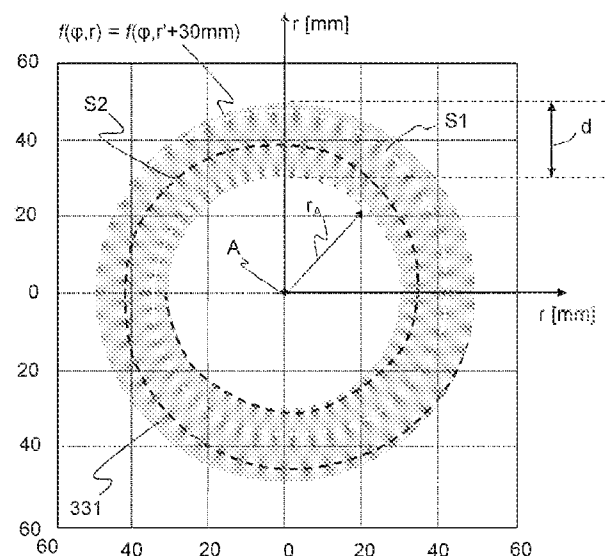


(11) **CH**

(51) Int. Cl.: **B23F** 3/00 (2006.01)
B23F 21/02 (2006.01)
B24B 53/08 (2006.01)

(12) **PATENT**SCHRIFT



Beschreibung**TECHNISCHES GEBIET**

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Abrichtwerkzeug zum Abrichten einer Schleifschnecke für die Wälzbearbeitung vorverzahnter Werkstücke, ein Verfahren zur Herstellung eines solchen Abrichtwerkzeugs, sowie eine Konditionierungsvorrichtung, die dazu ausgebildet ist, ein derartiges Verfahren zur Herstellung auszuführen. Die Erfindung betrifft des Weiteren ein Verfahren zum Abrichten einer Schleifschnecke für die Wälzbearbeitung vorverzahnter Werkstücke mit einem solchen Abrichtwerkzeug, sowie ein Verfahren zur Erzeugung einer modifizierten Oberflächenstruktur auf einer Zahnflanke eines vorverzahnten Werkstücks mittels einer anhand eines solchen Abrichtwerkzeugs abgerichteten Schleifschnecke.

STAND DER TECHNIK

[0002] Insbesondere im Kontext der Elektromobilität gewinnt das Thema NVH (Noise-Vibration-Harshness) speziell im Bereich des Getriebes eines Fahrzeugs aufgrund der fehlenden dominanten Geräuschkulisse des Verbrennungsmotors an Bedeutung. Die Anforderungen an das Geräuschanregungsverhalten werden häufig in Form von vordefinierten Grenzwerten in einem Geräuschfrequenzspektrum vorgegeben. Ob ein Werkstück diesen Anforderungen genügt, wird in der Regel stichprobenartig auf einem End-of-Line-Prüfstand (EOL) überprüft. Liegen die gemessenen Amplituden vereinzelter Geräuschfrequenzen über dem vordefinierten Grenzwert, wird das entsprechende Werkstück beanstandet.

[0003] Ein typisches Geräuschfrequenzspektrum eines rotierenden Zahnrades weist dominante Amplituden bei Geräuschfrequenzen auf, welche der Zahneingriffsfrequenz ($f_{ZE} = \text{Zahnradrehfrequenz} \times \text{Zähnezahl}$) und den dazugehörigen höheren Harmonischen bei den entsprechenden Zahneingriffsordnungen (ZEO) entsprechen. Diese dominanten Geräuschfrequenzen resultieren in der Regel aus Drehwegabweichungen, welche infolge einer über die Eingriffsstrecke variierende Eingriffssteifigkeit entstehen. Der Verlauf der Eingriffssteifigkeit als Funktion der Position entlang der Eingriffsstrecke wiederholt sich periodisch mit der Eingriffsteilung und führt zu den oben genannten dominanten Geräuschfrequenzen. Eine andere Ursache kann ein während der Fertigung entstandenes „Wälzloch“, d.h. bezüglich der gewünschten Profillinie zurückstehendes Material, sein.

[0004] Insgesamt können alle Drehwegabweichungen einer Verzahnung unter Last zu einer Geräuschanregung führen, die als störendes Geräusch wahrnehmbar ist. Weist beispielsweise ein Abrichtwerkzeug über die Profilhöhe eine gewisse Welligkeit auf, überträgt sich diese auf die Schneckenflanke und führt anschliessend zu einer Profilformabweichung am Werkstück.

[0005] Konstante Schwingungen in der Peripherie der zur Bearbeitung des vorverzahnten Werkstücks verwendeten Werkzeugmaschine können ebenfalls zu Zahnflankenwelligkeiten auf der Zahnflanke führen, die messtechnisch erfassbar sind, und störende Geräuscheigenschaften der Verzahnung zur Folge haben.

[0006] Auch über die Breite der Verzahnung verlaufende Riefen können zu einer Geräuschanregung führen. Insgesamt kann jede periodische Oberflächenstruktur, insbesondere in einer Richtung senkrecht zur Eingriffslinie gepaarter Stirnräder, zu einer Anregung einer Geräuschfrequenz führen, welche im Geräuschfrequenzspektrum der Verzahnung dominant auftritt.

[0007] Es existieren mehrere Ansätze, um das Geräuschanregungsverhalten einer Verzahnung zu verbessern. Drehwegabweichungen, die aus einer Verformung der Verzahnung unter Last resultieren, können effektiv durch eine gezielte Modifikation der Zahnflanke reduziert werden. Ein Wälzloch kann durch eine optimierte Prozessführung nahezu vollständig beseitigt werden.

[0008] DE 10 2012 015 846 A1 offenbart ein Wälzschleifverfahren, bei dem ein Werkstück mit einer Schleifschnecke bearbeitet wird, wobei mittels gezielter Erzeugung einer unwuchtbedingten Taumelbewegung der Schleifschnecke und/oder einer Exzentrizität der Schleifschnecke erreicht wird, dass eine Modifikation, insbesondere eine Profilmodifikation oder Profilwelligkeit und/oder eine definierte periodische Flankenwelligkeit, auf der aktiven Oberfläche des damit bearbeiteten Werkstückes erzeugt wird, um eine ungewollte Flankenwelligkeit zu modifizieren oder zu verhindern.

[0009] Eine aus Unwucht oder Exzentrizität einer Schleifschnecke resultierende Flankenwelligkeit auf dem Werkstück hat stets bezüglich der Schneckendrehfrequenz die Ordnung eins, d.h. es ist nicht möglich, auf diese Weise eine Flankenwelligkeit zu erzeugen, welche bezüglich der Schneckendrehfrequenz eine höhere Ordnung aufweist.

[0010] DE 10 2013 003 795 A1 offenbart ein Verfahren zum Hartfeinbearbeiten von Zahnflanken mit Korrekturen und/oder Modifikationen auf einer Verzahnmaschine, wobei jeweils Zahnradpaarungen, die miteinander innerhalb eines Getriebes oder einer Prüfeinrichtung im Eingriff sind, unter Berücksichtigung der jeweiligen Gegenflanken bearbeitet werden und wobei die Zahnflanken der betroffenen Werkstücke mit periodischen Welligkeitskorrekturen oder -modifikationen versehen werden. Erfindungsgemäss wird mittels Drehwegfehlermessung der Zahnradpaarungen in einer Verzahnungsmesseinrichtung und/oder Getriebe der Drehfehlerverlauf bestimmt. Dieses Messergebnis dient als Eingangsgrösse zur Definition der Amplitude, Frequenz und Phasenlage für die periodischen Flankenwelligkeitskorrekturen auf den Zahnflanken der Zahnradpaarungen für die Fertigung in der Verzahnungsmaschine.

[0011] Eine sich periodisch wiederholende Oberflächenstruktur führt tendenziell zu einer Anregung in einem relativ engen Geräuschfrequenzband. Eine möglichst unregelmässige Oberflächenstruktur führt wiederum zu einem sehr breiten Ge-

räuschfrequenzspektrum, das sich „weissem“ Rauschen, d.h. einem Geräuschfrequenzspektrum mit gleicher Amplitude aller Geräuschfrequenzen, annähert. Ein derartiges Geräuschfrequenzspektrum, bei welchem tendenziell die Dominanz einzelner Geräuschfrequenzen reduziert ist, wird psychoakustisch als weniger störend wahrgenommen und ist somit vorteilhaft. Zudem verteilt sich bei Anregungen mit einem breiten Geräuschfrequenzspektrum die gesamte Anregungsenergie über einen grossen Frequenzbereich, so dass die Geräuschamplitude jeder einzelnen Frequenzkomponente tendenziell niedriger ist als bei Anregungen in einem engen Frequenzband.

[0012] Wenn das Werkstück durch ein Wälzschleifverfahren mit einer Schleifschnecke bearbeitet wird, können sich periodisch wiederholende Oberflächenstrukturen auf einer Zahnflanke auftreten, die beispielsweise vom Abrichten der Schleifschnecke stammen, mit welcher die Zahnflanke bearbeitet wird: Die beim Abrichten verwendete Abrichtscheibe kann über den Umfang technologiebedingt Korngrößen- und Formunterschiede, sowie eine unterschiedliche Kornverteilung aufweisen, was zu einem Abrichtmuster auf der Oberfläche der Abrichtscheibe führt. Da die Abrichtscheibe in der Regel während einer Umdrehung der Schleifschnecke eine Vielzahl von Umdrehungen ausführt, wird dieses Abrichtmuster beim Abrichten in Schneckengangrichtung periodisch auf die Schleifschnecke abgebildet. Beim anschliessenden Schleifen des Werkstücks können dann wiederum auf den Zahnflanken des Werkstücks periodische Schwankungen in der Zahnflankenoberfläche in Form von Riefen entstehen, welche sich über die Zahnbreite erstrecken.

[0013] DE 199 05 136 A1 offenbart ein Verfahren, bei welchem der Drehwinkel der Abrichtscheibe mit dem Drehwinkel der Schleifschnecke mit einem einstellbaren festen oder programmierbar variablen oder einem gespeicherten stochastisch ändernden Verhältnis gekoppelt wird, wobei die Schleifschnecke während des Schleifens längs ihrer Achse relativ zum Werkstück bewegt wird (Shift-Vorschub), so dass jedem Punkt der Zahnflanken der Verzahnung des Werkstücks genau ein Punkt der Flanken des Schleifschneckenganges entspricht.

[0014] Durch gezielte Wahl des Shift-Vorschubs können die oben genannten Riefen gebrochen werden. Somit wird zwar die Periodizität der Zahnflankenoberflächenstruktur gebrochen und dadurch prinzipiell ein angenehmeres Geräuschverhalten erzielt, allerdings ist die auf die Zahnflanke übertragene Struktur stark vom herstellungsbedingten stochastischen Abrichtmuster auf der Oberfläche der Abrichtscheibe abhängig und kann daher nur über den Shift-Vorschub während des Schleifens des Werkstücks beeinflusst werden.

DARSTELLUNG DER ERFINDUNG

[0015] In einem ersten Aspekt ist es eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Abrichtwerkzeug anzugeben, mit dem eine Schleifscheibe für die Wälzbearbeitung vorverzahnter Werkstücke so abgerichtet werden kann, dass die Schleifschnecke gezielt eine modifizierte Oberflächenstruktur auf einer Zahnflanke eines vorverzahnten Werkstücks erzeugt, wobei diese modifizierte Oberflächenstruktur geeignet ist, das Geräuschverhalten des Werkstücks zu beeinflussen.

[0016] Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren nach Anspruch 1 gelöst. Weitere Ausführungsformen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

[0017] Es wird also ein Abrichtwerkzeug zum Abrichten einer Schleifschnecke für die Wälzbearbeitung vorverzahnter Werkstücke vorgeschlagen, wobei das Abrichtwerkzeug zur Rotation um eine Abrichtdrehachse ausgebildet ist und eine Abrichtflankenoberfläche aufweist, welche in einer senkrecht zur Abrichtdrehachse stehenden Projektionsebene einen Kreisring bildet, wobei der Kreisring eine Radialrichtung mit einer Radialkoordinate und eine Umfangrichtung mit einer Winkelkoordinate definiert, wobei die Abrichtflankenoberfläche mit einer gezielt erzeugten Abrichtflankenmodifikation versehen ist, wobei sich die Abrichtflankenmodifikation auf den Kreisring projiziert als zwei-dimensionale Fourier-Reihe in Abhängigkeit der Radialkoordinate und der Winkelkoordinate beschreiben lässt.

[0018] Die Fourier-Reihe weist mindestens einen Fourier-Koeffizienten ungleich Null für eine Umfangfrequenzkomponente ungleich Null bezüglich der Winkelkoordinate auf. Bildlich gesprochen bedeutet dies, dass die Abrichtflankenmodifikation eine Welligkeit in Umfangrichtung aufweist.

[0019] Die Welligkeit des Abrichtwerkzeugs in Umfangrichtung kann beim Abrichten durch geeignete Vorgabe des Drehzahlverhältnisses bzw. der Drehwinkelkopplung zwischen dem Abrichtwerkzeug und der abzurichtenden Schleifschnecke auf eine Schleifschneckenflanke eines Schneckengangs übertragen werden, so dass sich auf dieser Schleifschneckenflanke eine Schneckenmodifikation mit einer Gangwelligkeit ausbildet. Diese Gangwelligkeit kann wiederum genutzt werden, gezielte Zahnflankenwelligkeiten auf den Zahnflanken eines vorverzahnten Werkstücks zu erzeugen, das mit der Schleifschnecke bearbeitet wird. Das hier vorgeschlagene Abrichtwerkzeug stellt somit eine besonders einfache und elegante Möglichkeit dar, eine Schleifschnecke so abzurichten, dass mit dieser Schleifschnecke gezielte Zahnflankenwelligkeiten auf einem Werkstück erzeugt werden können, bei grosser Flexibilität hinsichtlich Wellenlänge und Phasenlage der Zahnflankenwelligkeiten.

[0020] Im Gegensatz zu einer rein radial auftretenden Welligkeit des Abrichtwerkzeugs, welche unabhängig von einem Drehzahlverhältnis zwischen dem Abrichtwerkzeug und der abzurichtenden Schleifschnecke übertragen wird, kann eine Welligkeit in Umfangrichtung auf eine gewünschte Weise auf eine abzurichtende Schleifschnecke übertragen werden, indem ein Drehzahlverhältnis bzw. eine Drehwinkelkopplung zwischen dem Abrichtwerkzeug und der abzurichtenden Schleifschnecke entsprechend gezielt vorgegeben wird. Eine Welligkeit in Umfangrichtung auf der Abrichtwerkzeugober-

fläche bietet somit einen zusätzlichen Freiheitsgrad im Hinblick auf eine gezielte Übertragung der Abrichtflankenmodifikationen.

[0021] Um insbesondere beim Abrichten der Schleifschnecke einen stetigen Übergang nach einer Umdrehung des Abrichtwerkzeugs zu erhalten, weist die Abrichtflankenmodifikation bevorzugt bezüglich der Winkelkoordinate eine 2π -Periodizität auf, d.h. die Abrichtflankenmodifikation weist bezüglich der Winkelkoordinate eine ganzzahlige Anzahl Wellenperioden auf.

[0022] Unter dem Begriff „Wellenfronten“ werden im Folgenden Linien konstanter Phasenlage verstanden oder, anders ausgedrückt, Linien entlang welchen keine Amplitudenmodulationen auftreten.

[0023] In einer Ausführungsform weist die Fourier-Reihe keinen Fourier-Koeffizienten ungleich Null für eine Radialfrequenzkomponente ungleich Null in der Radialrichtung auf, derart, dass die gezielt erzeugte Abrichtflankenmodifikation bezüglich der Umfangrichtung wellenförmig ist, und Wellenfronten in Form von Linien konstanter Phasenlage aufweist, welche auf den Kreisring projiziert radial ausgerichtet sind. Anders ausgedrückt, weist in dieser Ausführungsform die Abrichtflankenmodifikation eine ausschliesslich in Umfangrichtung auftretende Welligkeit auf.

