **9** hat die Zähnezahzahl z_2 , wobei der Zusammenhang mit der Zähnezahzahl z_0 des Werkzeuges **14** gemäß der Beziehung $z_0 = i \cdot z_2$ besteht, wobei $i = 1, 2, 3, \dots$ besteht. Dies gilt für ein außenverzahntes Werkstück, wie im Ausführungsbeispiel dargestellt.

[0063] Weist das Werkstück eine Innenverzahnung auf, dann gilt für den Zusammenhang zwischen der Zähnezahzahl z_2 des Werkstückes **9** und der Zähnezahzahl des Werkzeuges **15** die Beziehung $z_2 = i \cdot z_0$, wobei $i = 1, 2, 3, \dots$ ist.

[0064] Das Werkzeug **14** weist Zähne mit unterschiedlicher Profilierung auf, so dass die Zähne des Werkstückes **9** in der beschriebenen Weise mit unterschiedlichen Zahnflankenmodifikationen versehen werden können, je nach Gestaltung der Zähne z_0 des Werkzeuges **14**.

[0065] **Fig. 6** zeigt als weitere Ausführungsform das Wälzschälen mit Hilfe des Werkzeuges **15**. Das Werkzeug **15** wird um seine Achse **13** und das Werkstück um seine Achse **12** während der Herstellung mit den Drehzahlen n_0 und n_2 gedreht. Die beiden Achsen **12**, **13** liegen unter dem Achskreuzwinkel Σ zueinander. Das Werkzeug **15** wird während der Bearbeitung in Richtung seiner Achse **13** verschoben (Axialvorschub f_a) und gleichzeitig radial in Richtung auf das Werkstück **9** verschoben.

[0066] Die Drehungen von Werkstück **9** und Werkzeug **15** sind in bekannter Weise kinematisch mit-

einander gekoppelt, so dass das Zahnprofil in gewünschtem Maße erzeugt werden kann. Aufgrund der individuellen Zahngeometrie des Werkzeuges **15** können am Werkstück **9** im kontinuierlichen Verfahren Zähne mit individueller Flankenmodifikation hergestellt werden.

[0067] Fig. 7 zeigt weitere Beispiele, wie Werkstücke mit individuell ausgebildeten Zahnflankenmodifikationen in einem kontinuierlichen Verfahren hergestellt werden können.

[0068] Das eingesetzte Werkzeug **16** ist beispielhaft ein schneckenförmiges Schleifwerkzeug, mit dem ein Diagonal-Wälzschleifen durchgeführt wird. Bei dieser Verfahrensweise erfolgt gleichzeitig mit der Drehung des Werkzeuges **16** um seine Achse **13** ein Axial- und Tangentialvorschub.

[0069] Das Werkzeug **16** hat beispielhaft die Gangzahl $z_0 = 1$. Dieser Gang ist über seine Länge mit unterschiedlich profilierten Gangbereichen versehen, wie beispielhaft dargestellt ist. Der Gangbereich $z_{0,1,Ref}$ bildet einen Referenzbereich, mit dem am Zahn des Werkstückes eine Referenzzahnflankenmodifikation erzeugt wird.

[0070] Der Gangbereich $z_{0,1,fH\alpha,1}$ ist so gestaltet, dass mit ihm in der beschriebenen Weise eine Profilwinkelmodifikation $f_{H\alpha}$ an der Zahnflanke des Werkstückzahns erzeugt werden kann.

[0071] Der Gangbereich $z_{0,1,fH\alpha,2}$ ist so gestaltet, dass mit ihm eine weitere andere Profilwinkelmodifikation an der Zahnflanke **3** des Werkstückzahnes erzeugt werden kann.

[0072] Der Gangbereich $z_{0,1,C\alpha}$ ist derart geformt, dass mit ihm an der Zahnflanke **13** des Werkstückes **9** die Profilballigkeit c_α erzeugt werden kann.

[0073] Die Gangbereiche liegen in einem solchen Abstand hintereinander, dass jeder Gangbereich die Zahnflanken unterschiedlicher Zähne des Werkstückes bearbeitet.

[0074] In Fig. 7 ist in Bezug auf die die Profilwinkelmodifikation erzeugenden Gangbereiche durch die Pfeile kenntlich gemacht, wie an den Zähnen des Werkstückes **9** der Werkstückabtrag an den Zahnflanken des Werkstückes erfolgt.

[0075] Beim Diagonal-Wälzschleifen werden das Werkstück **9** und das Werkzeug **16** um ihre jeweiligen Achsen **12**, **13** mit den Drehzahlen n_0 , n_2 aufeinander abgestimmt gedreht, wobei die beiden Drehachsen **12**, **13** in bekannter Weise unter einem Schwenkwinkel angeordnet sind.

[0076] Wie Fig. 7 weiter zu entnehmen ist, kann die Werkstückbearbeitung auch durch eine gezielte Schwenkwinkelvariation oder eine gezielte Wälzkopplung gezielt variiert werden. So kann der Schwenkwinkel φ des Werkzeuges **16** relativ zum Werkstück **9** geändert werden.