[0024] In einer anderen Ausführungsform weist die zwei-dimensionale Fourier-Reihe mindestens einen Fourier-Koeffizienten ungleich Null für eine Radialfrequenzkomponente und für eine Umfangfrequenzkomponente ungleich Null auf, derart, dass die Abrichtflankenmodifikation auf den Kreisring projiziert eine schachbrettartige Struktur mit schachbrettartig zueinander versetzt angeordneten Wellenbergen und Wellentälern bildet. Dabei können jeweils benachbarte Wellentäler und Wellenberge derart versetzt sein, dass sie jeweils eine Radialwelligkeit entlang parallel zur Radialrichtung verlaufende Radialpfaden bilden. Sind die Radialwelligkeiten benachbarter Radialpfade genau um 180° versetzt, entsteht eine Umfangwelligkeit entlang parallel zur Umfangrichtung verlaufender Umfangpfade, wobei die Umfangpfade um eine halbe Radialwellenlänge der Radialwelligkeit in Radialrichtung voneinander beabstandet sind. Eine derartige schachbrettartige Struktur kann sich mathematisch als additive Überlagerung von zwei Teilwellen beschreiben lassen, wobei die Teilwellen auf den abgewickelten Kreisring projiziert schräg verlaufende Wellenfronten aufweisen, d.h. Wellenfronten, die gegenüber der abgewickelten Umfangrichtung um einen Neigungswinkel α ungleich 0° , $\pm 90^\circ$ oder $\pm 180^\circ$ geneigt sind, wobei die schräg verlaufenden Wellenfronten der ersten Teilwelle eine positive Steigung aufweisen ($\alpha > 0^\circ$) und die schräg verlaufenden Wellenfronten der zweiten Teilwelle eine negative Steigung ($\alpha < 0^\circ$) aufweisen, und wobei die erste Teilwelle jeweils dieselbe Ordnung (d.h. dieselbe Anzahl Wellenperioden) in Umfangrichtung und dieselbe Ordnung in Radialrichtung wie die zweite Teilwelle aufweist.

[0025] In einer bevorzugten Ausführungsform ist die schachbrettartige Struktur auf dem Kreisring derart ausgerichtet, dass in Umfangrichtung jeweils benachbarte Wellentäler und Wellenberge entlang eines auf dem Kreisring spiralförmig verlaufenden Spiralasts angeordnet sind, wobei die Anzahl Wellenperioden entlang des Spiralasts in einem Winkelkoordinatenbereich von 2π (d.h. über eine Umdrehung des Abrichtwerkzeugs gezählt) im vorliegenden Kontext als Ordnung in Spiralastrichtung bezeichnet wird. Die schachbrettartige Struktur kann auch derart ausgerichtet und/oder verzerrt sein, dass zwei oder mehrere Spiraläste auftreten. Bevorzugt ist der Übergang des Spiralastes resp. der Spiraläste nach einer Umdrehung der Abrichtwerkzeugs stetig. Eine derartige Struktur mit spiralförmig verlaufenden Spiralästen kann sich mathematisch ebenfalls als additive Überlagerung von zwei Teilwellen beschreiben lassen, wobei die Teilwellen auf den Kreisring projiziert schräg verlaufende Wellenfronten aufweisen. Ist die Anzahl der Spiraläste kleiner als das Zweifache der Ordnung in Spiralastrichtung, so lässt sich die Struktur anhand einer additiven Überlagerung beschreiben, bei der die schräg verlaufenden Wellenfronten der ersten Teilwelle eine positive Steigung aufweisen und die schräg verlaufenden Wellenfronten der zweiten Teilwelle eine negative Steigung aufweisen, wobei die erste Teilwelle eine Ordnung in Umfangrichtung aufweist, welche um die Anzahl der Spiraläste grösser ist als die Ordnung in Umfangrichtung der zweiten Teilwelle. Ist die Anzahl der Spiraläste grösser als das Zweifache der Ordnung in Spiralastrichtung oder gleich dem Zweifachen der Ordnung in Spiralastrichtung, so lässt sich die Struktur anhand einer additiven Überlagerung beschreiben, bei der die schräg verlaufenden Wellenfronten der ersten Teilwelle und der zweiten Teilwelle entweder beide eine positive oder beide eine negative Steigung aufweisen, wobei die erste Teilwelle eine Ordnung in Umfangrichtung aufweist, welche um das Zweifache der Ordnung in Spiralastrichtung grösser ist als die Ordnung in Umfangrichtung der zweiten Teilwelle.

[0026] In einem weiteren Aspekt stellt die vorliegende Erfindung ein Verfahren zur Herstellung eines voranstehend dargestellten Abrichtwerkzeugs zur Verfügung. Das Verfahren zur Herstellung umfasst:

Herstellen eines beschichteten Grundkörpers des Abrichtwerkzeugs in einem Positivverfahren, und

gezieltes Erzeugen der Abrichtflankenmodifikation mittels eines Konditionierwerkzeugs, insbesondere einer zur Abrichtflankenoberfläche senkrecht stehenden rotierenden Konditionierscheibe.

[0027] Bevorzugt wird dabei eine schmale rotierende Konditionierscheibe verwendet, z.B. eine Konditionierscheibe, welche an ihrem Aussenumfang eine Kopfrundung (d.h. eine Balligkeit einer Mantelfläche der Konditionierscheibe in axialer Richtung) mit einem Rundungsradius aufweist, welcher höchstens einem Viertel einer Radialwellenlänge in Radialrichtung entspricht, wobei die Radialwellenlänge der Wellenperiode der Welligkeit in Radialrichtung entspricht.

[0028] Das gezielte Erzeugen der Abrichtflankenmodifikationen kann insbesondere umfassen:

Antreiben des Abrichtwerkzeugs zu einer Drehung um die Abrichtdrehachse;

Antreiben des Konditionierwerkzeugs zu einer Drehung um eine Konditionierdrehachse des Konditionierwerkzeugs,
und

Zustellen des Konditionierwerkzeugs relativ zum Abrichtwerkzeug in einer Richtung, die einen normal zur Abrichtflankenoberfläche verlaufenden Anteil hat, zur Erzeugung der Abrichtflankenmodifikationen durch Materialabtragung von der Abrichtflankenoberfläche.

[0029] Durch die Materialabtragung kann eine Konditionierspur in der Abrichtflankenoberfläche erzeugt werden, welche einem Wellental entspricht und eine Breite aufweist, die einer halben Radialwellenlänge in Radialrichtung entspricht. Die Breite der Konditionierspur kann allerdings auch kleiner sein als die halbe Radialwellenlänge der gewünschten Abrichtflankenmodifikation in Radialrichtung. In einem solchen Fall kann zur Erzeugung eines vollständigen Wellentals die Erzeugung mehrerer benachbarter Konditionierspuren notwendig sein.

[0030] Die Zustellbewegung des Konditionierwerkzeugs relativ zum Abrichtwerkzeug kann durch eine Bewegung des Konditionierwerkzeugs im Raum und/oder eine Bewegung des Abrichtwerkzeugs im Raum erfolgen. Die Zustellbewegung bzw. die dadurch bewirkte Zustellposition des Konditionierwerkzeugs in der normal zur Abrichtflankenoberfläche verlaufenden Richtung kann dabei mit einer Zustellfrequenz oszillieren, welche in einem vorgegebenen festen Verhältnis zur Drehfrequenz des Abrichtwerkzeugs steht. Dadurch kann die Materialabtragung entlang der Konditionierspur variiert werden, was zu einer entsprechenden Welligkeit entlang der Konditionierspur führt.

[0031] Je nach Abrichtflankenmodifikation kann das gezielte Erzeugen besagter Abrichtflankenmodifikation alternativ oder zusätzlich zur oszillierenden Zustellbewegung umfassen:

Erzeugen einer diskontinuierlichen oder kontinuierlichen Konditionieraxialbewegung entlang der Konditionierdrehachse.

[0032] „Kontinuierlich“ bedeutet im vorliegenden Kontext, dass die Konditionieraxialbewegung durchgeführt wird, während das Konditionierwerkzeug mit dem Abrichtwerkzeug in Berührung steht und somit während der Konditionieraxialbewegung Materialabtragung stattfindet.

[0033] „Diskontinuierlich“ bedeutet im vorliegenden Kontext, dass die Konditionieraxialbewegung durchgeführt wird, während das Konditionierwerkzeug nicht mit dem Abrichtwerkzeug in Berührung steht und somit während der Konditionieraxialbewegung keine Materialabtragung stattfindet.

[0034] Die Konditionieraxialbewegung ist als relative Bewegung zwischen dem Abrichtwerkzeug und dem Konditionierwerkzeug entlang der Konditionierdrehachse zu verstehen. Es können dabei das Konditionierwerkzeug und/oder das Abrichtwerkzeug dazu angetrieben werden, die Konditionieraxialbewegung durchzuführen.

[0035] Je nach Abrichtflankenmodifikation kann das gezielte Erzeugen besagter Abrichtflankenmodifikation weiter umfassen:

Erzeugen einer Mehrzahl sich unter einem vorgegebenen Winkel kreuzender Konditionierspuren mit dem Konditionierwerkzeug auf der Abrichtflankenoberfläche durch eine diskontinuierliche und/oder kontinuierliche Konditionieraxialbewegung entlang der Konditionierdrehachse,

wobei die Zustellposition des Konditionierwerkzeugs zur Abrichtflankenoberfläche in der normal zur Abrichtflankenoberfläche verlaufenden Richtung einen konstanten Wert haben kann oder wobei die Zustellbewegung bzw. Zustellposition des Konditionierwerkzeugs mit einer Zustellfrequenz oszillieren kann.

[0036] So kann beispielsweise eine Struktur erzeugt werden, bei welcher sich Wellentäler kreuzen und dazwischenliegende Materialbereiche der Abrichtflankenoberfläche Erhebungen bilden. Je nach Orientierung der sich kreuzenden Wellentäler auf der Abrichtflankenoberfläche können diese Erhebungen entlang eines auf dem Kreisring spiralförmig verlaufenden Spiralasts angeordnet sein.

[0037] Alternativ kann das Verfahren zur Herstellung des Abrichtwerkzeugs umfassen:

Herstellen des Abrichtwerkzeugs in einem Negativverfahren, wobei das Negativverfahren umfasst:

Herstellen einer Negativform durch Ausdrehen eines Negativgrundkörpers;

Drehen einer gezielten Negativmodifikation in die ausgedrehte Negativform derart, dass die Negativmodifikation die Abrichtflankenmodifikation bewirkt und/oder

Erzeugen einer mechanischen und/oder hydraulischen Verspannung des Negativgrundkörpers während des Ausdrehens derart, dass die ausgedrehte Negativform nach einem Lösen der mechanischen Verspannung eine Negativmodifikation aufweist, welche zu der Abrichtflankenmodifikation bewirkt.

[0038] Das Drehen der gezielten Negativmodifikation in die ausgedrehte Negativform kann mit einem geeigneten Bearbeitungswerkzeug, insbesondere einem Drehmeißel, erfolgen, welcher bevorzugt entlang einer Negativformdrehachse der Negativform relativ zur Negativform bewegbar ist.

[0039] Insbesondere kann das gezielte Erzeugen der Negativmodifikationen umfassen:

Antreiben der Negativform zu einer Drehung um eine Negativformdrehachse mit einer Drehfrequenz;

Positionieren des Drehmeißels derart, dass dieser eine Negativspur in mindestens einer Innenflanke der Negativform erzeugt.

[0040] In einem weiteren Aspekt stellt die Erfindung ein Verfahren zum Abrichten einer Schleifschnecke für die Wälzbearbeitung vorverzahnter Werkstücke zur Verfügung. Das Verfahren zum Abrichten einer Schleifschnecke für die Wälzbearbeitung vorverzahnter Werkstücke umfasst:

Abrichten der Schleifschnecke mit einem voranstehend dargestellten Abrichtwerkzeug, derart, dass die Abrichtflankenmodifikation eine Schneckenmodifikation auf einer Schleifschneckenflanke eines Schneckenengangs der Schleifschnecke bewirkt.

[0041] Dabei kann zwischen dem Abrichtwerkzeug und der Schleifschnecke eine vorgegebene feste Drehwinkelkopplung bestehen, um gezielt auf der Schleifschneckenflanke entlang des Schneckenengangs eine periodische Schneckenmodifikation zu erzeugen. Die Schneckenmodifikation stellt in diesem Fall ein gestauchtes Abbild der Abrichtflankenmodifikation mit einem konstanten Stauchungsfaktor dar, wobei der Stauchungsfaktor vom Drehzahlverhältnis zwischen der Drehung des Abrichtwerkzeugs und der Drehung der Schleifschnecke abhängt.

[0042] Alternativ kann zwischen dem Abrichtwerkzeug und der Schleifschnecke eine vorgegebene zeitlich variable Drehwinkelkopplung bestehen, um auf der Schleifschneckenflanke entlang des Schneckenengangs gezielt eine nicht-periodische Schneckenmodifikation zu erzeugen. Die Abrichtflankenmodifikation wird in diesem Fall mit einem nicht-konstanten Stauchungsfaktor in die Schneckenmodifikation abgebildet.

[0043] In einem weiteren Aspekt ist ein Verfahren zum Abrichten einer Schleifschnecke für die Wälzbearbeitung eines vorverzahnten Werkstücks beschrieben, insbesondere umfassend das voranstehend dargestellte Verfahren, umfassend:

Definieren einer gewünschten Schneckenmodifikation auf einer Schleifschneckenflanke eines Schneckenengangs der Schleifschnecke;

Abrichten der Schleifschnecke mit einem Abrichtwerkzeug, welches eine gezielt erzeugte Abrichtflankenmodifikation aufweist,

wobei während des Abrichtens zwischen dem Abrichtwerkzeug und der Schleifschnecke eine feste oder variable Drehwinkelkopplung besteht, welche derart vorgegeben ist, dass die Abrichtflankenmodifikation entlang des Schneckenengangs die gewünschte Schneckenmodifikation erzeugt.

[0044] In einem weiteren Aspekt stellt die Erfindung ein Verfahren zur Erzeugung einer modifizierten Oberflächenstruktur auf einer Zahnflanke eines vorverzahnten Werkstücks zur Verfügung. Das Verfahren zur Erzeugung einer modifizierten Oberflächenstruktur auf einer Zahnflanke eines vorverzahnten Werkstücks umfasst:

Abrichten einer zur Wälzbearbeitung vorverzahnter Werkstücke geeigneten Schleifschnecke mit dem voranstehend dargestellten Verfahren;

Antreiben der Schleifschnecke zu einer Drehung um eine Schneckenachse;

Antreiben des vorverzahnten Werkstücks zu einer Drehung um eine Werkstückachse;

Erzeugen einer Relativbewegung zwischen der Schleifschnecke und dem vorverzahnten Werkstück in einer Shift-Richtung parallel zur Schneckenachse („Shiftbewegung“) mit einer Shiftvorschubgeschwindigkeit, und

Erzeugen einer Relativbewegung zwischen der Schleifschnecke und dem vorverzahnten Werkstück in einer Axial-Richtung parallel zur Werkstückachse („axiale Vorschubbewegung“) mit einer Axialvorschubgeschwindigkeit,

wobei die Schleifschnecke und das vorverzahnte Werkstück in einem Wälzeingriff stehen und wobei die Shiftvorschubgeschwindigkeit und die Axialvorschubgeschwindigkeit in einem derart vorgegebenen Diagonalverhältnis stehen, dass die Schneckenmodifikation auf die Zahnflanke des vorverzahnten Werkstücks abgebildet wird und dadurch gezielt die Oberflächenstruktur der Zahnflanke modifiziert wird.

[0045] Das Diagonalverhältnis bezeichnet dabei das Verhältnis der Shiftvorschubgeschwindigkeit der Schleifschnecke in der Shift-Richtung zur Axialvorschubgeschwindigkeit der Schleifschnecke in der Axial-Richtung parallel zur Werkstückachse. Das Diagonalverhältnis kann Null oder ungleich Null sein. Wenn das Diagonalverhältnis Null ist, entsteht auf der Zahnflanke eine Profilmodifikation entlang einer Höhenrichtung der Zahnflanke. Bei einem Diagonalverhältnis ungleich Null kann die entstehende Modifikation der Oberflächenstruktur der Zahnflanke eine topologische Modifikation sein, d.h. eine Modifikation, die Anteile sowohl in Höhenrichtung als auch in Breitenrichtung der Zahnflanke aufweist.

[0046] Zusätzlich kann das Verfahren auch das Erzeugen einer Relativbewegung zwischen der Schleifschnecke und dem vorverzahnten Werkstück in einer Radial-Richtung senkrecht zur Werkstückachse („radiale Zustellbewegung“) umfassen. Dadurch können der vorstehend geschilderten Modifikation der Oberflächenstruktur der Zahnflanke weitere Modifikationen überlagert werden. Im Fall eines konischen Werkstücks können die radiale Zustellbewegung und die axiale Vorschubbewegung abhängig von einem Konuswinkel der konischen Verzahnung gekoppelt sein.

[0047] Die Schneckenmodifikation führt während der Wälzbearbeitung zu einer Variation einer Durchdringungstiefe zwischen der Schleifschnecke und dem vorverzahnten Werkstück und erzeugt somit eine Zahnflankenwelligkeit entlang einer Kontaktspur auf der Zahnflanke, wobei die Kontaktspur einer Linie entspricht, auf welcher sich der Berührungspunkt zwischen der Schleifschnecke und dem im Wälzeingriff stehenden vorverzahnten Werkstück während der Wälzbearbeitung auf der Zahnflanke bewegt.

[0048] Weist das Abrichtwerkzeug eine schachbrettartige Struktur auf, die derart ausgerichtet ist, dass in Umfangrichtung jeweils benachbarte Wellentäler und Wellenberge entlang eines auf dem Kreisring spiralförmig verlaufenden Spiralastes angeordnet sind und somit eine Spiralwelligkeit bilden, kann während des Abrichtens zwischen dem Abrichtwerkzeug und der Schleifschnecke eine feste Drehwinkelkopplung derart gewählt werden, dass der Spiralast auf einen Schneckenkontaktpfad auf der Schleifschneckenflanke abgebildet wird, wobei der Schneckenkontaktpfad einer Linie entspricht, auf welcher sich ein Berührungspunkt zwischen der Schleifschnecke und dem im Wälzeingriff stehenden vorverzahnten Werkstück während der Wälzbearbeitung auf der Schleifschneckenflanke bewegt.

[0049] Somit kann die entlang des Spiralastes auf der Abrichtflankenoberfläche auftretende Spiralwelligkeit vom Abrichtwerkzeug via die Schleifschnecke gezielt entlang der Kontaktspur auf die Zahnflanke übertragen werden.

[0050] In einigen Ausführungsformen sind den gezielten Bewegungen der Schleifschnecke in Shift-Richtung und in Axial-Richtung relativ zum vorverzahnten Werkstück nichtkontrollierte, insbesondere stochastisch auftretenden Zusatzbewegungen überlagert, welche zu nicht-kontrollierten Variationen der Durchdringungstiefe führen. Solche nicht-kontrollierten Zusatzbewegungen können z.B. durch unvermeidbare Vibrationen der Walzschleifmaschine bedingt sein, mit der die Wälzbearbeitung durchgeführt wird.

[0051] Durch die gezielte Variation der Durchdringungstiefe anhand der Schneckenmodifikationen der wie vorstehend beschrieben abgerichteten Schleifschnecke kann ein geeignetes Trägermuster auf der Zahnflanke erzeugt werden, welches durch die Überlagerung mit den nicht-kontrollierten Variationen der Durchdringungstiefe diffuser gemacht werden kann, was zu einer Optimierung des Geräuschverhaltens führen kann. Auf diese Weise können z.B. unvermeidbare Vibrationen gezielt dazu beitragen, das Geräuschverhalten zu verbessern.

[0052] Bevorzugt weist die gezielte Variation der Durchdringungstiefe aufgrund der wie vorstehend beschrieben abgerichteten Schleifschnecke eine Modulationsamplitude auf, welche in einem Bereich zwischen dem 0.2-Fachen und 5-Fachen eines Schwankungsmasses für die nicht-kontrollierten Abweichungen der Durchdringungstiefe liegt, wobei das Schwankungsmass insbesondere einer Standardabweichung oder einem Interquartilsabstand der nicht-kontrollierten Abweichungen der Durchdringungstiefe entspricht, insbesondere, wobei das Schwankungsmass der nicht-kontrollierten Variationen der Durchdringungstiefe ermittelt wird und die Modulationsamplitude, und dadurch insbesondere eine Amplitude der Schneckenmodifikationen und dadurch wiederum insbesondere eine Amplitude der Abrichtflankenmodifikationen, gezielt in Abhängigkeit von dem ermittelten Schwankungsmass gewählt wird.

[0053] In einem weiteren Aspekt ist eine Konditioniervorrichtung beschrieben, umfassend:

ein auf einer Konditionierspindel aufgespanntes Konditionierwerkzeug, insbesondere eine schmale Konditionierscheibe, d.h. eine Konditionierscheibe, welche an ihrem Aussenumfang eine Kopfrundung mit einem Rundungsradius aufweist, welcher höchstens einem Viertel einer Radialwellenlänge in Radialrichtung entspricht, wobei die Radialwellenlänge der Wellenperiode der Welligkeit in Radialrichtung entspricht;

eine Abrichtspindel, die dazu ausgebildet ist, ein Abrichtwerkzeug zu einer Drehung um die Abrichtdrehachse aufzunehmen;

eine Konditioniersteuerung, welche dazu ausgebildet ist, das Konditionierwerkzeug relativ zum Abrichtwerkzeug zu bewegen, derart, dass das Abrichtwerkzeug mit den Abrichtflankenmodifikationen wie voranstehend dargestellt versehen wird.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0054] Bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung werden im Folgenden anhand der Zeichnungen beschrieben, die lediglich zur Erläuterung dienen und nicht einschränkend auszulegen sind. In den Zeichnungen zeigen:

- Fig. 1A eine schematische stirnseitige Ansicht eines Abrichtwerkzeugs in einer senkrecht zu einer Abrichtdrehachse des Abrichtwerkzeugs stehenden Projektionsebene;
- Fig. 1B eine Projektion einer Abrichtflankenoberfläche in abgewickelter Form;
- Fig. 2 ein erstes Beispielmuster einer Abrichtflankenmodifikation;
- Fig. 3 ein zweites Beispielmuster einer Abrichtflankenmodifikation;
- Fig. 4 ein drittes Beispielmuster einer Abrichtflankenmodifikation;
- Fig. 5 ein viertes Beispielmuster einer Abrichtflankenmodifikation;
- Fig. 6A ein fünftes Beispielmuster einer Abrichtflankenmodifikation;
- Fig. 6B ein erstes Teilwellenmuster zur additiven mathematischen Beschreibung des fünften Beispielmusters der Fig. 6A;
- Fig. 6C ein zweites Teilwellenmuster zur additiven mathematischen Beschreibung des fünften Beispielmusters der Fig. 6A;
- Fig. 7A eine erste beispielhafte Anordnung eines Spiralasts auf der Abrichtflankenoberfläche;
- Fig. 7B eine zweite beispielhafte Anordnung zweier Spiraläste auf der Abrichtflankenoberfläche;
- Fig. 7C eine dritte beispielhafte Anordnung dreier Spiraläste auf der Abrichtflankenoberfläche;
- Fig. 7D ein sechstes Beispielmuster einer Abrichtflankenmodifikation mit zwei Spiralästen;
- Fig. 7E das sechste Beispielmuster übertragen auf die Projektion der Abrichtflankenoberfläche;
- Fig. 8 eine Konditioniervorrichtung gemäss einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;
- Fig. 9 eine ausgedrehte Negativform zur Herstellung eines Abrichtwerkzeugs gemäss der vorliegenden Erfindung;
- Fig. 10A eine anhand einer Verformungsvorrichtung gespannte Negativform;
- Fig. 10B eine entspannte und ausgedrehte Negativform zur Herstellung eines Abrichtwerkzeugs gemäss der vorliegenden Erfindung;
- Fig. 11 eine Projektion einer Schleifschneckenflanke eines Schneckengangs einer Schleifschnecke in abgewickelter Form;
- Fig. 12 eine schematische Ansicht einer Wälzschleifmaschine, und
- Fig. 13 ein vergrößerter Ausschnitt aus Fig. 12.

BESCHREIBUNG BEVORZUGTER AUSFÜHRUNGSFORMEN

Abrichtwerkzeug

[0055] In Fig. 1A zeigt schematisch eine stirnseitige Ansicht eines Abrichtwerkzeugs 33, wobei das Abrichtwerkzeug 33 eine Abrichtflankenoberfläche 331 aufweist, welche in einer senkrecht zu einer Abrichtdrehachse A des Abrichtwerkzeugs 33 stehenden Projektionsebene einen Kreisring bildet, wobei der Kreisring eine Radialrichtung mit einer Radialkoordinate r und eine Umfangrichtung mit einer Winkelkoordinate φ definiert und wobei der Kreisring einen Innenradius r_A aufweist.

[0056] In Fig. 1B ist dieser Kreisring, welcher in Radialrichtung eine Profilhöhe d und in Umfangrichtung eine Länge von 2π aufweist, schematisch in abgewickelter Form dargestellt.

[0057] Die Figuren 2 - 6A stellen beispielhaft schematisch verschiedene wellenförmige Muster dar, welche die gezielt erzeugten Abrichtflankenmodifikationen auf der in Fig. 1B gezeigten Abrichtflankenoberfläche aufweisen können, wobei Wellenberge hier schematisch hell schattiert und Wellentäler dunkel schattiert dargestellt sind.

[0058] Im Folgenden wird dargelegt, wie diese zwei-dimensionalen wellenförmigen Muster mathematisch beschrieben werden können. Dazu wird ein Musterrechteck mit einer Musterhöhe $\Delta r'$ in Höhenrichtung, die im Folgenden als Radialrichtung bezeichnet wird und einer Musterlänge 2π in Längsrichtung, die im Folgenden als Umfangrichtung bezeichnet wird, verwendet. Die Muster lassen sich jeweils als eine zwei-dimensionale reellwertige Fourier-Reihe $f(\varphi, r')$ (d.h. eine reellwertige Fourier-Reihe in zwei reellwertigen Variablen φ und r') in Abhängigkeit von der Winkelkoordinate $\varphi \in [0, 2\pi]$ und einer Radialkoordinate des Musterrechtecks $r' \in [0, \Delta r']$ beschreiben:

$$f(\varphi, r') = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_{n,m} \cdot e^{i2\pi R_n r'} \cdot e^{ik_m \varphi}$$

wobei die Umfangfrequenzkomponenten $k_m = mk_1$ einheitenlos ist und die Radialfrequenzkomponenten $R_n = nR_1$ die Einheit [1/mm] aufweisen. Die Winkelkoordinate φ des Musterrechtecks entspricht in dieser Definition der Winkelkoordinate φ des voranstehend erwähnten Kreistrings. Die Radialkoordinate r' des Koordinatensystems des Musterrechtecks lässt sich anhand einer linearen Transformation auch als Radialkoordinate r im Koordinatensystems des Kreistrings ausdrücken, z.B. über die Beziehung $r = r' + r_A$, wobei r_A den Innenradius des Kreistrings bezeichnet.

[0059] Die Indices $m \in \mathbb{Z}$ und $n \in \mathbb{Z}$ sind ganze Zahlen, wodurch die Umfangfrequenzkomponenten k_m resp. die Radialfrequenzkomponenten R_n ganzzahlige Vielfache einer Umfanggrundfrequenz $k_1 = 1$ bzw. einer Radialgrundfrequenz $R_1 = \frac{1}{\Delta r'}$ sind.

[0060] Die Fourier-Koeffizienten, welche Amplitude und Phasenlage der entsprechenden Frequenzkomponenten angeben, werden als $c_{n,m}$ bezeichnet. Die Fourier-Koeffizienten lassen sich allgemein in komplexer Form schreiben als $c_{n,m} = a_{n,m} + ib_{n,m} = A_{n,m} \cdot e^{i\theta_{n,m}}$, wobei $a_{n,m}$ der Realteil, $b_{n,m}$ der Imaginärteil, $A_{n,m}$ die Amplitude und $\theta_{n,m}$ die Phase ist. Der komplex konjugierte Koeffizient ist $\overline{c_{n,m}} = a_{n,m} - ib_{n,m} = A_{n,m} \cdot e^{-i\theta_{n,m}}$. Der Imaginärteil bestimmt insbesondere die Phasenlage des Musters. Setzt man wie hier einen stetigen Übergang nach einer Umdrehung des Abrichtwerkzeugs voraus (2π -Periodizität), so ist die Phasenlage des Musters in Umfangrichtung irrelevant.

[0061] Durch die voranstehend gewählte Definition der Radialgrundfrequenz wiederholt sich das Muster in Radialrichtung periodisch mit einer Musterperiode von $\Delta r'$.

[0062] Die Phasenlage der Abrichtflankenmodifikationen $f(\varphi, r)$ auf der Abrichtflankenoberfläche 331 in Radialrichtung kann beliebig gewählt werden und als eine entsprechende lineare Koordinatentranslation von der Radialkoordinate r' des Musterrechtecks auf die Radialkoordinate der Abrichtflankenoberfläche r ausgedrückt werden, $f(\varphi, r') \rightarrow f(\varphi, r)$, wobei die Profilhöhe d , über welche sich die Abrichtflankenmodifikationen erstrecken, der Musterperiode $\Delta r'$ entsprechen kann, oder aber kleiner oder grösser (da sich das Muster mit einer Musterperiode von $\Delta r'$ periodisch fortsetzt) gewählt werden kann. Anders formuliert bedeutet dies, dass ein beliebiger radialer Ausschnitt der im Folgenden mathematisch beschriebenen periodischen Beispielmuster als Abrichtflankenmodifikation auf dem Abrichtwerkzeug aufgebracht sein kann.

[0063] Somit ist die Phasenlage des Musters auf dem Musterrechteck irrelevant und es können zur vereinfachten Beschreibung auf dem Musterrechteck die Fourier-Koeffizienten $c_{n,m}$ und $c_{-n,-m}$ komplex konjugiert gewählt werden, d.h. $c_{n,m} = \overline{c_{-n,-m}} = A_{n,m} \cdot e^{i\theta_{n,m}}$.

[0064] Bildlich gesprochen lässt sich die Abrichtflankenmodifikation als Ausschnitt eines wellenförmigen Musters auf dem Musterrechteck oder einer Überlagerung von zwei oder mehr wellenförmigen Teilmustern auf dem Musterrechteck beschreiben, wobei jedes dieser wellenförmigen Teilmuster eine periodische Welligkeit in Radialrichtung und/oder in Umfangrichtung aufweisen kann. Es gilt zu beachten, dass nur die absolute Phasenlage des resultierenden Musters irrelevant ist. Werden mehrere wellenförmige Teilmuster zur Beschreibung des resultierenden Musters überlagert, so ist die relative Phasenlage der Teilmuster zueinander hingegen relevant.

[0065] Die Anzahl Wellenperioden auf dem Musterrechteck in Radialrichtung wird im Folgenden für jedes dieser wellenförmigen Muster/Teilmuster als Ordnung in Radialrichtung N und die Anzahl Wellenperioden in Umfangrichtung als Ordnung in Umfangrichtung M bezeichnet. Eine Wellenperiode in Radialrichtung hat eine Radialwellenlänge λ_r , und eine Wellenperiode in Umfangrichtung wird im folgenden Kontext als Versatzwinkel $\Delta\varphi_U$ ausgedrückt („Wellenlänge in Umfangrichtung“). Da die Umfanggrundfrequenz $k_1 = 1$ gewählt wurde, entspricht die Ordnung in Umfangrichtung M dem Indexbetrag $|m|$, und da die Radialgrundfrequenz $R_1 = \frac{1}{\Delta r'}$ gewählt wurde, entspricht die Ordnung in Radialrichtung N dem Indexbetrag $|n|$.