[0077] Für die Wälzkopplungslösung kann vorgesehen sein, dass das Verhältnis der Drehzahl n_0 des Werkzeuges **16** zur Drehzahl n_2 des Werkstückes **9** nicht konstant ist.

[0078] Die Schwenkwinkelvariation und die Wälzkopplungsvariation sind nur weitere Beispiele dafür, wie gezielt Werkstückzahnflankenmodifikationen in einem kontinuierlich abwälzenden Fertigungsverfahren vorteilhaft durch Beeinflussung der Verfahrenskinetik hergestellt werden können.

[0079] Bei der Ausführungsform gemäß Fig. 7 kann die Übersetzung zwischen dem schneckenförmigen Werkzeug **16** und dem Werkstück **9** ganzzahlig oder unganzzahlig sein.

[0080] Wie die anhand der Fig. 5 bis Fig. 7 erläuterten Beispiele zeigen, können mit einem kontinuierlich abwälzenden Fertigungsverfahren unterschiedliche Flankenmodifikationen an Verzahnungen vorgesehen sein. Werden schneckenförmige Werkzeuge eingesetzt (Fig. 5 und Fig. 7), dann können abrichtbare Werkzeuge eingesetzt werden, wobei einzelne Gänge des schneckenförmigen Werkzeuges **10**, **11**, **16** zur Erzeugung variabler Werkzeuggeometrien in den einzelnen Gängen individuell abgerichtet werden können. Beim Ausführungsbeispiel nach Fig. 5 sind drei Gänge am schneckenförmigen Werkzeug **10**, **11** vorgesehen, die jeweils individuell profiliert sind (Standardkinematik).

[0081] Fig. 7 zeigt beispielhaft, dass entlang eines Ganges des schneckenförmigen Werkzeuges **16** variable Werkzeuggeometrien entlang dieses Ganges abgerichtet werden können (Diagonalkinetik).

[0082] Werden für die schneckenförmigen Werkzeuge **10**, **11**, **16** nicht abrichtbare Werkzeuge verwendet, dann werden die variablen Werkzeuggeometrien entlang eines Ganges in unterschiedlichen Gangbereichen geschliffen, wie beispielhaft anhand von Fig. 7 erläutert worden ist.

[0083] Bei der Realisierung ganzzahliger Teiler zwischen der Zähnezahl z_2 des Werkstückes und der Zähnezahl z_0 des Werkzeuges kommen immer dieselben Zähne des Werkstückes **9** mit demselben Gang des Werkzeuges **10**, **11** in Kontakt.

[0084] Das Ergebnis ist, dass sich unterschiedliche Ganggeometrien auf die Verzahnung des Werkstückes **9** als variable Geometrien aufprägen.

[0085] Der Einsatz des schneckenförmigen Werkzeuges ist insbesondere beim Fertigwälzfräsen, beim Wälzschleifen oder beim Schälwälzfräsen vorgesehen.

[0086] Werden als Werkzeuge zahnradförmige Werkzeuge eingesetzt (**Fig. 6**), dann werden die variablen Flankenmodifikationen an den Verzahnungen ebenfalls mit kontinuierlich abwälzenden Fertigungsverfahren erzeugt. Hierbei können abrichtbare Werkzeuge **14**, **15** eingesetzt werden. Für diesen Abrichtvorgang kann ein Abrichtgrad mit variablen Modifikationen eingesetzt werden. Auch bei diesem Verfahren wird ein ganzzahliger Teiler zwischen der Zähnezahzahl z_2 des Werkstückes **9** und der Zähnezahzahl z_0 des Werkzeuges realisiert. Dadurch wird erreicht, dass immer dieselben Zähne des Werkstückes **9** mit denselben Zähnen des Werkzeuges **14** in Kontakt kommen.

[0087] Dadurch werden die unterschiedlichen Abrichterzahngeometrien über das Werkzeug **14**, **15** auf die Verzahnung als variable Geometrien aufgeprägt. Beispielhaft ist hierfür das Verzahnungshonen erläutert worden.

[0088] Anhand von **Fig. 6** ist auch das Wälzschälen erläutert worden. Ist das Werkzeug **15** nicht abrichtbar, dann werden die einzelnen Zähne des Werkzeuges **15** individuell mit der gewünschten Korrektur geschliffen.

[0089] Auch hierbei wird ein ganzzahliger Teiler zwischen der Zähnezahzahl z_2 des Werkstückes **9** und der Zähnezahzahl z_0 des Werkzeuges **15** realisiert, so dass immer dieselben Zähne des Werkstückes **9** mit denselben Zähnen des Werkzeuges **15** in Kontakt kommen.

[0090] Außer dem Schälen kommen hierfür auch Schaben oder beispielhaft Stoßen in Betracht.

[0091] Aufgrund der beschriebenen Teilergleichheit von Werkstückzähnezahlen und Gangzahl bzw. Zähnezahzahl des Werkzeuges bilden sich in der beschriebenen Weise individuelle Werkzeugprofilgeometrien von Gang zu Gang bzw. von Zahn zu Zahn auf dem Werkstück periodisch ab.

[0092] Wird bei der Bearbeitung noch eine gezielte Werkzeugbewegung während des Bearbeitungsprozesses durchgeführt, wie beispielhaft anhand der **Fig. 5** bis **Fig. 7** erläutert worden ist, können individuelle Geometrien von Zahn zu Zahn am Werkstück **9** verstärkt werden.