[0066] In der in Fig. 2 dargestellten Ausführungsform weist das Muster Wellenfronten in Form von Linien konstanter Phasenlage auf, wobei die Wellenfronten auf den abgewinkelten Kreistring projiziert durchgehende, gerade Linien bilden. Diese Linien sind, wie in Fig. 2 gezeigt, gegenüber der abgewinkelten Umfangrichtung um einen Neigungswinkel α geneigt und in der Umfangrichtung um einen Versatzwinkel $\Delta\varphi_U$ voneinander beabstandet. Damit das Muster der Abrichtflankenmodifikation nach einer Umdrehung periodisch fortsetzbar ist, sind nur diskrete Werte für den Neigungswinkel α möglich, d.h.

$$\alpha = \pm \arctan\left(\frac{i_s \cdot \lambda_{r'}}{4\pi}\right), \text{ wobei } i_s \in \mathbb{N},$$

wobei die Linien konstanter Phasenlage für $\alpha < 0^\circ$ eine negative Steigung aufweisen (d.h. auf dem Musterrechteck wie in Fig. 2 von links oben nach rechts unten verlaufen) und wobei die Linien konstanter Phasenlage für $\alpha > 0^\circ$ eine positive Steigung aufweisen (d.h. auf dem Musterrechteck von links unten nach rechts oben verlaufen). Weisen die Linien konstanter Phasenlage eine negative Steigung auf, so haben folgende Frequenzkomponentenpaare $\{R_n, k_m\}$ einen Fourier-Koeffizient ungleich Null:

$$\{R_{n=+N}, k_{m=+M}\} \text{ und } \{R_{n=-N}, k_{m=-M}\}$$

[0067] Weisen die Linie konstanter Phasenlage hingegen eine positive Steigung auf, so haben folgende Frequenzkomponentenpaare einen Fourier-Koeffizient ungleich Null:

$$\{R_{n=+N}, k_{m=-M}\} \text{ und } \{R_{n=-N}, k_{m=+M}\}$$

[0068] Die Wellenform muss nicht notwendigerweise eine reine Sinusform sein, daher können auch weitere Fourier-Koeffizienten ungleich Null sein. Insbesondere können die höheren Harmonischen der oben genannten Fourier-Koeffizienten ungleich Null sein, d.h. die Fourier-Koeffizienten, für die n ein ganzzahliges Vielfaches von N und m ein ganzzahliges Vielfaches von M ist. In diesem Fall müssen die relativen Phasenwinkel der höheren Harmonischen bzgl. der niedrigsten Frequenz mitberücksichtigt werden, da dies das resultierende Muster entscheidend beeinflusst

[0069] Folgende Tabelle fasst die Parameter der Abrichtflankenmodifikation aus der Fig. 2 zusammen:

Richtung	Wellenlänge	Ordnung	Frequenzkomponentenpaare mit Fourier-Koeffizient $\neq$ Null
In Radialrichtung	$\lambda_{r'} = \frac{\Delta r'}{5}$	$N = \frac{\Delta r'}{\lambda_{r'}} = 5$	$\left\{R_5 = \frac{1}{\lambda_{r'}}, k_5 = 5\right\}$
In Umfangsrichtung	$\Delta\varphi_U = \frac{\Delta\varphi_1}{5} = \frac{2\pi}{5}$	$M = 5$	$\left\{R_{-5} = -\frac{1}{\lambda_{r'}}, k_{-5} = -5\right\}$

[0070] Konkret gilt für das Muster der Fig. 2:

$c_{5,5} = c_{-5,-5} \neq 0$, während alle anderen Fourier-Koeffizienten Null sind.

[0071] In Fig. 3 beträgt der Neigungswinkel α genau 90° , d.h. die Wellenfronten der Abrichtflankenmodifikation sind, auf den Kreisring projiziert, radial ausgerichtet. Dieser Fall entspricht einer komplexen Fourier-Reihe, welche keinen Koeffizienten ungleich Null für eine Radialfrequenzkomponente R_n ungleich Null in der Radialrichtung aufweist. Die hier dargestellte Abrichtflankenmodifikation verläuft in Umfangsrichtung stetig, d.h. die wellenförmige Abrichtflankenmodifikation weist eine ganzzahlige Anzahl Wellenperioden bezogen auf eine einzelne Umdrehung des Abrichtwerkzeugs auf (2π -Periodizität). Folgende Tabelle fasst die Parameter der Abrichtflankenmodifikation aus der Fig. 3 zusammen:

Richtung	Wellenlänge	Ordnung	Frequenzkomponentenpaare mit Fourier-Koeffizienten $\neq$ Null
In Radialrichtung	∞	$N = 0$	$\{R_0 = 0, k_4 = 4\}$
In Umfangsrichtung	$\Delta\varphi_U = \frac{\Delta\varphi_1}{4} = \frac{2\pi}{4}$	$M = 4$	$\{R_0 = 0, k_{-4} = -4\}$

[0072] Konkret gilt für das Muster der Fig. 3:

$c_{0,4} = c_{0,-4} \neq 0$, während alle anderen Fourier-Koeffizienten Null sind.

[0073] In Fig. 4 beträgt der Neigungswinkel α genau 0° , d.h. die Wellenfronten erstrecken sich geradlinig parallel zur Umfangsrichtung und bilden in der Radialrichtung eine Radialwelligkeit mit einer Radialwellenlänge λ_r . Dieser Fall entspricht einer komplexen Fourier-Reihe, welche keinen Koeffizienten ungleich Null für eine Umfangsfrequenzkomponente k_m un-

gleich Null in der Umfangrichtung aufweist. Folgende Tabelle fasst die Parameter der Abrichtflankenmodifikation aus der Fig. 4 zusammen:

Richtung	Wellenlänge	Ordnung	Frequenzkomponentenpaare mit Fourier-Koeffizienten $\neq$ Null
In Radialrichtung	$\lambda_{r'} = \frac{\Delta r'}{4}$	$N = \frac{\Delta r'}{\lambda_{r'}} = 4$	$\left\{ R_4 = \frac{1}{\lambda_{r'}}, k_0 = 0 \right\}$
In Umfangrichtung	∞	$M = 0$	$\left\{ R_{-4} = -\frac{1}{\lambda_{r'}}, k_0 = 0 \right\}$

[0074] Konkret gilt für das Muster der Fig. 4:

$c_{4,0} = c_{-4,0} \neq 0$, während alle anderen Fourier-Koeffizienten Null sind.

[0075] In dem in Fig. 5 dargestellten Ausführungsbeispiel weist die zwei-dimensionale komplexe Fourier-Reihe einen Koeffizienten ungleich Null für eine Radialfrequenzkomponente R_n ungleich Null und für eine Umfangfrequenzkomponente k_m ungleich Null auf, derart, dass die wellenförmige Abrichtflankenmodifikation auf den abgewinkelten Kreisring projiziert eine schachbrettartige Struktur mit zueinander versetzt angeordneten Wellenbergen und Wellentälern bildet. Mathematisch kann das Muster aus Fig. 5 als additive Überlagerung einer ersten Teilwelle $f_{W1}(\varphi, r')$, und einer zweiten Teilwelle $f_{W2}(\varphi, r')$ beschrieben werden,

$$f(\varphi, r') = f_{W1}(\varphi, r') + f_{W2}(\varphi, r'),$$

wobei die erste Teilwelle und die zweite Teilwelle in Umfangrichtung dieselbe Ordnung M aufweisen und in Radialrichtung dieselbe Ordnung N aufweisen, wobei aber die Linien konstanter Phasenlage bei der ersten Teilwelle eine negative Steigung und bei der zweiten Teilwelle eine positive Steigung aufweisen.

[0076] In Fig. 5 sind jeweils benachbarte Wellentäler und Wellenberge zueinander versetzt und bilden somit jeweils eine Radialwelligkeit entlang parallel zur Radialrichtung verlaufende Radialpfade $R1, R2$. Die Radialwelligkeiten benachbarter Radialpfade sind in dem in Fig. 5 gezeigten Beispiel genau um 180° versetzt, wodurch jeweils eine Umfangwelligkeit entlang parallel zur Umfangrichtung verlaufender Umfangpfade $U1, U2$ gebildet wird, wobei die Umfangpfade $U1, U2$ um die halbe Radialwellenlänge $\lambda_{r'}/2$ in Radialrichtung voneinander beabstandet sind. Folgende Tabelle fasst die Parameter der Abrichtflankenmodifikation aus der Fig. 5 zusammen:

Richtung	Wellenlänge	Ordnung	Frequenzkomponenten mit Fourier-Koeffizienten $\neq$ Null
Teilwelle 1:			
In Radialrichtung	$\lambda_{r',W1} = \frac{\Delta r'}{4}$	$N_{W1} = \frac{\Delta r'}{\lambda_{r',W1}} = 4$	$\left\{ R_4 = \frac{1}{\lambda_{r',W1}}, k_4 = 4 \right\}$
In Umfangrichtung	$\Delta\varphi_{U,W1} = \frac{\Delta\varphi_1}{4} = \frac{2\pi}{4}$	$M_{W1} = 4$	$\left\{ R_{-4} = -\frac{1}{\lambda_{r',W1}}, k_{-4} = -4 \right\}$
Teilwelle 2:			
In Radialrichtung	$\lambda_{r',W2} = \frac{\Delta r'}{4}$	$N_{W2} = \frac{\Delta r'}{\lambda_{r',W2}} = 4$	$\left\{ R_4 = \frac{1}{\lambda_{r',W2}}, k_{-4} = -4 \right\}$
In Umfangrichtung	$\Delta\varphi_{U,W2} = \frac{\Delta\varphi_1}{4} = \frac{2\pi}{4}$	$M_{W2} = 4$	$\left\{ R_{-4} = -\frac{1}{\lambda_{r',W2}}, k_4 = 4 \right\}$

Konkret gilt für das Muster der Fig. 5: $c_{4,4} = \overline{c_{-4,-4}} \neq 0$ und $c_{4,-4} = \overline{c_{-4,4}} \neq 0$ während alle anderen Fourier-Koeffizienten Null sind.

[0077] Fig. 6A zeigt ein spiralförmiges Muster, das mathematisch als additive Überlagerung einer in Fig. 6B gezeigten ersten Teilwelle $f_{W1}(\varphi, r')$, und einer in Fig. 6C gezeigten zweiten Teilwelle $f_{W2}(\varphi, r')$, beschrieben werden kann:

$$f(\varphi, r') = f_{W1}(\varphi, r') + f_{W2}(\varphi, r')$$

[0078] Im Vergleich zu Fig. 5 sind die Radialwelligkeiten der benachbarten Radialpfade R1,R2 in Fig. 6A um einen von 180° abweichenden Wert zueinander versetzt, wodurch in Umfangrichtung jeweils benachbarte Wellentäler und Wellenberge entlang eines auf dem Kreisring spiralförmig verlaufenden Spiralasts S1 angeordnet sind und somit eine Spiralwelligkeit bilden. Die Anzahl Wellenperioden entlang des Spiralasts S1 wird im Folgenden als Ordnung in Spiralastrichtung L bezeichnet.

[0079] Die Steigungshöhe eines Spiralastes über eine Umdrehung des Abrichtwerkzeugs ergibt sich in Abhängigkeit der halben Radialwellenlänge $\lambda_r/2$ und der Anzahl der Spiraläste $i_s \in \mathbb{N}^+$. Die Spiraläste bilden dabei auf dem abgewickelten Kreisring gegenüber der Umfangrichtung geneigte Geraden, wobei der Neigungswinkel α (analog zur Situation in Fig. 2), ausgedrückt werden kann als:

$$\alpha = \pm \arctan\left(\frac{i_s \cdot \lambda_r}{4\pi}\right)$$

[0080] Damit das Muster der Abrichtflankenmodifikation nach einer Umdrehung periodisch fortsetzbar ist, sind nur diskrete Werte für die Steigungshöhe möglich. Das Muster lässt sich immer dann periodisch fortsetzen, wenn die Steigungshöhe einem Vielfachen der halben Radialwellenlänge $\lambda_r/2$ entspricht.

[0081] Um also einen stetigen Übergang des Spiralastes nach einer Umdrehung des Abrichtwerkzeugs sicherzustellen, sind zwei Fälle zu unterscheiden:

1. Die frei gewählte Ordnung in Spiralastrichtung L ist ganzzahlig: In diesem Fall muss die Steigungshöhe des Spiralastes einem geraden Vielfachen der halben Radialwellenlänge $\lambda_r/2$ entsprechen, d.h. die Anzahl der Spiraläste i_s ist gerade.
2. Die frei gewählte Ordnung in Spiralastrichtung L ist halbzahlig: In diesem Fall muss die Steigungshöhe des Spiralastes einem ungeraden Vielfachen der halben Radialwellenlänge $\lambda_r/2$ entsprechen, d.h. die Anzahl der Spiraläste i_s ist ungerade.

[0082] In Fig. 6A beträgt die Ordnung in Spiralastrichtung $L=5.5$ und die Steigungshöhe ist genau $\lambda_r/2$, da genau ein Spiralast vorhanden ist, d.h. $i_s = 1$.

[0083] Um für die Spiralwelligkeit eine bestimmte Ordnung L in Spiralastrichtung zu erhalten, muss für die Ordnung der Welligkeiten in Umfangsrichtung $M_{W,1}$ der ersten Teilwelle $f_{W1}(\varphi, r')$ und für die Ordnung der Welligkeiten in Umfangsrichtung $M_{W,2}$ der zweiten Teilwelle $f_{W2}(\varphi, r')$ gelten:

$$M_{W,1} = \frac{i_s}{2} + L$$

$$M_{W,2} = \left| \frac{i_s}{2} - L \right|$$

wobei, falls $(\frac{i_s}{2} - L) < 0$ gilt, die zweite Teilwelle eine Steigung mit einem Vorzeichen aufweist, das dem Vorzeichen der Steigung der ersten Teilwelle entgegengesetzt ist. Falls $(\frac{i_s}{2} - L) \geq 0$ gilt, weist die zweite Teilwelle eine Steigung mit demselben Vorzeichen wie die erste Teilwelle auf. Folgende Tabelle fasst die Parameter der Abrichtflankenmodifikation aus der Fig. 6A zusammen:

	Wellenlänge	Ordnung	Frequenzkomponentenpaare mit Fourier-Koeffizienten $\neq$ Null
Teilwelle 1:			
In Radialrichtung	$\lambda_{r',W1} = \Delta r'$	$N_{W1} = \frac{\Delta r'}{\lambda_{r',W1}} = 1$	$\left\{ R_1 = \frac{1}{\lambda_{r',W1}} , k_6 = 6 \right\}$ $\left\{ R_{-1} = -\frac{1}{\lambda_{r',W1}} , k_{-6} = -6 \right\}$
In Umfangrichtung	$\Delta\varphi_{U,W2} = \frac{\Delta\varphi_1}{6}$ $= \frac{2\pi}{6}$	$M_{W1} = 6$	
Teilwelle 2:			
In Radialrichtung:	$\lambda_{r',W2} = \Delta r'$	$N_{W2} = \frac{\Delta r'}{\lambda_{r',W1}} = 1$	$\left\{ R_1 = \frac{1}{\lambda_{r',W2}} , k_{-5} = -5 \right\}$ $\left\{ R_{-1} = -\frac{1}{\lambda_{r',W2}} , k_5 = 5 \right\}$
In Umfangrichtung	$\Delta\varphi_{U,W2} = \frac{\Delta\varphi_1}{5}$ $= \frac{2\pi}{5}$	$M_{W2} = 5$	

[0084] Die erste Teilwelle $f_{W1}(\varphi, r')$ hat Wellenfronten, die eine negative Steigung aufweisen (Fig. 6B), während die zweite Teilwelle $f_{W2}(\varphi, r')$ Wellenfronten hat, die eine positive Steigung aufweisen (Fig. 6C). Konkret gilt also für das Muster der Fig. 6A:

$c_{1,6} = \overline{c_{-1,-6}} \neq 0$ und $c_{1,5} = \overline{c_{-1,5}} \neq 0$ während alle anderen Fourier-Koeffizienten Null sind.

[0085] In Figuren 7A-7C ist schematisch dargestellt, wie die Spiraläste auf der Abrichtflankenoberfläche 331 des Abrichtwerkzeugs 33 angeordnet sein können. Fig. 7A zeigt ein Beispiel, in welchem genau ein Spiralast S1, d.h. $i_s = 1$, auf der Abrichtflankenoberfläche 331 ausgebildet ist.

[0086] In Fig. 7B sind zwei Spiraläste S1,S2 auf der Abrichtflankenoberfläche 331 ausgebildet, d.h. $i_s = 2$, wobei die Spiraläste S1,S1 um einen Versatzwinkel $\Delta\varphi$ in Umfangrichtung versetzt sind, welcher in diesem Beispiel π beträgt.

[0087] In der Fig. 7C sind drei Spiraläste S1,S2,S3 ausgebildet, wobei die Spiraläste S1,S2,S3, d.h. $i_s = 3$, hier um einen Versatzwinkel $\Delta\varphi$ in Umfangrichtung versetzt sind, welcher $2\pi/3$ beträgt.

[0088] In den Figuren 7D und 7E ist ein weiteres Beispielmuster anhand konkreter Zahlen verdeutlicht. In diesem Beispiel beträgt die Anzahl an Spiralästen $i_s = 2$, die Radialwellenlänge $\lambda_{r'} = 15$ mm, die Musterperiode beträgt $\Delta r' = 30$ mm, die Ordnung in Spiralastrichtung beträgt $L = 50$ und die Spiraläste S1,S2 verlaufen gegen den Uhrzeigersinn. Die Spiralwelligkeit weist eine Amplitude von $A = 3.5$ μ m auf.