[0093] Zusätzlich oder anstelle der gezielten ergänzenden Werkzeugbewegung kann auch eine veränderliche Geometrie längs eines Ganges oder periodisch eintretender Werkzeugzähne herangezogen

werden sowie die Fertigungskinetik wie beschrieben erweitert werden, um eine individuelle Geometrie von Zahn zu Zahn am Werkstück zu verstärken. Damit ist eine Aufhebung der Teilergleichheit von Werkzeugzähne- bzw. -gangzahl und Werkstückzähnezahzahl möglich.

[0094] Mit den beschriebenen Verfahren können Bearbeitungs- und Abrichtverfahren durchgeführt werden. Hierfür werden die beschriebenen Bearbeitungswerkzeuge **10**, **11**, **14** bis **16** sowie entsprechende Abrichtwerkzeuge eingesetzt.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung von Zahnflankenmodifikationen an Verzahnungen von Werkstücken, bei dem das Werkstück und ein Werkzeug relativ zueinander bewegt und hierbei Material von der Zahnflanke des Werkstückes abgetragen wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass unterschiedliche Zahnflankenmodifikationen an Zähnen des Werkstückes (**9**) mittels eines kontinuierlich abwälzenden Fertigungsverfahrens erzeugt werden, indem das Werkzeug (**10**, **11**, **14** bis **16**) individuell unterschiedliche Werkzeugprofilgeometrien aufweist, die an den Zähnen des Werkstückes (**9**) die unterschiedlichen Zahnflankenmodifikationen erzeugen.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass zwischen der Werkstückzähnezahl (z_2) und der Werkzeugzähne- bzw. -gangzahl (z_0) ein ganzzahliger Teiler realisiert wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass als Werkzeuge (**10**, **11**, **16**) schneckenförmig ausgebildete Werkzeuge eingesetzt werden.

4. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass das schneckenförmige Werkzeug (**10**, **11**) wenigstens zwei Gänge ($z_{0,1}$, $z_{0,2}, \dots$) aufweist, die unterschiedlich profiliert sind.

5. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass das schneckenförmige Werkzeug (**16**) einen Gang ($z_{0,1}$) aufweist, der über seine Länge unterschiedlich profilierte Gangbereiche aufweist.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Werkzeug ein Abrichtwerkzeug zur Bearbeitung von Werkzeugen ist.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass als Werkzeuge (**14**, **15**) zahnradförmige Werkzeuge eingesetzt werden, deren Zähne unterschiedliche Zahngeometrien aufweisen.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass als Werkzeug ein abrichtbares Werkzeug eingesetzt wird, an dem die unterschiedlichen Werkzeugprofilgeometrien mittels eines Abrichtwerkzeuges hergestellt werden.

9. Werkzeug, insbesondere zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Werkzeug (10, 11, 14 bis 16) individuelle Werkzeugprofilgeometrien aufweist.

10. Werkzeug nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Werkzeug (10, 11) ein schneckenförmiges Werkzeug ist, das wenigstens zwei Gänge ($z_{0,1}$, $z_{0,2}, \dots$) aufweist, die unterschiedlich profiliert sind.

11. Werkzeug nach Anspruch 9 oder 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Werkzeug (16) ein schneckenförmiges Werkzeug ist, das einen Gang ($z_{0,1}$) aufweist, der über seine Länge unterschiedlich profilierte Gangbereiche aufweist.

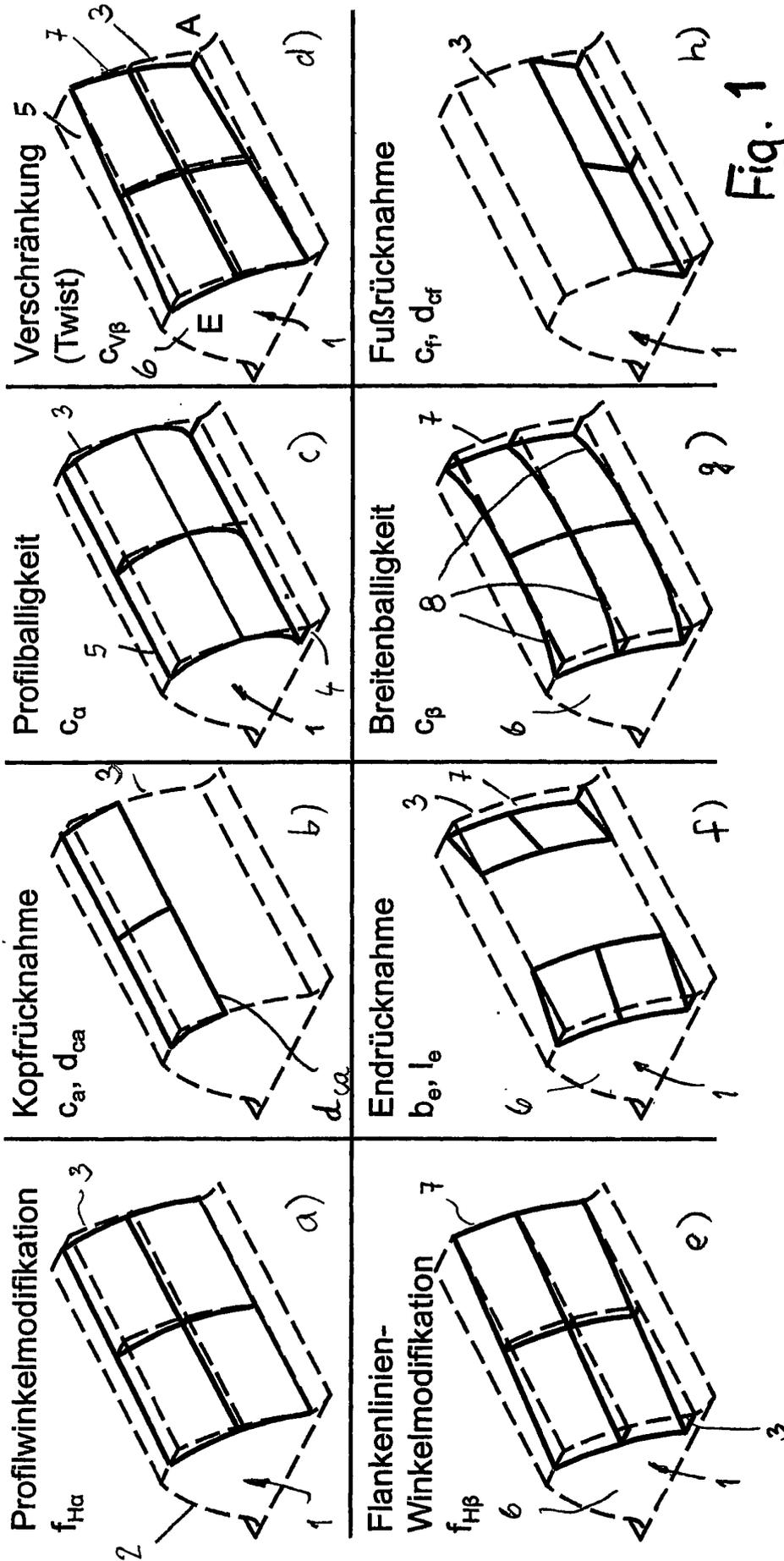
12. Werkzeug nach einem der Ansprüche 9 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Werkzeug (14, 15) zahnradförmig ausgebildet ist, und dass die Zähne mit einer individuellen Zahngeometrie versehen sind.

13. Werkzeug nach einem der Ansprüche 9 bis 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass das zahnradförmige Werkzeug (14, 15) eine Außen- oder eine Innenverzahnung aufweist.

14. Werkzeug nach einem der Ansprüche 9 bis 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Werkzeug ein Abrichtwerkzeug für abrichtbare Werkzeuge ist.