[0089] Damit berechnen sich die Ordnungen der Welligkeiten in Umfangsrichtung einer ersten Teilwelle 1 und einer zweiten Teilwelle 2 anhand folgender Gleichungen:

$$\text{Teilwelle 1: } M_{W1} = 1 + L = 51$$

$$\text{Teilwelle 2: } M_{W2} \neq |1 - L| = 49$$

[0090] Die Ordnung in Radialrichtung betragen:

Teilwelle 1:

$$N_{W,1} = \frac{\Delta r'}{\lambda_{r'}} = 2$$

Teilwelle 2:

$$N_{W,2} = \frac{\Delta r'}{\lambda_{r'}} = 2$$

[0091] Die Fourier-Koeffizienten ungleich Null, in diesem Fall reelle Fourier-Koeffizienten, sind somit:

$$c_{+2,+51} = c_{-2,-51} = c_{+2,-49} = c_{-2,+49} = \frac{A}{4} = \frac{3.5 \mu\text{m}}{4} = 0.875 \mu\text{m}$$

[0092] Damit lässt sich die schachbrettartige Welligkeit mit der folgenden Gleichung beschreiben:

$$\begin{aligned} f(\varphi, r') &= c_{+2,+51} \cdot e^{i\left(51\varphi + 2\pi \frac{2}{30 \text{ mm}} \cdot r'\right)} + c_{-2,-51} \cdot e^{-i\left(51\varphi + 2\pi \frac{2}{30 \text{ mm}} \cdot r'\right)} \\ &+ c_{+2,-49} \cdot e^{i\left(-49\varphi + 2\pi \frac{2}{30 \text{ mm}} \cdot r'\right)} + c_{-2,+49} \cdot e^{-i\left(-49\varphi + 2\pi \frac{2}{30 \text{ mm}} \cdot r'\right)} \\ &= 0.875 \mu\text{m} \left(e^{i\left(51\varphi + 2\pi \frac{1}{15 \text{ mm}} \cdot r'\right)} + e^{-i\left(51\varphi + 2\pi \frac{1}{15 \text{ mm}} \cdot r'\right)} \right) \\ &+ 0.875 \mu\text{m} \left(e^{i\left(-49\varphi + 2\pi \frac{1}{15 \text{ mm}} \cdot r'\right)} + e^{-i\left(-49\varphi + 2\pi \frac{1}{15 \text{ mm}} \cdot r'\right)} \right) \end{aligned}$$

[0093] Über die Beziehung $(2 \cdot \cos(x) = e^{ix} + e^{-ix})$ lässt sich $f(\varphi, r')$ auch in eine reelle Schreibweise überführen:

$$f(\varphi, r') = 2 \cdot 0.875 \mu\text{m} \cdot \left[\cos\left(51\varphi + 2\pi \cdot \frac{1}{15 \text{ mm}} \cdot r'\right) + \cos\left(-49\varphi + 2\pi \cdot \frac{1}{15 \text{ mm}} \cdot r'\right) \right]$$

[0094] Das Muster $f(\varphi, r')$ nach dieser Formel mit den zwei Spiralästen S1, S2 ist in Fig. 7D dargestellt. In der Fig. 7E ist ein Ausschnitt des Musters aus der Fig. 7D als Abrichtflankenmodifikation $f(\varphi, r)$ auf den Kreising projiziert zu sehen, wobei sich das Muster hier über eine Profilhöhe $d < \Delta r'$ mit $d = 20 \text{ mm}$ erstreckt und wobei gilt: $f(\varphi, r) = f(\varphi, r' + r_A)$ mit $r_A = 30 \text{ mm}$.

Herstellung des Abrichtwerkzeugs

[0095] Abrichtwerkzeuge mit den voranstehend erläuterten Abrichtflankenmodifikationen können sowohl in einem Positivverfahren, als auch in einem Negativverfahren hergestellt werden.

Positivverfahren

[0096] Beim Positivverfahren wird ein Grundkörper, vorzugsweise aus Stahl, bereitgestellt, welcher mit Hartstoffpartikeln, typischerweise Diamantpartikeln, bevorzugt galvanisch beschichtet wird. Verfahren zur Herstellung eines Grundkörpers mit einem Hartstoffpartikelbelag im Positivverfahren sind aus dem Stand der Technik bekannt, beispielsweise aus den Veröffentlichungen EP 2535145 A2 und EP 2835220 A1, deren Offenbarung hierin durch Verweis vollständig aufgenommen wird.

[0097] Fig. 8 zeigt schematisch eine Konditioniervorrichtung 50 gemäss einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Die Konditioniervorrichtung umfasst ein Abrichtwerkzeugs 33 (hier in Schnittansicht), wobei der Grundkörper 330 einen Hohlzylinder aufweist, welcher auf eine Abrichtspindel 32 aufgespannt und zu einer Drehung um die Abrichtdrehachse A angetrieben werden kann. Um den Hohlzylinder herum erstreckt sich eine Kreisscheibe mit in radialer Richtung bezüglich der Abrichtdrehachse A spitz zulaufenden Abrichtflanken. Die auf den Abrichtflanken aufgebrachtten Hartstoffpartikel bilden die Abrichtflankenoberfläche 331. Um die Abrichtflankenoberfläche 331 mit Abrichtflankenmodifikationen zu versehen, wird die Abrichtflankenoberfläche mit einem Konditionierwerkzeug 51 bearbeitet. Dieses Konditionierwerkzeug 51 ist in dem hier schematisch dargestellten Beispiel eine schmale Konditionierscheibe, welche um eine hier parallel zu der zu bearbeitenden Abrichtflanke verlaufende Konditionierdrehachse K drehbar und dabei in einer Richtung normal zur Abrichtflankenoberfläche 331 sowie parallel zur Konditionierdrehachse K bewegbar ist. Bevorzugt weist die Konditionierscheibe einen Abrasivbelag mit gebundenen Hartstoffpartikeln auf, die eine vergleichbare oder höhere Härte als die Hartstoffpartikel des Abrichtwerkzeugbelags aufweisen. Um die Abrichtflankenmodifikationen zu erzeugen, wird das Abrichtwerkzeug zu einer Drehung um die Abrichtdrehachse A angetrieben, während das Konditionierwerkzeug 51 zu einer Drehung um die Konditionierdrehachse K angetrieben wird. Die rotierende Konditionierscheibe wird dann derart zugestellt, dass sie mit der Abrichtflankenoberfläche 331 in Berührung kommt und dadurch Materialabtragung von der Abrichtflankenoberfläche 331 stattfindet. In dem in Fig. 8 dargestellten Beispiel erfolgt die Zustellbewegung parallel zur einer Normalen der Abrichtflankenoberfläche 331.

[0098] Die Zustellbewegung des Konditionierwerkzeugs 51 bzw. die dadurch bewirkte Zustellposition senkrecht zur Abrichtflankenoberfläche kann dabei mit einer Zustellfrequenz f_K oszillieren, welche auf eine Drehfrequenz des Abrichtwerkzeugs f_A abgestimmt ist, um die gewünschten Welligkeiten zu erzeugen, während zusätzlich eine diskontinuierliche oder kontinuierliche Konditionieraxialbewegung entlang der Konditionierdrehachse K stattfinden kann. Um eine wellenförmigen Abrichtflankenmodifikation gewünschter Ordnung in Umfangsrichtung M zu erhalten, gilt insbesondere:

$$f_K + Mf_A$$

[0099] Die Konditioniervorrichtung umfasst eine Konditioniersteuerung 53, welche dazu ausgebildet ist, die Drehfrequenz des Abrichtwerkzeugs f_A und die Zustellfrequenz f_K aufeinander abzustimmen, sowie die Zustellbewegung des Konditionierwerkzeugs 51 relativ zum Abrichtwerkzeug 33 zu steuern.

Beispiele:

[0100] Im Folgenden wird die Erzeugung der in den Figuren 2-6A beispielhaft aufgeführten Abrichtflankenmodifikationen erläutert.

Erzeugen der Abrichtflankenmodifikation der Fig. 2:

[0101] Die auf dem abgewickelten Kreisring gegenüber der Umfangrichtung um den Neigungswinkel α geneigt verlaufenden Wellenfronten können folgendermassen erzeugt werden:

Zustellen des Konditionierwerkzeugs in der Richtung normal zur Abrichtflankenoberfläche auf einen konstanten Zustellwert;

Erzeugen einer kontinuierlichen Konditionieraxialbewegung des Konditionierwerkzeugs mit einer konstanten Axialgeschwindigkeit entlang der Konditionierdrehachse K während mindestens einer Umdrehung des Abrichtwerkzeugs 33.

[0102] Die kontinuierliche Konditionieraxialbewegung kann dabei bezogen auf die Radialrichtung des Abrichtwerkzeugs 33 entweder von innen nach aussen oder von aussen nach innen erfolgen. Eine Vergrösserung des gewünschten Neigungswinkels α geht bei gleichbleibender Drehfrequenz f_A des Abrichtwerkzeugs mit einer Erhöhung der konstanten Axialgeschwindigkeit einher.

[0103] Für das in Fig. 2 konkret gezeigte Beispiel, bei welchem der Neigungswinkel α derart gewählt ist, dass die Wellenfronten auf den abgewickelten Kreisring projiziert eine Steigung mit einem Betrag von $\Delta r'/2\pi$ aufweisen, muss die Axialgeschwindigkeit somit für einen festen Wert der Drehfrequenz f_A des Abrichtwerkzeugs eine auf die Radialrichtung des Abrichtwerkzeugs projizierte Geschwindigkeitskomponente von

$$v_r = \Delta r' f_A$$

aufweisen.

[0104] In dem in Fig. 2 gezeigten Beispiel wird pro Umdrehung des Abrichtwerkzeugs eine über die gesamte Länge des abgewickelten Kreisrings schräg verlaufende Konditionierspur in der Abrichtflankenoberfläche erzeugt, welche einem Wellental (dunkel schattiert in Fig. 2) entspricht und somit eine Breite aufweist, die der halben Radialwellenlänge $\lambda_r / 2$ entspricht. Um die weiteren in Fig. 2 dargestellten Wellentäler zu erzeugen, wird das Konditionierwerkzeug nach jeder Umdrehung des Abrichtwerkzeugs neu angesetzt, allerdings in Bezug auf den abgewickelten Kreisring um die Umfangwellenlänge $\Delta\phi_U$ in Umfangrichtung verschoben.

Erzeugen der Abrichtflankenmodifikation der Fig. 3:

[0105] In Fig. 3 weist die wellenförmige Abrichtflankenmodifikation Wellenfronten auf, welche auf den Kreisring projiziert radial ausgerichtet sind. Zur Erzeugung dieser Abrichtflankenmodifikation oszilliert die Zustellposition des Konditionierwerkzeugs normal zur Abrichtflankenoberfläche mit einer Zustellfrequenz f_K , welche auf die Drehfrequenz f_A des Abrichtwerkzeugs abgestimmt ist, wobei währenddessen keine Konditionieraxialbewegung entlang der Konditionierdrehachse K stattfindet. Um eine wellenförmige Abrichtflankenmodifikation gewünschter Ordnung in Umfangsrichtung M zu erhalten, muss folgende Beziehung erfüllt sein:

$$f_K = Mf_A$$

[0106] Das Konditionierwerkzeug 51 erzeugt somit eine in Umfangrichtung verlaufende Konditionierspur mit einer entsprechenden Welligkeit der Ordnung M.

[0107] Je nach Profilhöhe d des Kreisrings, über welche sich die Abrichtflankenmodifikation erstrecken soll, und je nach Breite der einzelnen Konditionierspur muss das Konditionierwerkzeug an einer Mehrzahl verschiedener Positionen entlang der Konditionierdrehachse K neu angesetzt werden. Damit in Radialrichtung benachbart verlaufende Konditionierspuren durchgehende, radial geradlinig verlaufende Wellenfronten bilden, muss jeweils beim Ansetzen des Konditionierwerkzeugs an der neuen Position sichergestellt werden, dass die oszillierende Zustellbewegung des Konditionierwerkzeugs eine

Phasenlage aufweist, welche derart mit der Drehung des Abrichtwerkzeugs 33 synchronisiert ist, dass die Welligkeit der neuen Konditionierspur gleichphasig zur Welligkeit der vorangehend erzeugten Konditionierspur verläuft.

[0108] Alternativ ist es auch denkbar, eine kontinuierlichen Konditionieraxialbewegung des Konditionierwerkzeugs mit einer konstanten Axialgeschwindigkeit entlang der Konditionierdrehachse K zu erzeugen, anstatt nach einer Umdrehung des Abrichtwerkzeugs das Konditionierwerkzeug entlang der Konditionierdrehachse jeweils neu anzusetzen. Damit aber in Radialrichtung im Wesentlichen geradlinig verlaufende Wellenfronten gebildet werden, muss die Axialgeschwindigkeit derart gewählt werden, dass das Konditionierwerkzeug nach einer Umdrehung des Abrichtwerkzeugs entlang der Konditionierdrehachse K eine Distanz zurückgelegt hat, welche maximal der Breite der Konditionierspur entspricht.

Erzeugen der Abrichtflankenmodifikation der Fig. 4:

[0109] Die in Fig. 4 gezeigte Abrichtflankenmodifikation kann erstellt werden, indem das Konditionierwerkzeug in der Richtung normal zur Abrichtflankenoberfläche auf einen konstanten Zustellwert zugestellt wird, wobei (im Gegensatz zur Erzeugung der Abrichtflankenmodifikation in Fig. 2) keine kontinuierlichen Konditionieraxialbewegung entlang der Konditionierdrehachse K stattfindet, wodurch eine parallel zur Umfangrichtung verlaufende Konditionierspur erzeugt wird. Das Konditionierwerkzeug wird nach mindestens einer Umdrehung des Abrichtwerkzeugs an einer Mehrzahl verschiedener Positionen entlang der Konditionierdrehachse K zur Erzeugung in radialer Richtung benachbarter neuer Konditionierspuren neu angesetzt, wodurch Wellenfronten erzeugt werden, welche sich, auf den abgewickelten Kreisring projiziert, geradlinig parallel zur Umfangrichtung erstrecken.

Erzeugen der Abrichtflankenmodifikation der Fig. 5:

[0110] Die in Fig. 5 gezeigte Abrichtflankenmodifikation kann durch eine Überlagerung der für die Erzeugung der jeweils in Fig. 3 und Fig. 4 dargestellten Abrichtflankenmodifikation erforderlichen Schritte erzeugt werden: Zur Erzeugung der in Fig. 5 gezeigten Abrichtflankenmodifikation oszilliert die Zustellposition des Konditionierwerkzeugs normal zur Abrichtflankenoberfläche mit einer Zustellfrequenz f_K , welche auf die Drehfrequenz f_A des Abrichtwerkzeugs abgestimmt ist, wobei währenddessen keine Konditionieraxialbewegung entlang der Konditionierdrehachse K stattfindet. Um eine wellenförmigen Abrichtflankenmodifikation gewünschter Ordnung in Umfangsrichtung M zu erhalten, muss folgende Beziehung erfüllt sein:

$$f_K = M f_A$$

[0111] Das Konditionierwerkzeug 51 erzeugt somit eine in Umfangrichtung verlaufende Konditionierspur mit einer Umfangwelligkeit der Ordnung M.

[0112] Das Konditionierwerkzeug 51 wird nach einer Umdrehung des Abrichtwerkzeugs 33 an einer Mehrzahl verschiedener Positionen entlang der Konditionierdrehachse K zur Erzeugung in Radialrichtung benachbarter neuer Konditionierspuren mit einer jeweiligen Breite einer halben Radialwellenlänge $\lambda_r/2$ neu angesetzt. Dadurch werden die Umfangwelligkeit entlang parallel zur Umfangrichtung verlaufender Umfangpfade U1, U2 gebildet. Die oszillierende Zustellbewegung des Konditionierwerkzeugs weist dabei eine Phasenlage auf, welche derart mit der Drehung des Abrichtwerkzeugs 33 synchronisiert ist, dass die resultierenden Umfangwelligkeiten um 180° zueinander verschoben sind.

[0113] Erzeugen der Abrichtflankenmodifikation der Fig. 6A:

[0114] Zur Erzeugung der in Fig. 6A gezeigten Abrichtflankenmodifikation wird, wie im Fall der Abrichtflankenmodifikation in Fig. 2, ebenfalls eine kontinuierliche Konditionieraxialbewegung des Konditionierwerkzeugs entlang der Konditionierdrehachse K über mindestens eine Umdrehung des Abrichtwerkzeugs 33 mit einer konstanten Axialgeschwindigkeit erzeugt, allerdings wird dabei das Konditionierwerkzeug in der Richtung normal zur Abrichtflankenoberfläche (im Gegensatz zur Situation in Fig. 2) nicht auf einen konstanten Zustellwert zugestellt, sondern die Zustellposition des Konditionierwerkzeugs oszilliert stattdessen normal zur Abrichtflankenoberfläche mit einer Zustellfrequenz f_K , welche auf die Drehfrequenz des Abrichtwerkzeugs f_A abgestimmt ist. Daraus resultiert eine Abrichtflankenmodifikation, bei welcher in Umfangrichtung jeweils benachbarte Wellentäler und Wellenberge entlang auf dem Kreisring spiralförmig verlaufenden Spiralasts S1 angeordnet sind, wobei der Spiralast S1 auf dem abgewickelten Kreisring eine gegenüber der Umfangrichtung geneigte Gerade bilden.

[0115] Um eine wellenförmigen Abrichtflankenmodifikation gewünschter Ordnung in Spiralastrichtung L zu erhalten, muss folgende Beziehung erfüllt sein:

$$f_K = L f_A$$

[0116] Um weitere Spiraläste S2, S3... zu erzeugen, wird das Konditionierwerkzeug nach der Erzeugung eines Spiralasts jeweils neu angesetzt, allerdings in Bezug auf den abgewickelten Kreisring um einen Versatzwinkel $\Delta\phi$ in Umfangrichtung ϕ verschoben. In einer bevorzugten Variante wird der Versatzwinkel $\Delta\phi$ derart gewählt, dass folgende Beziehung erfüllt ist:

$$i_s \Delta \varphi = 2\pi,$$

wobei i_s die Anzahl der Spiraläste darstellt.

[0117] Die zur Erzeugung der erläuterten Beispiele angewendeten Schritte lassen sich selbstverständlich zur Erzeugung weiterer, hier nicht explizit bildlich dargestellter Abrichtflankenmodifikationen kombinieren.

[0118] Insbesondere sind beispielsweise auch Muster denkbar, bei welchen sich durchgehende Wellentäler unter einem beliebig vorgegebenen Winkel kreuzen. Rein radial ausgerichtete Wellentäler können beispielsweise rein in Umfangrichtung ausgerichtet Wellentäler unter einem auf den Kreisring projizierten Winkel von 90° kreuzen. Alternativ können die sich kreuzenden Wellentäler auch schräg über die Abrichtflankenoberfläche verlaufen.

[0119] Die Drehfrequenz des Abrichtwerkzeugs f_A und/oder die Zustellfrequenz f_K des Konditionierwerkzeugs und/oder die Konditionieraxialbewegung können während der Bearbeitung zeitlich variiert werden, um gezielte Abrichtflankenmodifikationen zu erzeugen, welche komplexere Muster aufweisen.

Negativverfahren

[0120] Abrichtwerkzeuge mit den voranstehend erläuterten Abrichtflankenmodifikationen können alternativ auch in einem Negativverfahren hergestellt werden. Dafür wird ein Negativgrundkörper, bevorzugt aus Aluminium oder Graphit, bereitgestellt, welcher anhand eines Drehwerkzeugs zu einer Negativform des gewünschten Abrichtwerkzeugs ausgedreht wird. Negativverfahren zur Herstellung von Abrichtwerkzeugen sind aus dem Stand der Technik bekannt, beispielsweise aus der Veröffentlichung EP 1110671 A2, deren Offenbarung hierin durch Verweis vollständig aufgenommen wird.

[0121] Um die gewünschten Abrichtflankenmodifikationen auf der Abrichtflankenoberfläche 331 zu erhalten, kann gezielt eine entsprechende Negativmodifikation in die Negativform gedreht werden. Fig. 9 zeigt eine schematische Schnittansicht einer Negativform 60, wobei die Negativform 60 um eine Negativformdrehachse D drehbar gelagert ist und bezüglich der Negativformdrehachse D radial nach aussen spitz zulaufenden Innenflanken 61 aufweist. In Fig. 9 ist schematisch ein Drehmeissel 70 dargestellt, welcher in die Negativform 60 eingeführt wird und welcher eine bezüglich der Negativformdrehachse D radial abstehende Drehmeisselspitze 71 aufweist, mit welcher zur Erzeugung der Negativmodifikationen Material von den Innenflanken 61 abgetragen wird, während sich die Negativform mit einer Drehfrequenz f_N um die Negativformdrehachse D dreht.

[0122] Durch Überlagerung einer axialen Bewegung der Drehmeisselspitze 71 entlang der Negativformdrehachse D und einer radialen Bewegung bezüglich der Negativformdrehachse D kann die Drehmeisselspitze 71 entlang der ganzen mindestens einen Innenflanke 61 bewegt werden.

[0123] Indem die axiale Bewegung der Drehmeisselspitze 71 entlang der Negativformdrehachse D mit einer Drehmeisselfrequenz f_D oszilliert (wie in Fig. 9 schematisch durch eine Sinuskurve dargestellt), werden Negativspuren in die Negativform gedreht, welche in Umfangrichtung eine Umfangwelligkeit aufweisen, die einem Negativabdruck der gewünschten Abrichtflankenmodifikation des anhand dieser Negativform hergestellten Abrichtwerkzeugs entsprechen. Die Drehfrequenz f_N der Negativform sowie die Drehmeisselfrequenz f_D können jeweils zeitlich konstant sein, können aber auch zeitlich variiert werden. Analog zu den voranstehend erläuterten Beispielen zur direkten Bearbeitung der Abrichtflanken mit einem Konditionierwerkzeug können durch entsprechende Überlagerungen der axialen und radialen Bewegungen der Drehmeisselspitze 71 bezüglich der Negativformdrehachse D, sowie durch entsprechende Synchronisierung mit der Drehung der Negativform 60 sämtliche in den Figuren 2-6A beispielhaft gezeigten Abrichtflankenmodifikationen, sowie weitere Abwandlungen davon erzeugt werden.

[0124] Die Drehmeisselfrequenz f_D und/oder die Drehfrequenz f_N der Negativform und/oder eine axiale und/oder radiale Zustellbewegung der Drehmeisselspitze entlang der Innenflanke 61 können während der Bearbeitung zeitlich variiert werden, um gezielte Abrichtflankenmodifikationen zu erzeugen, welche komplexere Muster aufweisen.

[0125] Alternativ oder zusätzlich kann das gezielte Erzeugen der Negativmodifikationen auch ein gezieltes Erzeugen von Verspannungen der Negativform umfassen, wie nun anhand der Figuren 10A und 10B erläutert wird.

[0126] Fig. 10A zeigt eine schematische Schnittansicht der Negativform 60 mit dem Drehmeissel 70, wobei in dieser Ausführungsform eine Verformungsvorrichtung 80 an der Negativform 60 angebracht ist und diese verspannt. In dem hier gezeigten Beispiel übt die Verformungsvorrichtung 80 in axialer Richtung bezüglich der Negativformdrehachse D eine Kraft auf die Negativform 60 aus, derart, dass diese leicht zusammengedrückt wird. Dadurch werden Bereiche der Innenflanken 61 axial näher zueinander gedrückt. Passieren nun diese zueinander gedrückten Bereiche der Innenflanken 61 während der Drehung der Negativform die fix stehende Drehmeisselspitze 71, so findet an den zueinander gedrückten Bereichen eine grössere Materialabtragung statt als in anderen Bereichen der Negativform 60, welche nicht von der Verformungsvorrichtung 80 zusammengedrückt werden. Bevorzugt weist die Verformungsvorrichtung 80 periodisch in Umfangrichtung der Negativform angeordneter Krafteinwirkungsbereiche auf. Zur Erzeugung der Kraft auf diese Krafteinwirkungsbereiche kann die Verformungsvorrichtung 80 beispielsweise mechanische oder hydraulische Verspannungselemente aufweisen. Insbesondere kann die Kraft durch eine Schraube direkt auf den Krafteinwirkungsbereich ausgeübt werden. Ebenso kann die Kraft auf den Krafteinwirkungsbereich durch einen hydraulischen Kolben erzeugt werden. Alternativ oder zusätzlich kann die Verformungsvorrichtung eine zweiteilige Vorrichtung aufweisen, welche die Negativform zumindest teilweise um-

greift und durch Schrauben und/oder hydraulische Kolben zusammengehalten wird. In einem entspannten Zustand (Fig. 10B) weist die Negativform dann eine Negativspur mit einer Umfangswelligkeit auf, wobei Wellentäler in der Negativform da auftreten, wo eine Krafteinwirkung durch die Verformungsvorrichtung 80 stattgefunden hat. Diese Wellentäler in der Negativform 60 entsprechen dann den Wellenbergen auf der Abrichtflankenoberfläche des anhand dieser Negativform hergestellten Abrichtwerkzeugs.

[0127] Die Verwendung einer Verformungsvorrichtung kann natürlich auch mit der Verwendung einer relativ zur Negativform bewegten Drehmeisselspitze 71 zur Erzeugung beliebiger Negativmodifikation/Abrichtflankenmodifikationen kombiniert werden.

Abrichten der Schleifschnecke

[0128] Die Erfindung umfasst ebenfalls ein Verfahren zum Abrichten einer Schleifschnecke 16 für die Wälzbearbeitung vorverzahnter Werkstücke, bei welchem die Abrichtmodifikationen des Abrichtwerkzeugs 33 auf eine Schleifschneckenflanke 161 der Schleifschnecke abgebildet werden, wodurch auf der Schleifschneckenflanke 161 eine Schneckenmodifikation erzeugt wird. Das Abrichtwerkzeug 33 und die Schleifschneckenflanke 161 stehen dabei im Linienkontakt.

[0129] Fig. 11 zeigt eine kreisringförmige Projektion einer Schleifschneckenflanke 161 in einer zu einer Schneckendrehachse B senkrecht stehenden Ebene in abgewickelter Form, wobei die kreisringförmige Projektion eine Schneckenumfangrichtung mit einer Schneckenumfangskoordinate φ_s und eine Schneckenradialrichtung mit einer Schneckenradialkoordinate r_s definiert.

[0130] Auf der abgewickelten Schleifschneckenflanke 161 sind schematisch Schneckenmodifikationen in Form dreier Spiraläste $S1'$, $S1''$, $S1'''$ dargestellt, wobei die drei Spiraläste $S1'$, $S1''$, $S1'''$ auf der Schleifschneckenflanke 161 demselben Spiralast $S1$ auf der Abrichtflankenoberfläche 331 entsprechen, der allerdings mit unterschiedlichen Drehzahlverhältnissen zwischen dem Abrichtwerkzeug 33 und der Schleifschnecke auf die Schleifschneckenflanke 161 übertragen wurde. Der in Fig. 11 eingezeichnete gestrichelte Pfeil weist in Richtung eines zunehmenden Drehzahlverhältnisses zwischen dem Abrichtwerkzeug 33 und der Schleifschnecke: Je grösser das besagte Drehzahlverhältnis, desto steiler verläuft der abgebildete Spiralast $S1'$, $S1''$, $S1'''$ auf der abgewickelten Schleifschneckenflanke 161. Die durch Übertragung der Abrichtflankenmodifikation auf die Schleifschneckenflanke 161 erzeugte Schneckenmodifikation weist eine Anzahl Wellenperioden bezogen auf eine Umdrehung der Schleifschnecke auf, wobei hier diese Anzahl als Schneckenwelligkeitsordnung L_s bezeichnet wird. Durch Variieren des Drehzahlverhältnisses zwischen dem Abrichtwerkzeug 33 und der Schleifschnecke kann diese Schneckenwelligkeitsordnung L_s beeinflusst werden: je grösser das besagte Drehzahlverhältnis, desto grösser die Schneckenwelligkeitsordnung L_s . Typischerweise beträgt das Drehzahlverhältnis zwischen 10 und 60.

[0131] Das Drehzahlverhältnis kann zeitlich konstant sein, oder aber während des Abrichtens der Schleifschnecke verändert werden, wobei der abgebildete Spiralast $S1'$ in einem solchen Fall auf der abgewickelten Schleifschneckenflanke keine Gerade mehr bildet, sondern geknickt (bei einem abrupten Wechsel des Drehzahlverhältnisses) oder bogenförmig ausgebildet ist (bei kontinuierlichem Wechsel des Drehzahlverhältnisses).

[0132] Abhängig von einer Steigung des Spiralastes $S1$ auf der Abrichtflankenoberfläche 33 und der Profilhöhe d , über welchen sich der Spiralast $S1$ auf der Abrichtflankenoberfläche 33 erstreckt, werden mehrere Umdrehungen des Abrichtwerkzeugs benötigt, um den kompletten Spiralast $S1$ auf die Schleifschneckenflanke 161 abzubilden: Je flacher die Steigung, desto mehr Umdrehungen werden benötigt.

[0133] Es kann also eine gewünschte Schneckenmodifikation auf einer Schleifschneckenflanke 161 eines Schneckengangs der Schleifschnecke 16 definiert werden, welche sich für ein gewähltes festes Drehzahlverhältnis zwischen dem Abrichtwerkzeug 33 und der Schleifschnecke auf eine entsprechende Abrichtflankenmodifikation zurückrechnen lässt, wobei die entsprechende Abrichtflankenmodifikation sich dann gemäss den voranstehend beschriebenen Herstellungsverfahren gezielt erzeugen lässt.

Erzeugung einer gezielten Zahnflankenmodifikation auf einem vorverzahnten Werkstück

[0134] Die vom Abrichtwerkzeug wie voranstehend erläutert erzeugten Schneckenmodifikationen können in einem Wälzbearbeitungsverfahren auf eine Zahnflanke eines vorverzahnten Werkstücks übertragen werden.

[0135] Das Wälzbearbeitungsverfahren wird dabei auf einer Wälzschleifmaschine 1 durchgeführt, welche in Fig. 12 beispielhaft dargestellt ist und die im Folgenden auch verkürzt als „Maschine“ bezeichnet wird. Die Maschine 1 weist ein Maschinenbett 11 auf, auf dem ein Werkzeugträger 12 entlang einer radialen Zustellrichtung X verschiebbar geführt ist. Der Werkzeugträger 12 trägt einen Axialschlitten 13, der entlang einer Vorschubrichtung Z gegenüber dem Werkzeugträger 12 verschiebbar geführt ist. Auf dem Axialschlitten 13 ist ein Schleifkopf montiert, der zur Anpassung an den Schrägungswinkel der zu bearbeitenden Verzahnung um eine parallel zur X-Richtung verlaufende Schwenkachse (die sogenannte A-Achse) verschwenkbar ist. Der Schleifkopf wiederum trägt einen Shift-Schlitten 14, auf dem eine Werkzeugspindel 15 entlang einer Shift-Richtung Y gegenüber dem Schleifkopf verschiebbar ist. Auf der Werkzeugspindel 15 ist eine schneckenförmig profilierte Schleifscheibe (Schleifschnecke) 16 aufgespannt. Die Schleifschnecke 16 wird von der Werkzeugspindel 15 zu einer Drehung um eine Schneckenachse B angetrieben.

[0136] Das Maschinenbett 11 trägt des Weiteren einen schwenkbaren Werkstückträger 20 in Form eines Drehturms, der um eine Schwenkachse C3 zwischen mindestens drei Stellungen verschwenkbar ist. Auf dem Werkstückträger 20 sind einander diametral gegenüberliegend zwei identische Werkstückspindeln montiert, von denen in der Fig. 1 nur eine Werkstückspindel 21 sichtbar ist. Auf jeder der Werkstückspindeln ist jeweils ein Werkstück aufspannbar und zu einer Rotation um eine Werkstückachse antreibbar. Die in der Fig. 1 sichtbare Werkstückspindel 21 ist um die Werkstückachse C1 antreibbar und befindet sich in einer Bearbeitungsposition, in der ein auf ihr aufgespanntes Werkstück 23 mit der Schleifschnecke 16 bearbeitet werden kann. Die andere, um 180° versetzt angeordnete und in der Fig. 1 nicht sichtbare Werkstückspindel befindet sich in einer Werkstückwechselposition, in der ein fertig bearbeitetes Werkstück von dieser Spindel entnommen und ein neues Rohteil aufgespannt werden kann. Um 90° zu den Werkstückspindeln versetzt ist eine Abrichteinrichtung 30 montiert.

[0137] Die Maschine 1 weist somit eine Vielzahl beweglicher Komponenten wie Schlitten oder Spindeln auf, die durch entsprechende Antriebe gesteuert bewegbar sind. Diese Antriebe werden in der Fachwelt häufig als „NC-Achsen“, „Maschinenachsen“ oder verkürzt als „Achsen“ bezeichnet. Teilweise schliesst diese Bezeichnung auch die von den Antrieben angetriebenen Komponenten wie Schlitten oder Spindeln ein.