Es folgen 6 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen



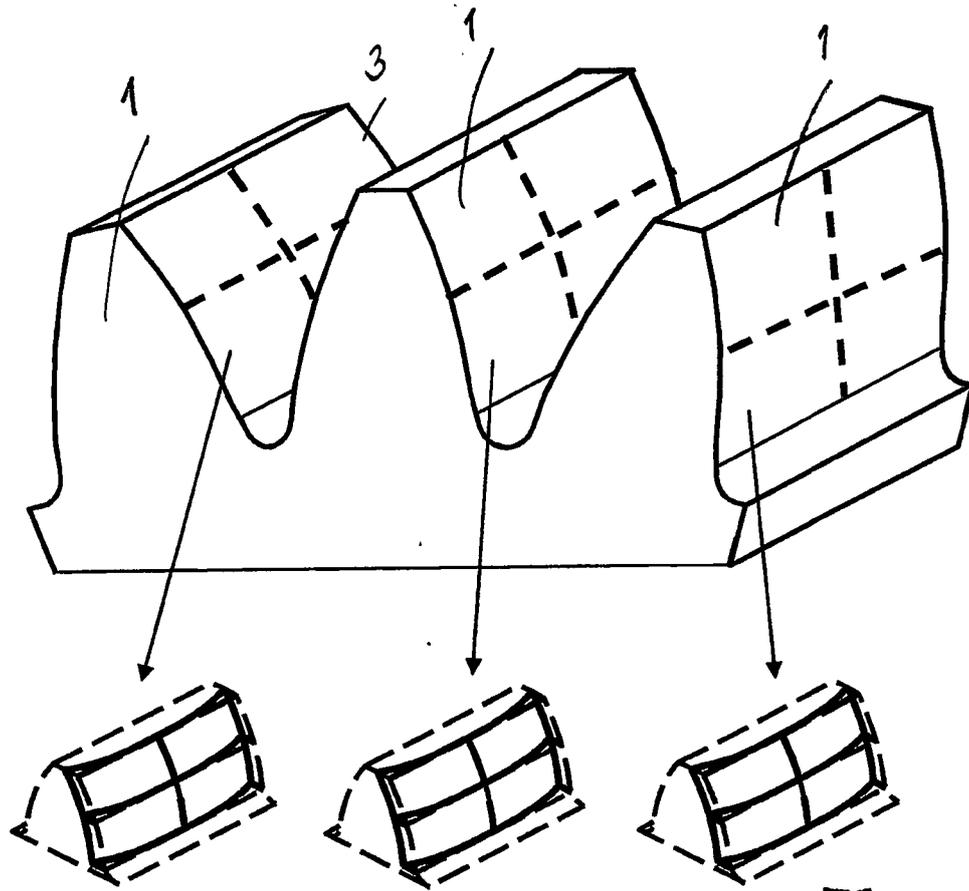


Fig. 2

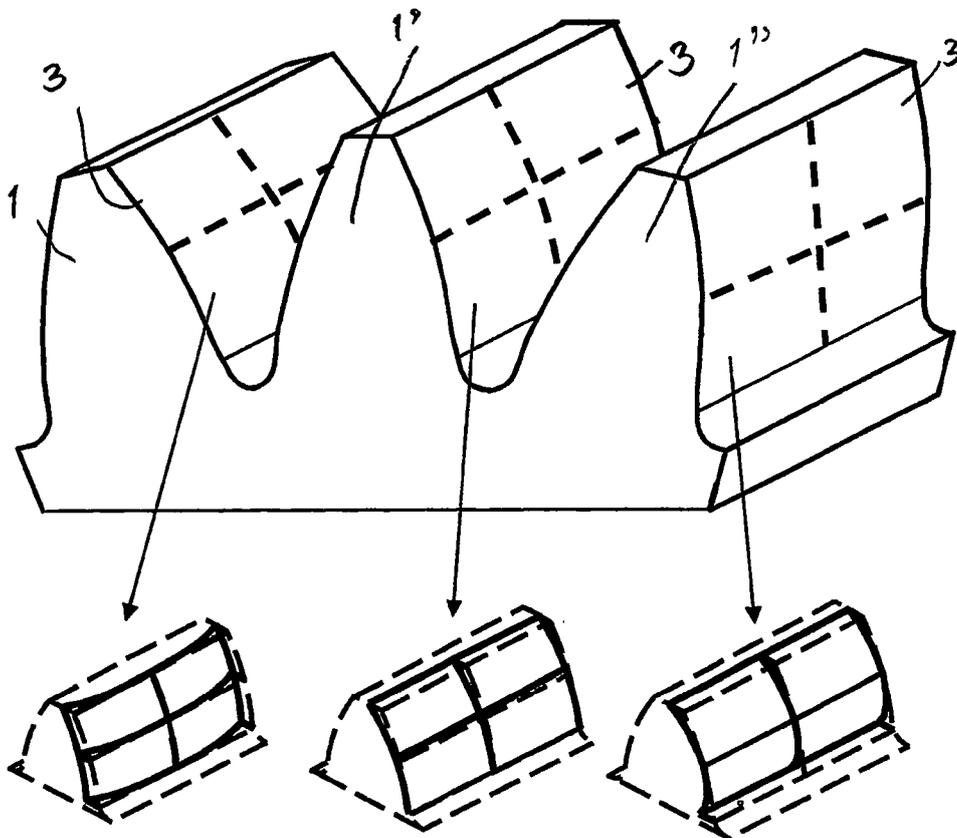
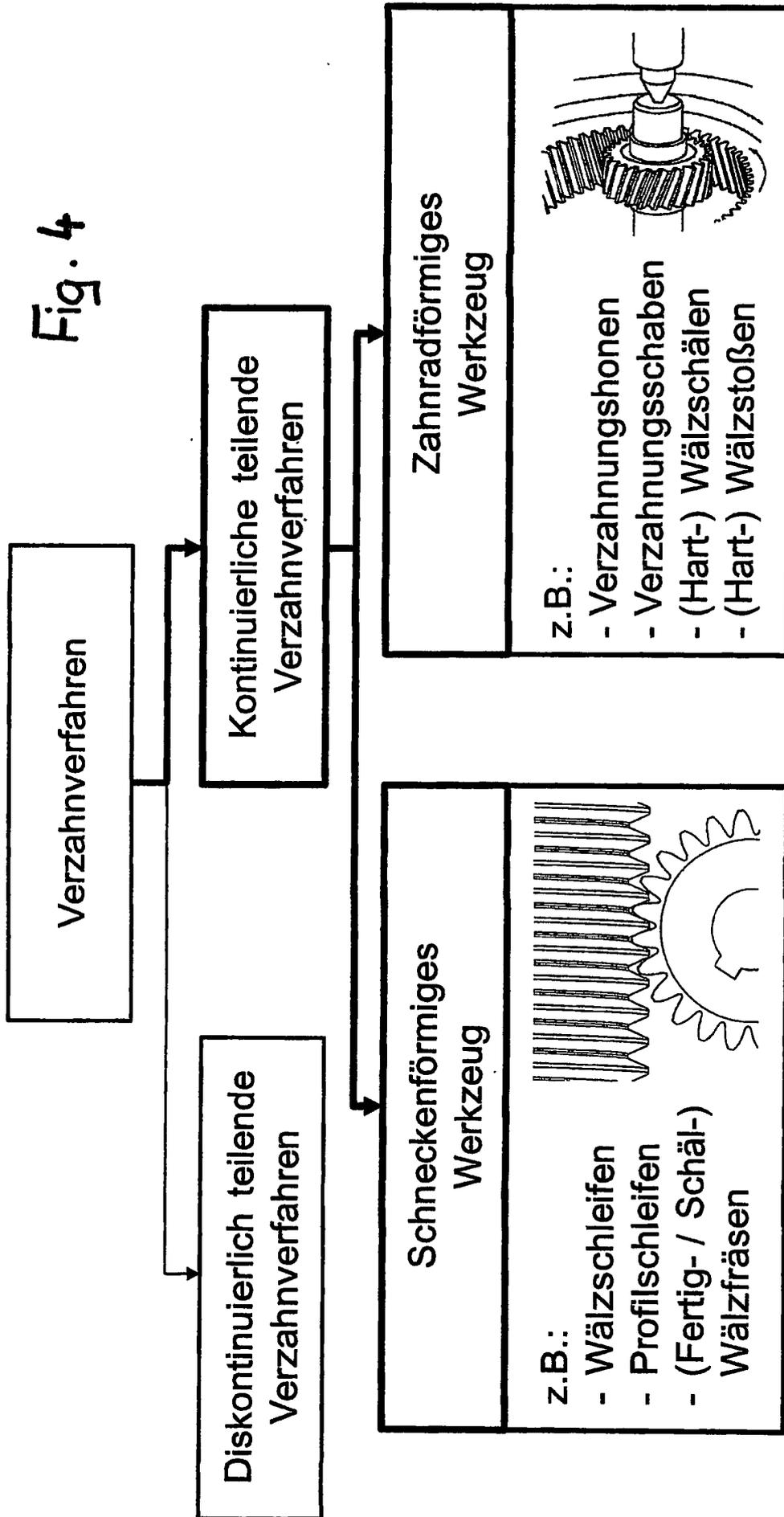


Fig. 3

Fig. 4



Werkzeug mit Gangzahl z_0 , jeder Gang individuell profiliert
 Hier: $z_0 = 3$

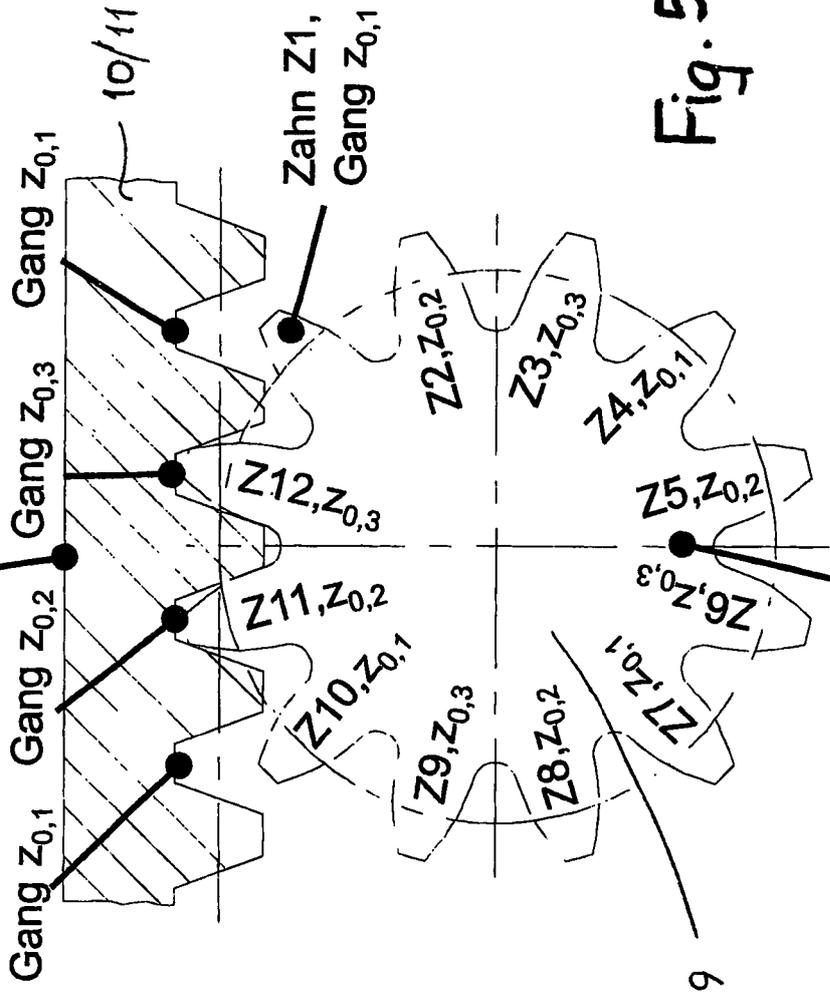
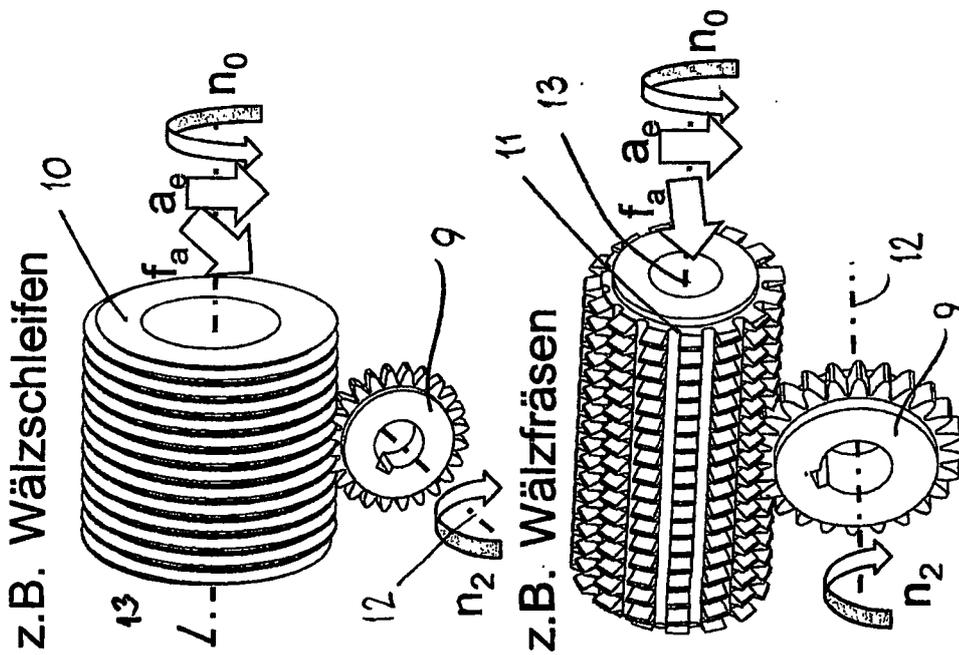