[0138] Die Maschine 1 weist des Weiteren eine Vielzahl von Sensoren auf. Beispielhaft sind in der Fig. 12 nur zwei Sensoren 18 und 19 schematisch angedeutet. Beim Sensor 18 handelt es sich um einen Schwingungssensor zur Erfassung von Schwingungen des Gehäuses der Schleifspindel 15. Der Sensor 19 ist ein Positionssensor zur Erfassung der Position des Axialschlittens 13 relativ zum Werkzeugträger 12 entlang der Z-Richtung. Darüber hinaus umfasst die Maschine 1 aber noch eine Vielzahl weiterer Sensoren. Unter diesen Sensoren befinden sich insbesondere weitere Positionssensoren zur Erfassung einer Ist-Position von jeweils einer Linearachse, Drehwinkelsensoren zur Erfassung einer Drehposition von jeweils einer Drehachse, Stromaufnehmer zur Erfassung eines Antriebsstroms von jeweils einer Achse und weitere Schwingungssensoren zur Erfassung von Schwingungen von jeweils einer angetriebenen Komponente.

[0139] Alle angetriebenen Achsen der Maschine 1 werden durch eine Maschinensteuerung 40 digital gesteuert. Die Maschinensteuerung 40 umfasst mehrere Achsmodule 41, einen Steuerrechner 42 und eine Bedientafel 43. Der Steuerrechner 42 empfängt Bedienerbefehle von der Bedientafel 43 sowie Sensorsignale von verschiedenen Sensoren der Maschine 1 und errechnet daraus Steuerbefehle für die Achsmodule 41. Er gibt des Weiteren Betriebsparameter an die Bedientafel 43 zur Anzeige aus. Die Achsmodule 41 stellen an ihren Ausgängen Steuersignale für jeweils eine Maschinenachse bereit.

[0140] Mit dem Steuerrechner 42 ist eine Überwachungseinrichtung 44 verbunden, die im Betrieb der Maschine 1 diverse Überwachungsaufgaben wahrnimmt.

[0141] In der Fig. 13 ist ein Ausschnitt aus der Fig. 1 vergrößert dargestellt. Man erkennt hier besonders gut die Abrichteinrichtung 30. Auf einem Schwenkantrieb 31 ist, um eine Schwenkachse C4 schwenkbar, eine Abrichtspindel 32 angeordnet, auf der ein scheibenförmiges Abrichtwerkzeug 33 aufgespannt ist, das mit gezielt erzeugten Abrichtflankenmodifikationen versehen ist.

[0142] In einem Schraubwälzgetriebe, wie es bei einer Paarung aus einem aussenverzahnten Stirnrad (dem vorverzahnten Werkstück 23) und der Schleifschnecke der Fall ist, liegt bei nichtparallelen Achsen des vorverzahnten Werkstücks 23 und der Schleifschnecke 16 eine Punktberührung in vor. Beim Durchwälzen der Paarung wandert der Berührungspunkt entlang eines geometrisch durch die Paarung bestimmten Pfads jeweils über die Zahnflanke des vorverzahnten Werkstücks 23 und über die Schleifschneckenflanke 161 der Schleifschnecke 16. Im vorliegenden Kontext wird der Pfad auf der Zahnflanke als Kontaktpur bezeichnet, der Pfad auf der Schleifschneckenflanke als Schneckenkontaktpfad.

[0143] In einer Ausführungsform des Verfahrens zur Erzeugung einer modifizierten Oberflächenstruktur auf einer Zahnflanke eines vorverzahnten Werkstücks 23 wird zunächst die Schleifschnecke 16 anhand eines voranstehend beschriebenen Abrichtverfahrens mit einem Abrichtwerkzeug 33 abgerichtet, das eine Spiralwelligkeit entlang eines Spiralasts S1 aufweist. Dabei wird das Drehzahlverhältnis zwischen dem Abrichtwerkzeug 33 und der Schleifschnecke derart gewählt, dass die Spiralwelligkeit genau entlang des Schneckenkontaktpfads abgebildet wird, der durch die Paarung zwischen dem zu bearbeitenden vorverzahnten Werkstück 23 und der Schleifschnecke 16 vorgegebenen ist. In anderen Worten wird das Drehzahlverhältnis derart gewählt, dass der auf die Schleifschneckenflanke 161 abgebildete Spiralast S1' auf dem Schneckenkontaktpfad zu liegen kommt. Diese Schneckenmodifikation in Form einer Schneckenwelligkeit entlang des Spiralasts S1' wird nun gezielt auf die Zahnflanke des vorverzahnten Werkstücks 23 übertragen: Dazu wird die Schleifschnecke 16 zu einer Drehung um die Schneckenachse B angetrieben, während das vorverzahnte Werkstück 23 zu einer Drehung um die Werkstückachse C1 angetrieben wird, wobei die Schleifschnecke und das vorverzahnte Werkstück dabei im Wälzeingriff stehen. Zusätzlich wird nun sowohl eine Bewegung der Schleifschnecke 16 relativ zum vorverzahnten Werkstück 23 in der Shift-Richtung Y parallel zur Schneckenachse B, als auch eine Bewegung der Schleifschnecke 16 in einer Axial-Richtung parallel zur Werkstückachse C1 erzeugt. Die Bewegungen der Schleifschnecke in Axial-Richtung und in Shift-Richtung Y stehen dabei in einem derart gewählten Diagonalverhältnis, dass die Schneckenwelligkeit gezielt auf die Zahnflanke des vorverzahnten Werkstücks abgebildet wird und dadurch gezielt die Oberflächenstruktur der Zahnflanke modifiziert wird.

[0144] Es kann also eine gewünschte Zahnflankenmodifikation auf der Zahnflanke des vorverzahnten Werkstücks 23 definiert werden, welche sich für ein gewähltes Diagonalverhältnis auf eine entsprechende Schneckenwelligkeit entlang eines Spiralasts S1' auf der Schleifschneckenflanke 161 zurückrechnen lässt, welche sich dann wiederum für ein gewähl-

tes Drehzahlverhältnis auf eine entsprechende Abrichtflankenmodifikation zurückrechnen lässt, wobei die entsprechende Abrichtflankenmodifikation dann gemäss den voranstehend beschriebenen Herstellungsverfahren gezielt erzeugt werden kann.

BEZUGSZEICHENLISTE

[0145]

1	Wälzschleifmaschine
11	Maschinenbett
12	Werkzeugträger
13	Axialschlitten
14	Shift-Schlitten
15	Werkzeugspindel
16	Schleifschnecke
161	Schleifschneckenflanke
18	Akustiksensord
19	Positionssensord
20	Werkstückträger
21	Werkstückspindel
211	Werkstückspindelantrieb
23	Werkstück
30	Abrichteinrichtung
31	Schwenkeinrichtung
32	Abrichtspindel
33	Abrichtwerkzeug
330	Grundkörper
331	Abrichtflankenoberfläche
40	Maschinensteuerung
41	Achsmodul
42	Steuerrechner
43	Bedientafel
44	Überwachungseinrichtung
50	Konditioniervorrichtung
51	Konditionierwerkzeug
52	Konditionierspindel
53	Konditioniersteuerung
60	Negativform
61	Innenflanke
70	Drehmeissel
71	Drehmeisselspitze
80	Verformungsvorrichtung
A	Abrichtdrehachse
B	Schneckenachse
C1	Werkstückachse
C3	Schwenkachse
C4	Schwenkachse
X	Zustellrichtung
Y	Shift-Richtung
Z	Vorschubrichtung
K	Konditionierdrehachse
D	Negativformdrehachse
r	Radialkoordinate
r'	Radialkoordinate des Musterrechtecks
φ	Winkelkoordinate
φ_S	Schneckenumfangkoordinate
r_S	Schneckenradialkoordinate
λ_r	Radialwellenlänge
$\Delta\varphi_U$	Versatzwinkel
α	Neigungswinkel
d	Profilhöhe
r_A	Innenradius
R1,R2	Radialpfad
U1,U2	Umfangpfad

S1,S2,S3 Spiralast

Patentansprüche

1. Abrichtwerkzeug zum Abrichten einer Schleifschnecke (16) für die Wälzbearbeitung vorverzahnter Werkstücke (23), wobei das Abrichtwerkzeug (33) zur Rotation um eine Abrichtdrehachse (A) ausgebildet ist und eine Abrichtflankenoberfläche (331) aufweist, welche in einer senkrecht zur Abrichtdrehachse (A) stehenden Projektionsebene einen Kreisring bildet, wobei der Kreisring eine Radialrichtung mit einer Radialkoordinate (r) und eine Umfangrichtung mit einer Winkelkoordinate (φ) definiert, wobei die Abrichtflankenoberfläche (331) mit einer gezielt erzeugten Abrichtflankenmodifikation versehen ist, wobei sich die Abrichtflankenmodifikation auf den Kreisring projiziert als zwei-dimensionale Fourier-Reihe in Abhängigkeit der Radialkoordinate (r) und der Winkelkoordinate (φ) beschreiben lässt, dadurch gekennzeichnet, dass die Fourier-Reihe mindestens einen Fourier-Koeffizienten ungleich Null für eine Umfangfrequenzkomponente ungleich Null bezüglich der Winkelkoordinate (φ) aufweist.
2. Abrichtwerkzeug nach Anspruch 1, wobei die Abrichtflankenmodifikation bezüglich der Winkelkoordinate (φ) eine 2π -Periodizität aufweist.
3. Abrichtwerkzeug nach Anspruch 1 oder 2, wobei die Fourier-Reihe keinen Fourier-Koeffizienten ungleich Null für eine Radialfrequenzkomponente ungleich Null in der Radialrichtung aufweist, derart, dass die gezielt erzeugte Abrichtflankenmodifikation bezüglich der Umfangrichtung wellenförmig ist und Wellenfronten in Form von Linien konstanter Phasenlage aufweist, welche auf den Kreisring projiziert radial ausgerichtet sind.
4. Abrichtwerkzeug nach Anspruch 1, wobei die zwei-dimensionale Fourier-Reihe mindestens einen Fourier-Koeffizienten ungleich Null für eine Radialfrequenzkomponente und für eine Umfangfrequenzkomponente ungleich Null aufweist, derart, dass die Abrichtflankenmodifikation auf den Kreisring projiziert eine schachbrettartige Struktur mit schachbrettartig zueinander versetzt angeordneten Wellenbergen und Wellentälern bildet.
5. Abrichtwerkzeug nach Anspruch 4, wobei die schachbrettartige Struktur derart ausgerichtet ist, dass in Umfangrichtung jeweils benachbarte Wellentäler und Wellenberge entlang eines auf dem Kreisring spiralförmig verlaufenden Spiralasts (S1, S2, S3) angeordnet sind.
6. Verfahren zur Herstellung eines Abrichtwerkzeugs (33) nach einem der Ansprüche 1-5, das Verfahren umfassend: Herstellen eines beschichteten Grundkörpers des Abrichtwerkzeugs (33) in einem Positivverfahren, und gezieltes Erzeugen der Abrichtflankenmodifikation mittels eines Konditionierwerkzeugs (51), insbesondere einer zur Abrichtflankenoberfläche senkrecht stehenden rotierenden Konditionierscheibe.
7. Verfahren nach Anspruch 6, wobei das gezielte Erzeugen der Abrichtflankenmodifikation umfasst: Antreiben des Abrichtwerkzeugs (33) zu einer Drehung um die Abrichtdrehachse (A); Antreiben des Konditionierwerkzeugs (51) zu einer Drehung um eine Konditionierdrehachse (K) des Konditionierwerkzeugs (51), und Zustellen des Konditionierwerkzeugs (51) relativ zum Abrichtwerkzeug (33) in einer Richtung, die einen normal zur Abrichtflankenoberfläche verlaufenden Anteil hat, zur Erzeugung der Abrichtflankenmodifikationen durch Materialabtragung von der Abrichtflankenoberfläche (331).
8. Verfahren zur Herstellung eines Abrichtwerkzeugs (33) gemäß einem der Ansprüche 1-5, das Verfahren umfassend: Herstellen des Abrichtwerkzeugs (33) in einem Negativverfahren, wobei das Negativverfahren umfasst: Herstellen einer Negativform (60) durch Ausdrehen eines Negativgrundkörpers; Drehen einer gezielten Negativmodifikation in die ausgedrehte Negativform (60) derart, dass die Negativmodifikation die Abrichtflankenmodifikation bewirkt, und/oder Erzeugen einer mechanischen und/oder hydraulischen Verspannung des Negativgrundkörpers während des Ausdrehens derart, dass die ausgedrehte Negativform (60) nach einem Lösen der mechanischen Verspannung eine Negativmodifikation aufweist, welche die Abrichtflankenmodifikation bewirkt.
9. Verfahren zum Abrichten einer Schleifschnecke (16) für die Wälzbearbeitung vorverzahnter Werkstücke, das Verfahren umfassend: Abrichten der Schleifschnecke (16) mit einem Abrichtwerkzeug (33) nach einem der Ansprüche 1-5, derart, dass die Abrichtflankenmodifikation eine Schneckenmodifikation auf einer Schleifschneckenflanke (161) eines Schneckengangs der Schleifschnecke (16) bewirkt.
10. Verfahren nach Anspruch 9, wobei zwischen dem Abrichtwerkzeug (33) und der Schleifschnecke (16) eine vorgegebene feste Drehwinkelkopplung besteht, um gezielt auf der Schleifschneckenflanke (161) entlang des Schneckengangs eine periodische Schneckenmodifikation zu erzeugen.
11. Verfahren nach Anspruch 9, wobei zwischen dem Abrichtwerkzeug und der Schleifschnecke (16) eine vorgegebene zeitlich variable Drehwinkelkopplung besteht, um auf der Schleifschneckenflanke (161) entlang des Schneckengangs gezielt eine nicht-periodische Schneckenmodifikation zu erzeugen.

12. Verfahren zur Erzeugung einer modifizierten Oberflächenstruktur auf einer Zahnflanke eines vorverzahnten Werkstücks (23), umfassend:
Abrichten einer zur Wälzbearbeitung vorverzahnter Werkstücke (23) geeigneten Schleifschnecke mit dem Verfahren nach einem der Ansprüche 9-11;
Antreiben der Schleifschnecke (16) zu einer Drehung um eine Schneckenachse (B);
Antreiben des vorverzahnten Werkstücks (23) zu einer Drehung um eine Werkstückachse (C1);
Erzeugen einer Relativbewegung zwischen der Schleifschnecke (16) und dem vorverzahnten Werkstück (23) in einer Shift-Richtung (Y) parallel zur Schneckenachse mit einer Shiftvorschubgeschwindigkeit, und
Erzeugen einer Relativbewegung zwischen der Schleifschnecke und dem vorverzahnten Werkstück in einer Axial-Richtung parallel zur Werkstückachse (C1) mit einer Axialvorschubgeschwindigkeit,
wobei die Schleifschnecke (16) und das vorverzahnte Werkstück (23) in einem Wälzeingriff stehen und wobei die Shiftvorschubgeschwindigkeit und die Axialvorschubgeschwindigkeit in einem derart vorgegebenen Diagonalverhältnis stehen, dass die Schneckenmodifikation auf die Zahnflanke des vorverzahnten Werkstücks (23) abgebildet wird und dadurch gezielt die Oberflächenstruktur der Zahnflanke modifiziert wird.
13. Verfahren nach Anspruch 12,
wobei das Abrichtwerkzeug ein Abrichtwerkzeug (33) nach Anspruch 5 ist und wobei während des Abrichtens zwischen dem Abrichtwerkzeug (33) und der Schleifschnecke (16) eine vorgegebene feste Drehwinkelkopplung besteht, die derart gewählt ist, dass der Spiralast (S1) auf einen Schneckenkontaktpfad abgebildet wird,
wobei der Schneckenkontaktpfad einer Linie entspricht, auf welcher sich ein Berührungspunkt zwischen der Schleifschnecke (16) und dem im Wälzeingriff stehenden vorverzahnten Werkstück (23) während der Wälzbearbeitung auf der Schleifschneckenflanke bewegt.