Fig. 5

Werkstück mit Zähnezahl $z_2 = n \cdot z_0$, $n = 1, 2, 3, \dots$
 Hier: $z_2 = 12 = 4 \cdot z_0$



Werkzeug mit Zähnezahl z_0 mit individueller Zahngeometrie, Zuordnung zu WST wie in Abb. 5

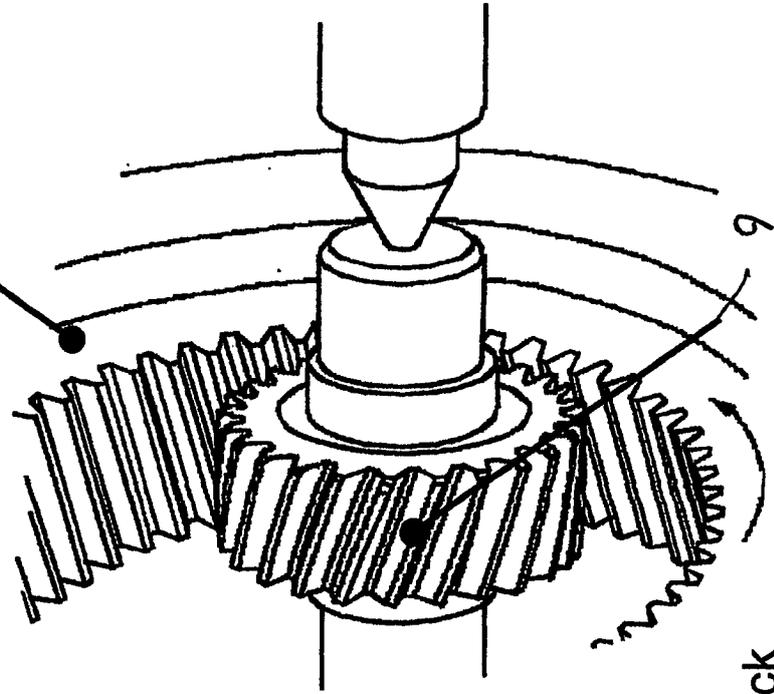
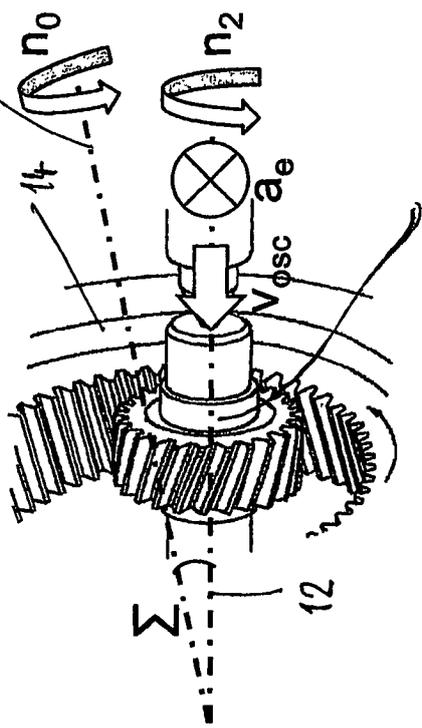


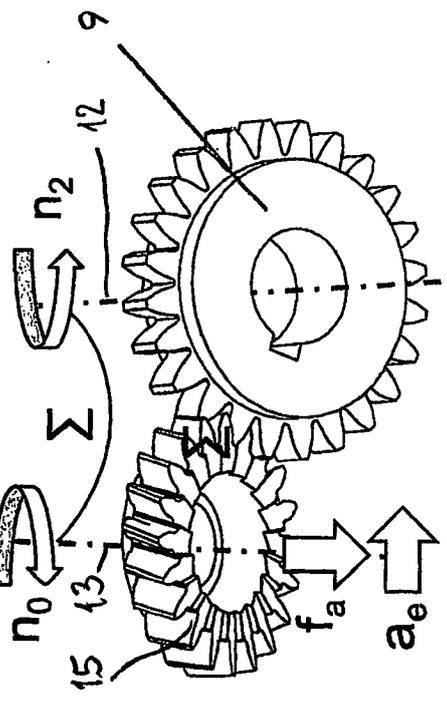
Fig. 6

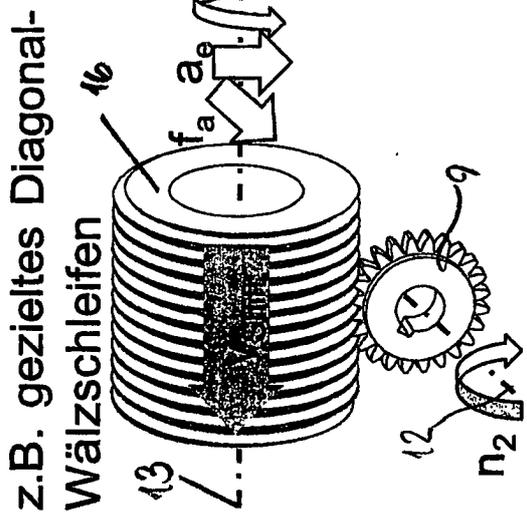
Werkstück mit Zähnezahl z_2 mit $z_0 = i \cdot z_2$ (Außenverzahnung) oder $z_2 = i \cdot z_0$ (Innenverzahnung), $i = 1, 2, 3, \dots$

z.B. Verzahnungshonen (Innen- und Außenverz.)

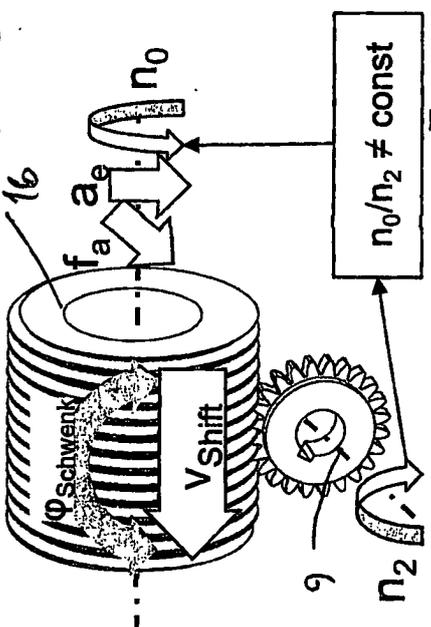


z.B. Wälzschälen





z.B. gezielte Schwenkwinkel-
variation oder Wälzkopplungslösung



Werkzeug mit Gangzahl z_0 , jeder Gang individuell entlang des
Gangs profiliert, Hier: $z_0 = 1$

Gangbereich Gangbereich Gangbereich Gangbereich

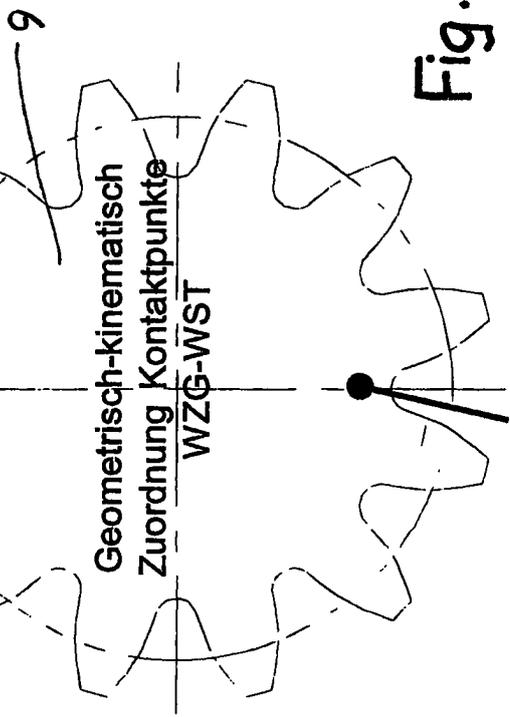
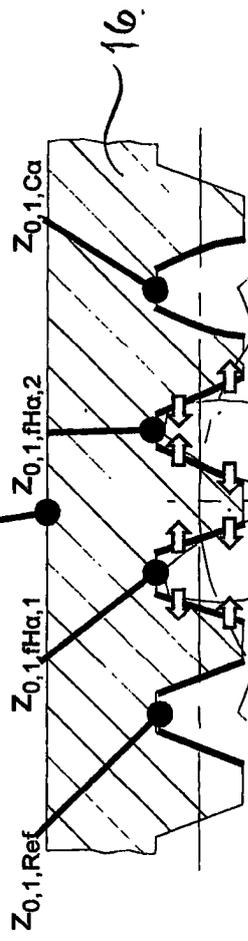


Fig. 7

Werkstück mit Zähnezahl z_2