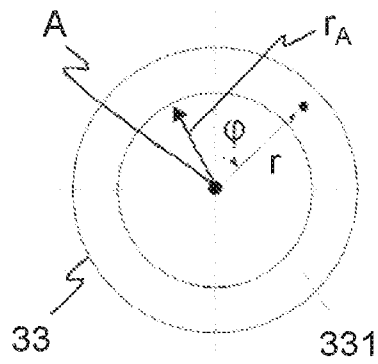


FIG. 1A

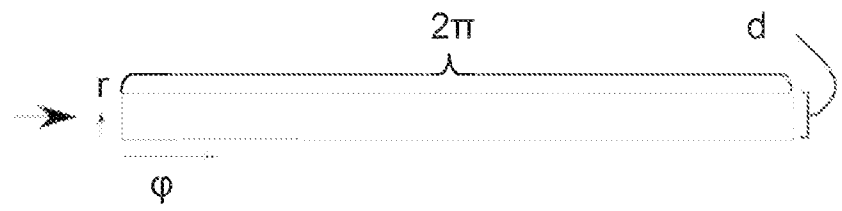


FIG. 1B

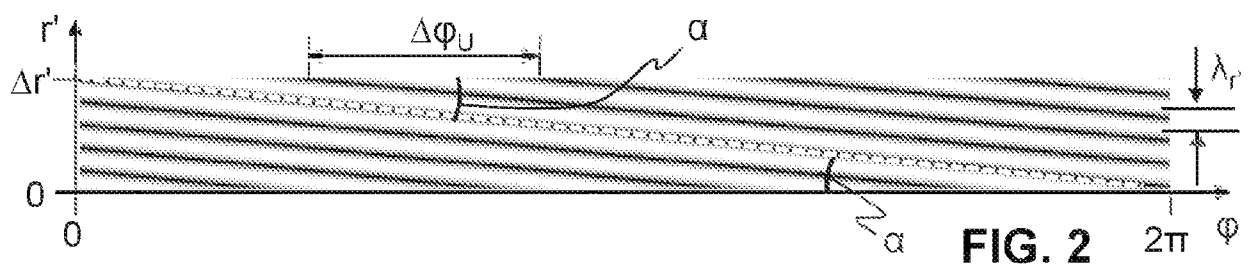


FIG. 2

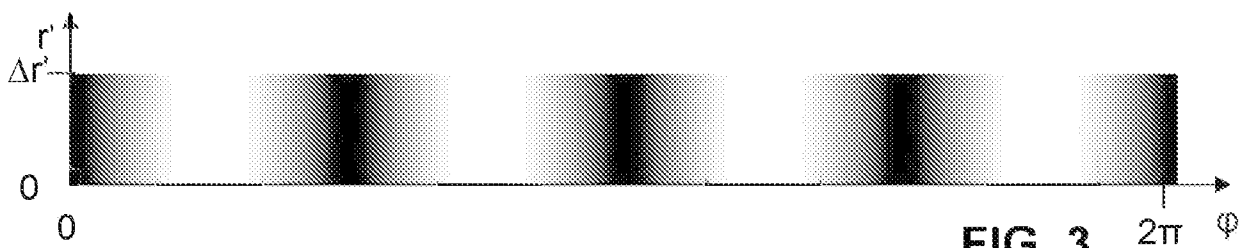


FIG. 3

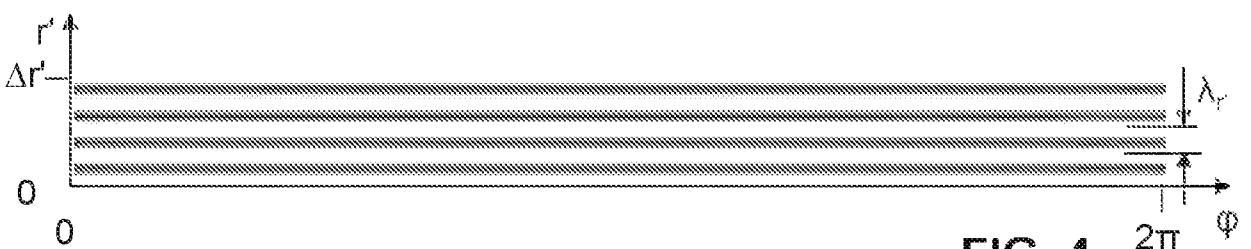


FIG. 4

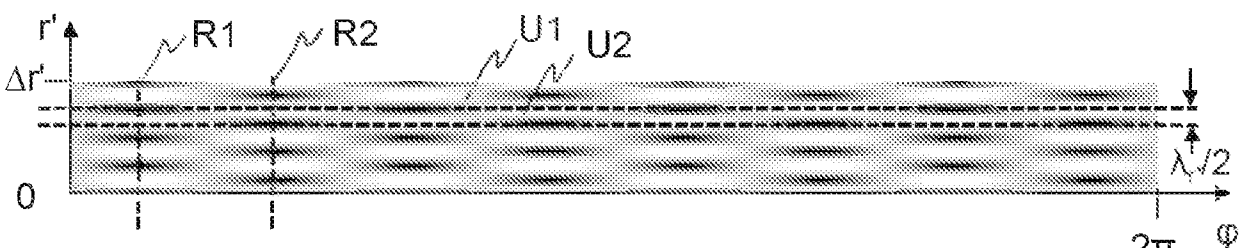
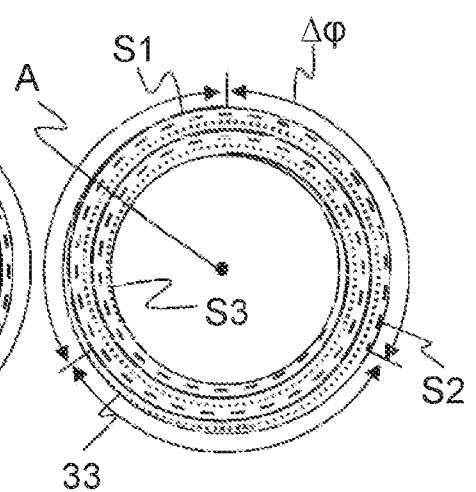
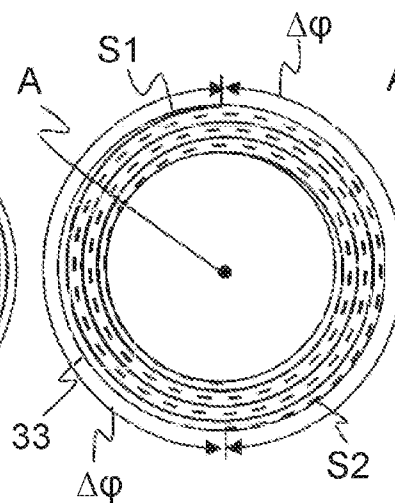
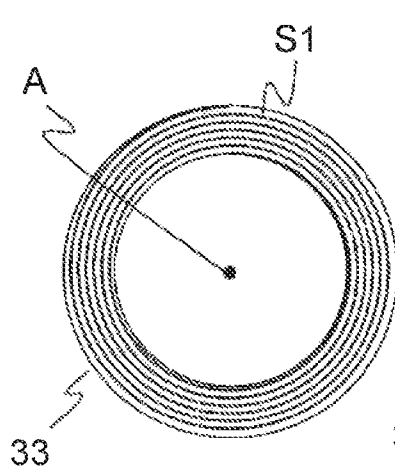
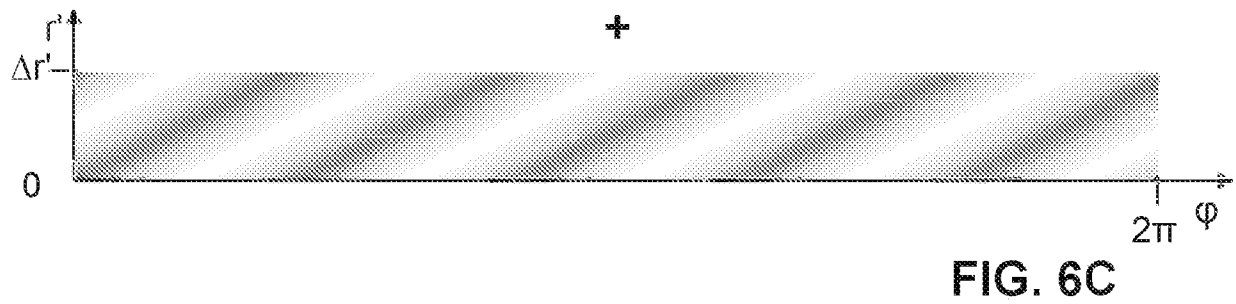
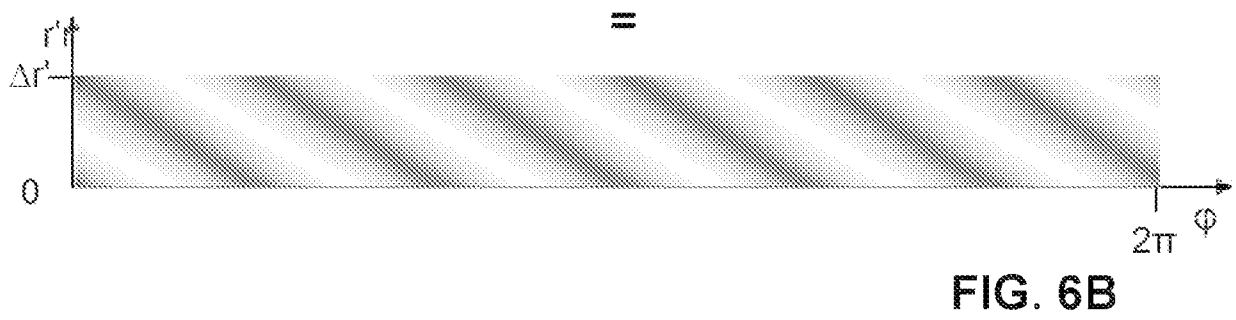
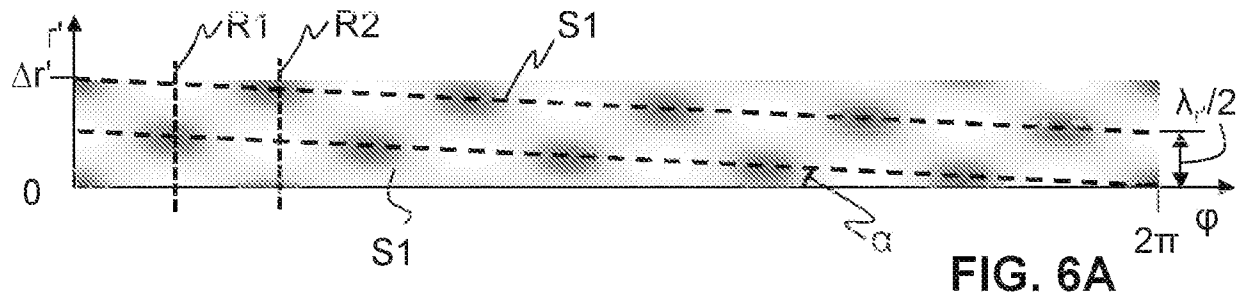


FIG. 5



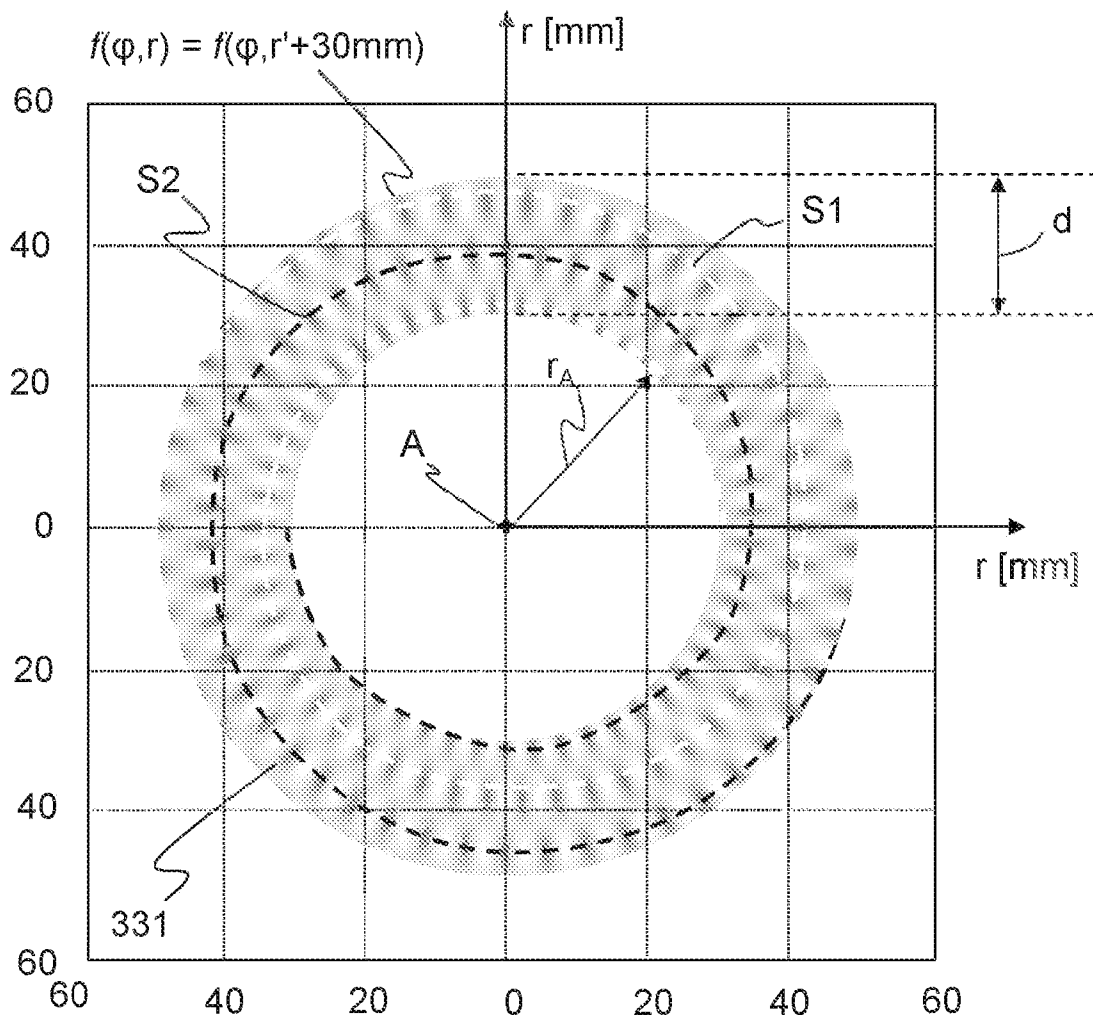
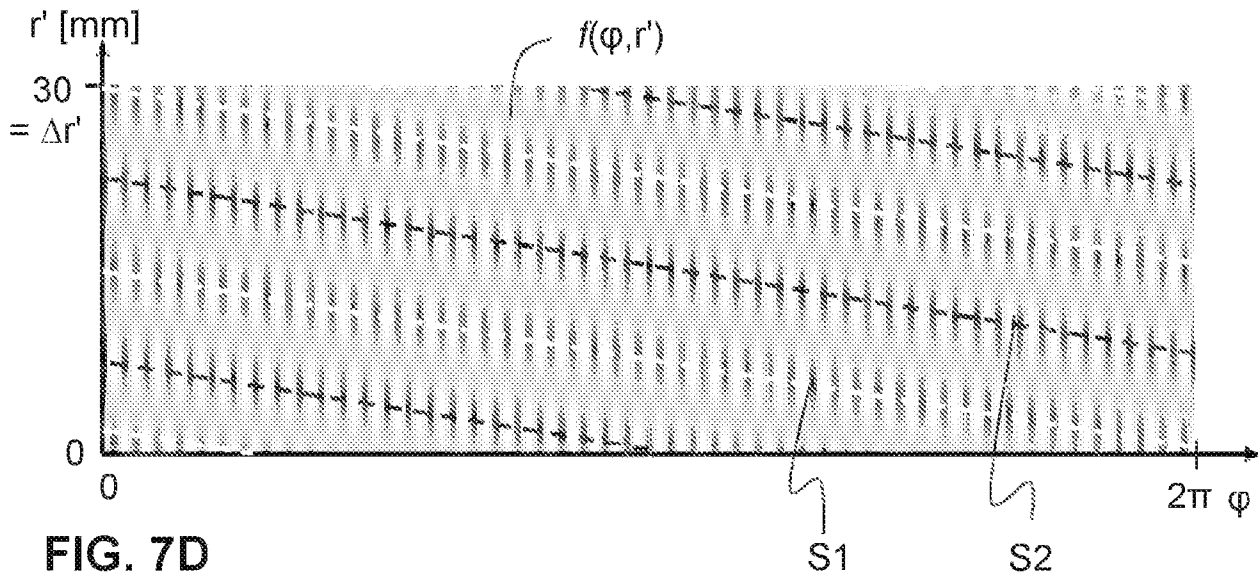


FIG. 7E

